

## Research Article

# Assessment of aggregate stability in relation to physiographic characteristics and canopy density in the Zagros Forests, Iran

Narges Pordel <sup>1</sup>, Jaafar Hosseinzadeh <sup>2\*</sup>, Mehdi Heydari <sup>3</sup> and Reza Omidipour <sup>4</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

2\*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran  
E-mail: [j.hosseinzadeh@ilam.ac.ir](mailto:j.hosseinzadeh@ilam.ac.ir)

3- Prof., Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

4- Assistant Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 16.11.2024

Revised: 27.01.2025

Accepted: 03.02.2025

## Abstract

**Background and Objectives:** Soil is one of the most important components of natural ecosystems and has a direct relationship with vegetation cover. Soil aggregate stability is a crucial physical property that plays an essential role in enhancing permeability and preventing soil erosion, key factors for ecosystem health. While much research has focused on chemical and biological properties, physical characteristics like aggregate stability have received less attention. This study investigates soil aggregate stability under the combined effects of canopy cover density, elevation above sea level, and slope aspect, while examining its relationships with soil moisture and organic matter content.

**Methodology:** The study was conducted in the Zagros forest region (Shalam Mountain), Ilam province, Iran, across various physiographic conditions. A total of 60 soil samples were collected from 0–15 cm depth. Samples came from stands with sparse and semi-dense canopy cover on northern and southern aspects, across three elevation classes (1750–1850, 1850–1950, and 1950–2050 m a.s.l.), using systematic random sampling to assess the interactive effects of canopy cover, slope aspect, and elevation on soil moisture, organic matter, and aggregate stability. Statistical analysis employed three-way ANOVA within a general linear model (GLM) framework. R software and relevant packages were used to analyze correlations among soil organic matter, moisture, and aggregate stability.

**Results:** Slope aspect and canopy cover density significantly affected ( $p < 0.05$ ) mean weight diameter (MWD) of soil aggregates, soil moisture, and organic matter. The highest aggregate stability (MWD = 0.69 mm) occurred on northern slopes in semi-dense areas. Similarly, the highest soil moisture (12.46%) and organic matter (6.39%) were recorded in semi-dense, northern-aspect sites, significantly greater than in southern slopes and sparse areas. Significant positive correlations existed between soil moisture, organic matter, and aggregate stability, highlighting their interrelationships in improving soil quality. These findings indicate that higher tree and shrub cover density in this semi-arid region boosts soil moisture, enhancing aggregate stability and reducing erosion. Greater plant cover also reduces surface evaporation, promoting moisture retention, while litter decomposition accumulates organic matter to improve soil structure and stability.

**Conclusion:** This research shows that sustainable management of Zagros forests, especially

preserving tree and shrub canopy cover, plays a key role in preventing soil degradation, maintaining aggregate stability, and sustaining ecosystem health. Reduced canopy density lowers aggregate stability and organic matter, increasing erosion risk. Thus, strategies to enhance vegetation cover and soil aggregate stability are essential for conserving natural resources.

**Keywords:** Forest canopy, oak, physiographic characteristics, soil erosion, soil properties.

## بررسی پایداری خاکدانه در ارتباط با ویژگی‌های فیزیوگرافی و تراکم تاج پوشش اشکوب فوقانی در جنگل‌های زاگرس

نرگس پردل<sup>۱</sup>، جعفر حسین زاده<sup>۲\*</sup>، مهدی حیدری<sup>۳</sup> و رضا امیدپیور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

پست الکترونیک: [j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir](mailto:j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir)

۳- استاد، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۴- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

### چکیده

سابقه و هدف: خاک از مهم‌ترین اجزای بوم‌سازگان‌های طبیعی است و ارتباط مستقیمی با پوشش گیاهی دارد. پایداری خاکدانه از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک محسوب می‌شود که نقش اساسی در افزایش نفوذپذیری و جلوگیری از فرسایش خاک دارد و برای سلامت بوم‌سازگان مهم است. باتوجه به تمرکز بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی در بیشتر پژوهش‌ها، ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله پایداری خاکدانه، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، پایداری خاکدانه تحت تأثیر اثرات هم‌زمان تراکم تاج پوشش و تغییرات ارتفاع از سطح دریا و جهت دامنه بررسی شد. همچنین، ارتباط بین تغییرات پایداری خاکدانه با رطوبت و مقدار ماده آلی خاک مقایسه شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در منطقه جنگلی زاگرس (کوه شلم) در استان ایلام با در نظر گرفتن شرایط فیزیوگرافی مختلف انجام گرفت. ۶۰ نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری خاک برداشت شد. نمونه‌ها از توده‌های با تراکم تاج پوشش متفاوت (تنک و نیمه‌انبوه) در دو جهت شمالی و جنوبی و در سه طبقه ارتفاع از سطح دریا (۱۷۵۰ تا ۱۸۵۰، ۱۸۵۰ تا ۱۹۵۰ و ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ متر) براساس طرح تصادفی سیستماتیک برداشت شدند تا اثرات متقابل تاج پوشش، جهت دامنه و ارتفاع بر ویژگی‌های خاک (شامل رطوبت خاک، ماده آلی و پایداری خاکدانه) بررسی شوند. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از تجزیه واریانس سه طرفه (Three-way ANOVA) در قالب مدل خطی عمومی (GLM) انجام شد. علاوه بر این، برای بررسی همبستگی بین ویژگی‌های مختلف خاک مانند ماده آلی، رطوبت و پایداری خاکدانه‌ها از نرم‌افزار R و بسته‌های آماری مختلف استفاده شد.

نتایج: یافته‌های پژوهش پیش‌رو نشان داد که جهت دامنه و تراکم تاج پوشش به‌طور معنی‌دار بر میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها، رطوبت خاک و میزان ماده آلی تأثیرگذار هستند ( $p < 0.05$ ). بیشینه پایداری خاک‌دانه‌ها ( $MWD = 0.69$ ) در دامنه‌های شمالی و در مناطق با تراکم تاج پوشش نیمه‌انبوه مشاهده شد. به‌طور مشابه، بیشترین رطوبت خاک ( $12/46$  درصد) و ماده آلی ( $6/39$  درصد) نیز در مناطق با تاج پوشش نیمه‌انبوه و در دامنه‌های شمالی ثبت شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از دامنه‌های جنوبی و تاج پوشش تنک بودند. علاوه بر این، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین رطوبت خاک، میزان ماده آلی و پایداری خاک‌دانه‌ها مشاهده شد که نشان‌دهنده ارتباط متقابل این عوامل در بهبود کیفیت خاک است. این همبستگی‌ها بیانگر آن هستند که افزایش تراکم پوشش گیاهی، درختان و درختچه‌ها در این منطقه جنگلی نیمه‌خشک سبب افزایش رطوبت خاک می‌شود و در نتیجه، بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش فرسایش خاک را به دنبال دارد. تراکم بیشتر پوشش گیاهی باعث می‌شود که تبخیر سطحی کاهش یابد و مقدار بیشتری از رطوبت در خاک حفظ شود. از طرف دیگر، تجمع مواد آلی به واسطه تجزیه پوشش گیاهی به بهبود ساختار خاک و افزایش پایداری آن منجر می‌شود.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس، به‌ویژه حفظ تاج پوشش درختان و درختچه‌ها، نقش مهمی

در جلوگیری از تخریب خاک، حفظ پایداری خاکدانه و در نتیجه، سلامت بوم‌سازگان در این مناطق جنگلی دارد. کاهش تراکم تاج‌پوشش سبب کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها و ماده آلی خاک می‌شود. این فرایند به شکل افزایش فرسایش خاک نمود پیدا می‌کند، بنابراین اجرای راهکارهایی که بر تقویت پوشش گیاهی و افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها تمرکز دارند، می‌تواند نقش مهمی در حفظ منابع طبیعی و کاهش خطر فرسایش خاک ایفا کند.

کلید واژه‌ها: بلوط، تاج‌پوشش جنگل، ویژگی‌های خاک، فرسایش خاک، ویژگی‌های فیزیوگرافی.

## مقدمه

جنگل‌های زاگرس از مهم‌ترین منابع طبیعی ایران هستند که به دلیل تنوع زیستی و نقش کلیدی در حفاظت از منابع آب و خاک، اهمیت ویژه‌ای دارند (Heidarlou et al., 2019; Heydari et al., 2023). پوشش گیاهی این بوم‌سازگان، نقش مهمی در تثبیت خاک، جلوگیری از برخورد ضربه‌های شدید قطره‌های باران و آب‌شویی و نیز بازگشت عناصر غذایی به خاک از طریق لاش‌برگ دارد (Allahinezhad et al., 2024).

ارتباط متقابل بین پوشش گیاهی و خاک، به عنوان بخشی از رابطه دوسویه بین جنگل و خاک، یکی از مهم‌ترین عوامل پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌شمار می‌آید (Karamian et al., 2023). خاک و جنگل، دو عنصر حیاتی و وابسته به هم در بوم‌سازگان هستند که هریک، نقش کلیدی در حمایت از دیگری ایفا می‌کند. از یک سو، پوشش گیاهی به واسطه سیستم ریشه‌های قوی خود به تثبیت خاک کمک می‌کنند و با کاهش جریان‌های سطحی ناشی از بارندگی، مانع از فرسایش خاک می‌شود (Kertész, 2012). همچنین، افزایش تراکم تاج درختان به دلیل ممانعت از تابش مستقیم نور خورشید بر سطح زمین، سبب افزایش رطوبت خاک می‌شود که تقویت فعالیت ریزندامگان‌های خاک و بهبود نرخ تجزیه و بازگشت مواد غذایی به خاک و افزایش حاصلخیزی خاک را به دنبال خواهد داشت (Jafari, 2008). از سوی دیگر، خاک با فراهم کردن شرایط مطلوب برای رشد ریشه‌های گیاهان و جذب آب و مواد مغذی، توسعه و سلامت جنگل‌ها را تضمین می‌کند. این رابطه متقابل میان جنگل و خاک، اهمیت حیاتی برای تعادل بوم‌سازگان و کاهش خطر سیلاب‌ها دارد (Fabre et al., 2015)، بنابراین حفظ کیفیت خاک و مدیریت علمی آن برای

بقای بوم‌سازگان‌های جنگلی ضروری است (Karamian & Hosseini, 2016; Taghipour et al., 2022). عوامل متعددی بر تشکیل و تکامل خاک تأثیرگذار هستند. از جمله آن‌ها می‌توان به فیزیوگرافی سطح زمین (شیب، جهت دامنه و ارتفاع از سطح دریا) اشاره کرد که به عنوان یکی از عوامل کلیدی در تشکیل و تکامل خاک و پراکنش پوشش گیاهی در مناطق کوهستانی، بسیار حائز اهمیت است (Karamian & Hosseini, 2016). توپوگرافی از عوامل مهم غیرزنده در بوم‌سازگان‌های طبیعی محسوب می‌شود و اثر قابل توجهی بر اجزای زنده و غیرزنده بوم‌سازگان دارد (Mirzaei et al., 2017; Ghasemi Arian & Dashti, 2024).

با توجه به اهمیت خاک در پایداری جنگل‌ها، تخریب خاک می‌تواند چالش‌های عمده‌ای را برای زیست‌بوم‌ها و اقتصاد کشاورزی ایجاد کند (Wuepper et al., 2020). فرسایش خاک که به جابه‌جایی ذرات و کاهش بهره‌وری خاک منجر می‌شود، نه تنها مشکلات محیط‌زیستی، بلکه پیامدهای اجتماعی-اقتصادی گسترده‌ای نیز به دنبال دارد (Rajbanshi et al., 2023). به همین دلیل، استفاده از اقدامات حفاظتی مانند حفظ جنگل‌های طبیعی، جنگل‌کاری و روش‌های مختلف مدیریت خاک برای مقابله با این مشکلات ضروری است که می‌توانند به بهبود کیفیت کلی خاک و کاهش تخریب آن کمک کنند (Teimouri et al., 2023).

پایداری خاک‌دانه‌ها (Soil aggregate stability) به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی، نقشی مهمی در حفظ ساختار خاک و جلوگیری از فرسایش ایفا می‌کند. زیرا خاک‌دانه‌های پایدار با افزایش نفوذ آب و کاهش جریان‌های سطحی، به جلوگیری از فرسایش خاک و عناصر غذایی آن

است. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر روابط میان این عوامل و پایداری خاکدانه کمک کند و به‌عنوان مبنای علمی برای بهبود مدیریت منابع طبیعی در این مناطق جنگلی ارائه شود. با تحلیل دقیق این تعاملات، تأثیر مدیریت صحیح پوشش گیاهی در جلوگیری از تخریب خاک و کاهش فرسایش به‌وضوح روشن می‌شود.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

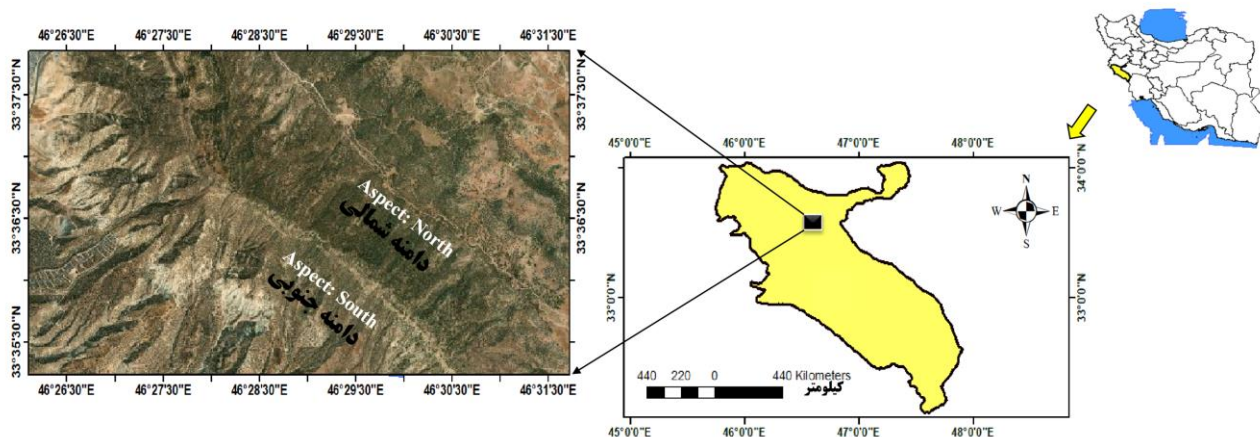
این پژوهش در منطقه‌ای از جنگل‌های زاگرس در نیمه شمالی استان ایلام، در ناحیه کوه شلم واقع در شرق شهر ایلام انجام شد که در دامنه جنوبی تا کنار پارک جنگلی چغاسبز و در دامنه شمالی به جاده تنگه ارغوان محدود شده است. منطقه مورد مطالعه در محدوده طول جغرافیایی  $26^{\circ} 46'$  تا  $31^{\circ}$   $46'$  شرقی و عرض  $36^{\circ} 33'$  تا  $37^{\circ} 33'$  شمالی قرار دارد (شکل ۱). گونه غالب درختی این منطقه، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) است و گونه‌های درختی و درختچه‌ای دیگری مانند زالزالک (*Crataegus pontica* C.)، کیکم (*Acer monspessulanum* L.)، بنه (*Pistacia* Koch)، نیز به‌عنوان گونه‌های همراه مشاهده می‌شوند. ارتفاع منطقه بین ۱۵۰۰ تا ۲۱۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. از سال ۱۳۸۶، شهرستان ایلام به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش میانگین دما، دچار خشک‌سالی شدید تا خیلی شدید شده است (Anonymous, 2010). این منطقه در اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارد و بارندگی سالانه آن به‌طور متوسط ۶۴۳ میلی‌متر است که براساس نقشه‌های هم‌باران محاسبه شده است. بیشینه دمای آن به  $4/18^{\circ}$  درجه سانتی‌گراد می‌رسد، درحالی‌که میانگین کمینه دمای منطقه  $1/6^{\circ}$  درجه سانتی‌گراد است. این منطقه به‌طور متوسط ۴۲ روز یخبندان در سال تجربه می‌کند. کمینه دمای مطلق در بهمن‌ماه به  $15-$  درجه سانتی‌گراد و بیشینه دمای مطلق سالانه به  $47^{\circ}$  درجه سانتی‌گراد می‌رسد (Fathizadeh et al., 2017). منطقه مورد مطالعه دچار خشک‌سالی‌های مکرر شده است و پیش‌بینی می‌شود این روند ادامه یابد (Azizi et al., 2019).

کمک می‌کنند (Zeng et al., 2018). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حضور پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش فرسایش خاک دارد (Dou et al., 2020; Azizi et al., 2021; Zheng et al., 2023; Asadian et al., 2023). برای مثال، در مناطقی با جنگل‌های پهن‌برگ، به‌دلیل مقدار زیاد مواد آلی و ریشه‌های قوی گیاهان، خاک‌دانه‌ها از پایداری بیشتری برخوردار هستند و این پایداری به کاهش فرسایش و حفظ خاک کمک می‌کند (Zheng et al., 2023). علاوه‌براین، بازسازی طبیعی مناطق جنگلی با استفاده از پوشش گیاهی می‌تواند با کمک به بهبود دانه‌بندی خاک، توانایی آن را در مقاومت در برابر فرسایش بهبود دهد (Dou et al., 2020).

در دهه‌های اخیر، تخریب و خشکیدگی جنگل‌های بلوط زاگرس که ناشی از عواملی مانند تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی‌های مکرر، افزایش دما، کاهش بارندگی (Attarod et al., 2016)، چرای دام (Hidari et al., 2014; Noorzad et al., 2020) و برداشت چوب (Moqaddam et al., 2014) است، به مشکلی جدی تبدیل شده است. از آنجاکه مدیریت پایدار این جنگل‌ها بر مبنای نقش پوشش گیاهی در موقعیت‌های مختلف فیزیوگرافی، نقشی اساسی در کاهش فرسایش و بهبود شرایط خاک دارد، بنابراین بررسی تغییرات ویژگی‌های مختلف خاک به‌خصوص پایداری خاکدانه‌ها به‌عنوان ویژگی فیزیکی پایه خاک در موقعیت‌های مختلف توپوگرافی و در رابطه با تغییرات پوشش اشکوب فوقانی می‌تواند راهنمای علمی ارزشمندی برای مدیریت متناسب و چشم‌اندازهای مختلف باشد. پژوهش پیش‌رو با هدف تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیوگرافی، ازجمله ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش درختان بر پایداری خاکدانه‌ها در جنگل‌های زاگرس انجام شد. این پژوهش به‌دلیل کمبود مطالعات جامع و هم‌زمان درباره تأثیرات متقابل این عوامل بر ویژگی‌های خاک در بوم‌سازگان‌های خاصی مانند زاگرس اهمیت دارد. چراکه تعاملات پیچیده بین این عوامل و نحوه تأثیر آن‌ها بر مؤلفه‌های خاک مانند رطوبت، ماده آلی و پایداری خاکدانه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته

به گونه‌ای که در یک طبقه ارتفاعی و در یک جهت دامنه، هم‌زمان می‌توان توده‌هایی با تاج‌پوشش‌های تنک (۱۰ تا ۲۵ درصد) و نیمه‌انبوه (بیشتر از ۲۵ درصد) مشاهده کرد.

دهه‌های اخیر، تخریب و خشکیدگی جنگل‌های بلوط در استان ایلام، به‌ویژه در منطقه مورد مطالعه، به مشکلی جدی تبدیل شده است. این عوامل به ایجاد ناهمگنی در توده‌ها و تغییرات در تاج‌پوشش جنگل‌های منطقه منجر شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Location of the study area

روش پژوهش

نمونه‌برداری

مدنظر قرار گرفت. به‌منظور جمع‌آوری داده‌های میدانی و نمونه‌برداری خاک در محدوده‌های مورد مطالعه، ابتدا با کمک دستگاه GPS، نقطه‌ای به‌عنوان مرکز هر قطعه‌نمونه مشخص شد. سپس، از قطعه‌نمونه‌های دایره‌ای شکل با شعاع ۱۲/۵ متر نمونه‌برداری شد (مساحت ۵۰۰ متر مربع). نمونه‌های خاک در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری برداشت شدند (Koosha *et al.*, 2022; Fani *et al.*, 2024). این عمق به‌دلیل تمرکز مواد آلی و فعالیت‌های زیستی (Zhu *et al.*, 2019)، حساسیت زیاد به تغییرات محیطی (Bojko & Kabała, 2016) و تعامل زیاد بین گیاه و خاک (Ali *et al.*, 2019) انتخابی استاندارد و علمی برای نمونه‌برداری خاک است و به‌صورت ترکیبی از چهار نقطه در هر قطعه‌نمونه (به‌صورت تصادفی دو نقطه زیر تاج و دو نقطه خارج از تاج) برداشت و سپس با یکدیگر ترکیب شدند. در هر دامنه، ۳۰ نمونه خاک جمع‌آوری شد (مجموع ۶۰ نمونه خاک) و به آزمایشگاه منتقل شدند.

آزمایشگاه خاک

منطقه مورد نظر به گونه‌ای انتخاب شد که امکان بررسی ویژگی‌های موردنظر در دو جهت دامنه‌های شمالی و جنوبی و در سه طبقه ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۱۸۵۰ متر (پایین‌بند)، ۱۸۵۰ تا ۱۹۵۰ متر (میان‌بند) و ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ متر از سطح دریا (بالابند) فراهم شود (Cheraghi *et al.*, 2018). در این منطقه جنگلی کوهستانی، ۶۰ توده با استفاده از تصاویر گوگل ارث و کنترل میدانی شناسایی شدند. دامنه توزیع تاج‌پوشش در منطقه، بین دو طبقه با تاج‌پوشش کمتر از ۲۵ درصد (توده تنک- با انبوهی کم) و بیشتر از ۲۵ درصد (توده نیمه‌انبوه) متغیر بود، بنابراین ۳۰ توده با تاج‌پوشش کمتر از ۲۵ درصد به‌عنوان توده تنک و ۳۰ توده با تاج‌پوشش بیشتر از ۲۵ درصد به‌عنوان توده نیمه‌انبوه انتخاب شدند. در هر دامنه (شمالی و جنوبی)، ۱۵ توده تنک و ۱۵ توده با تاج نیمه‌انبوه تعیین شد. به‌نحوی که در طول گرادیان ارتفاعی در هر طبقه ارتفاعی (سه طبقه)، پنج توده تنک و پنج توده با تاج نیمه‌انبوه

در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه ایلام، پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک دو میلی‌متری، ماده آلی با استفاده از روش والکی - بلاک (Jafari Haghighi, 2003)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Jafari Haghighi, 2003)،

رطوبت خاک به روش وزنی (Perrier & Salkini, 1991) و پایداری خاکدانه با استفاده از الک خشک و محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه با استفاده از رابطه (۱) (Alizadeh, 2009) اندازه‌گیری شدند.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{MDW} = (W1 * 0.026) + (W2 * 0.079) + (W3 * 0.178) + (W4 * 0.375) + (W5 * 0.75) + (W6 * 1.5) + (W7 * 3)$$

که در آن، W درصد وزن خاک باقی‌مانده روی هر الک و MDW میانگین وزنی قطر خاکدانه است که بین صفر تا یک متغیر است. هرچه MDW به یک نزدیک‌تر باشد، پایداری خاک بیشتر و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، پایداری خاک کمتر است.

واریانس سه طرفه (Three-way ANOVA) در قالب مدل‌های خطی عمومی (GLM) استفاده شد. همه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳،۰ (SPSS Inc.)، شیکاگو، IL) و بررسی همبستگی در نرم‌افزار R (پکیج ggplot2، Ggally) انجام شد.

### نتایج

#### بافت خاک

نتایج بررسی بافت خاک نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای بافت رسی، رسی-لومی و لومی است و از یکنواختی نسبی در ترکیب بافتی برخوردار است (جدول ۱).

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای ارزیابی همگنی و نرمال بودن داده‌ها، به ترتیب از آزمون‌های لون و کولموگروف-سمیرنوف استفاده شد. به منظور بررسی اثرات جهت دامن (شمال و جنوب) و تراکم تاج پوشش (تاج نیمه‌انبوه و انبوهی کم)، ارتفاع از سطح دریا و اثر متقابل آن‌ها بر هریک از ویژگی‌های خاک از تجزیه

جدول ۱- بافت خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Texture of the studied soils

| Canopy     | Aspect | Elevation | Texture class | Clay (%) | Sand (%) | Silt (%) |
|------------|--------|-----------|---------------|----------|----------|----------|
| Sparse     | South  | L         | Clay loam     | 34.7     | 21.9     | 43.4     |
|            |        | M         | Clay          | 40.4     | 20.6     | 39       |
|            |        | H         | Loam          | 24.4     | 43       | 32.6     |
|            | North  | L         | Clay loam     | 30.3     | 30.7     | 39       |
|            |        | M         | Loam          | 26.8     | 34.6     | 38.6     |
|            |        | H         | Loam          | 24.8     | 38.2     | 37       |
| Semi-dense | South  | L         | Clay loam     | 39.6     | 26.7     | 33.7     |
|            |        | M         | Clay loam     | 36.8     | 29.9     | 33.3     |
|            |        | H         | Clay loam     | 30.8     | 31.1     | 38.1     |
|            | North  | L         | Clay loam     | 31.6     | 37.3     | 31.1     |
|            |        | M         | Loam          | 24.8     | 41.5     | 33.7     |
|            |        | H         | Clay loam     | 34       | 33.5     | 32.5     |

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان داد که جهت دامن و تراکم تاج پوشش به طور معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر

خاکدانه، ماده آلی و رطوبت خاک تأثیرگذار هستند (P-value < 0.001). ارتفاع از سطح دریا فقط بر رطوبت خاک

وزنی قطر خاکدانه و رطوبت خاک معنی‌دار بود. در نهایت، اثرات متقابل سه‌گانه ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش فقط بر میانگین وزنی قطر خاکدانه تأثیر معنی‌داری داشتند ( $P\text{-value} < 0.001$ ).

تأثیر معنی‌داری داشت ( $P\text{-value} = 0.033$ ). همچنین، اثرات متقابل جهت دامنه و تاج‌پوشش بر همه ویژگی‌ها معنی‌دار بودند، درحالی‌که اثر متقابل جهت دامنه و ارتفاع فقط بر میانگین وزنی قطر خاکدانه ( $P\text{-value} = 0.008$ ) معنی‌دار به‌دست آمد. تأثیر متقابل تاج‌پوشش و ارتفاع نیز بر میانگین

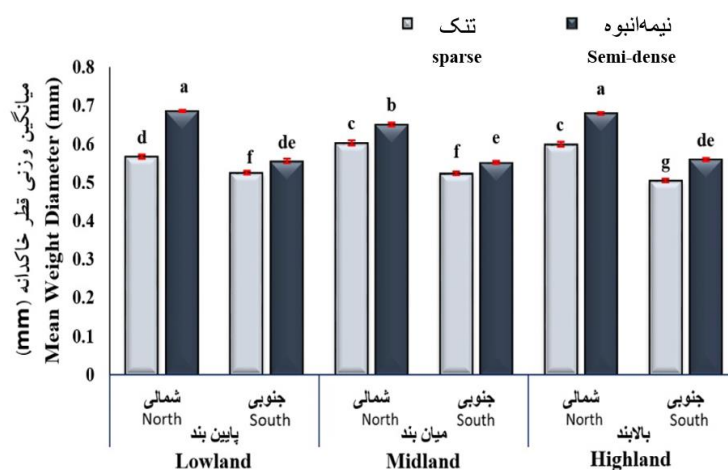
جدول ۲- نتایج مدل‌های خطی عمومی (GLM) برای آزمون اثرات جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا و تراکم تاج‌پوشش بر ویژگی‌های خاک

Table 2. Results of General Linear Models (GLM) for testing the effects of slope aspect, elevation, and canopy density on soil properties

| Soil properties             | Mean Weight Diameter (mm) |          |         |         | Organic Matter (%) |         |         | Soil Moisture (%) |         |         |
|-----------------------------|---------------------------|----------|---------|---------|--------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
|                             | df                        | MS       | F-value | P-value | MS                 | F-value | P-value | MS                | F-value | P-value |
| Aspect                      | 1                         | 0.133    | 1152.36 | 0.000   | 5.221              | 68.583  | 0.000   | 198.48            | 199.25  | 0.000   |
| Canopy                      | 1                         | 0.053    | 461.022 | 0.000   | 9.552              | 125.464 | 0.000   | 227.87            | 228.76  | 0.000   |
| Elevation                   | 2                         | 6.500E-5 | 0.561   | 0.574   | 0.189              | 2.485   | 0.094   | 3.645             | 3.659   | 0.033   |
| Aspect × Canopy             | 1                         | 0.007    | 64.59   | 0.000   | 1.627              | 21.369  | 0.000   | 97.971            | 98.351  | 0.000   |
| Aspect × Elevation          | 2                         | 0.001    | 5.367   | 0.008   | 0.056              | 0.734   | 0.485   | 2.604             | 2.614   | 0.084   |
| Canopy × Elevation          | 2                         | 0.002    | 15.727  | 0.000   | 0.039              | 0.516   | 0.600   | 3.419             | 3.432   | 0.040   |
| Aspect × Canopy × Elevation | 2                         | 0.002    | 15.295  | 0.000   | 0.018              | 0.234   | 0.792   | 0.249             | 0.25    | 0.780   |

از جهت جنوبی است. در هر دو جهت جنوبی و شمالی، از نظر میانگین وزنی قطر خاکدانه، بین تاج تنک و نیمه‌انبوه اختلاف معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) مشاهده شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه در هر سه کلاسه ارتفاعی در جهت شمالی و جنوبی در تاج نیمه‌انبوه بیشتر از تاج تنک بود (شکل ۲).

نتایج مقایسه میانگین وزنی قطر خاکدانه نشان داد که بیشترین میزان این متغیر ( $۰/۶۹$  میلی‌متر) در دامنه شمالی و تاج نیمه‌انبوه و کمترین آن ( $۰/۵۱$  میلی‌متر) در دامنه جنوبی تنک مشاهده شد. بیشینه قطر خاکدانه در هر سه کلاسه ارتفاعی مربوط به جهت شمالی بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر



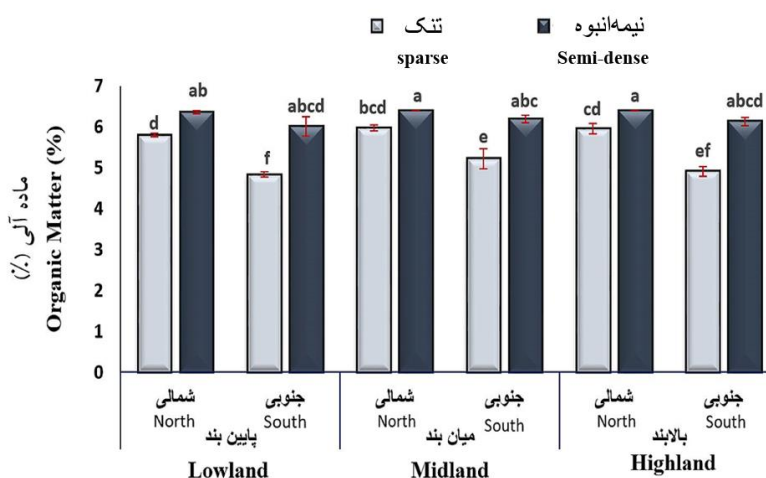
شکل ۲- مقایسه میانگین ( $\pm$  اشتباه معیار) میزان میانگین وزنی قطر خاکدانه در طبقه‌های مختلف ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه (شمالی و جنوبی) در دو طبقه تاج‌پوشش اشکوب فوقانی (تنک و نیمه‌انبوه) حرف‌های متفاوت لاتین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.



**Figure 2. Mean comparison ( $\pm$  standard error) of mean weighted diameter of soil in different elevation classes, aspects (north and south), and two canopy cover types (sparse and semi-dense)**  
Letters that differ indicate a significant difference between means ( $P < 0.05$ ).

پوشش تاج نیمه‌انبوه به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از تاج تنک بود. بیشترین مقدار ماده آلی در میان‌بند جهت شمالی با تاج‌پوشش انبوه (۶/۳۹ درصد) و کمترین مقدار آن (۴/۸۴ درصد) در پایین‌بند جهت جنوبی با تاج‌پوشش تنک به‌دست آمد (شکل ۳).

نتایج مقایسه میزان ماده آلی خاک نشان داد که بیشترین ماده آلی در هر سه کلاسه ارتفاعی به‌طور معنی‌داری در جهت شمالی، بیشتر از جهت جنوبی بود. علاوه‌براین، در هر دو جهت جنوبی و شمالی، اختلاف معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) بین پوشش تاج تنک و نیمه‌انبوه مشاهده شد. همچنین، در هر سه کلاسه ارتفاعی، مقدار ماده آلی در جهت شمالی و جنوبی در



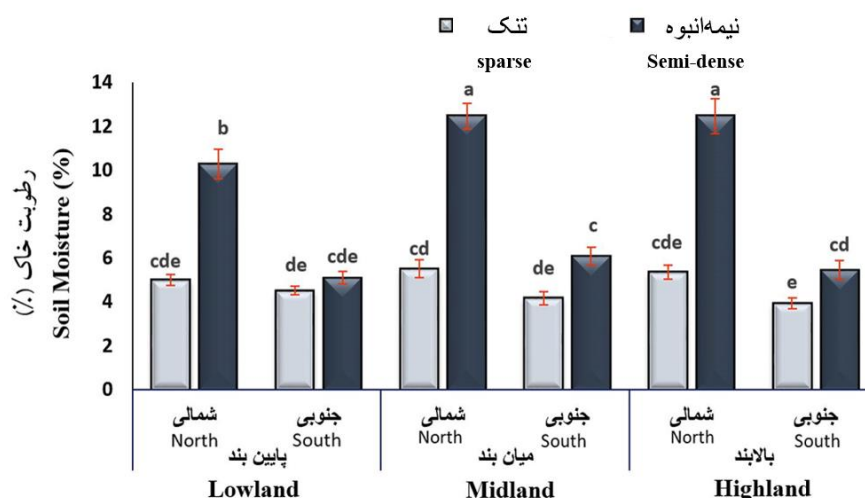
**شکل ۳- مقایسه میانگین ( $\pm$  اشتباه معیار) میزان ماده آلی خاک در طبقه‌های مختلف ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه (شمالی و جنوبی) در دو طبقه تاج‌پوشش اشکوب فوقانی (تنک و نیمه‌انبوه)**

حرف‌های متفاوت لاتین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.

**Figure 3. Mean comparison ( $\pm$  standard error) of soil organic matter in different elevation classes, aspects (north and south), and two canopy cover types (sparse and semi-dense)**  
Letters that differ indicate a significant difference between means ( $P < 0.05$ ).

و شمالی، اختلاف معنی‌داری بین پوشش تاج تنک و نیمه‌انبوه مشاهده شد. بیشترین مقدار رطوبت خاک در بالابند و میان‌بند در جهت شمالی با تاج‌پوشش نیمه‌انبوه (۱۲/۴۶ درصد) و کمترین مقدار آن (۳/۹۲ درصد) در بالابند جهت جنوبی با تاج‌پوشش تنک به‌دست آمد (شکل ۴).

نتایج مقایسه میانگین رطوبت خاک نشان داد که در هر سه کلاسه ارتفاع از سطح دریا، مقدار رطوبت در جهت شمالی و جنوبی در پوشش تاج نیمه‌انبوه به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از تاج تنک بود. همچنین، بیشترین مقدار رطوبت در هر سه کلاسه ارتفاعی به‌طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) در جهت شمالی بیشتر از جهت جنوبی بود. علاوه‌براین، در هر دو جهت جنوبی



شکل ۴- مقایسه میانگین ( $\pm$  اشتباه معیار) میزان رطوبت خاک در طبقه‌های مختلف ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه (شمالی و جنوبی) در دو طبقه تاج پوشش اشکوب فوقانی (تنگ و نیمه‌انبوه)

حرف‌های متفاوت لاتین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.

**Figure 4.** Mean comparison ( $\pm$  standard error) of soil moisture in different elevation classes, aspects (north and south), and two canopy cover types (sparse and semi-dense)  
Letters that differ indicate a significant difference between means ( $P < 0.05$ ).

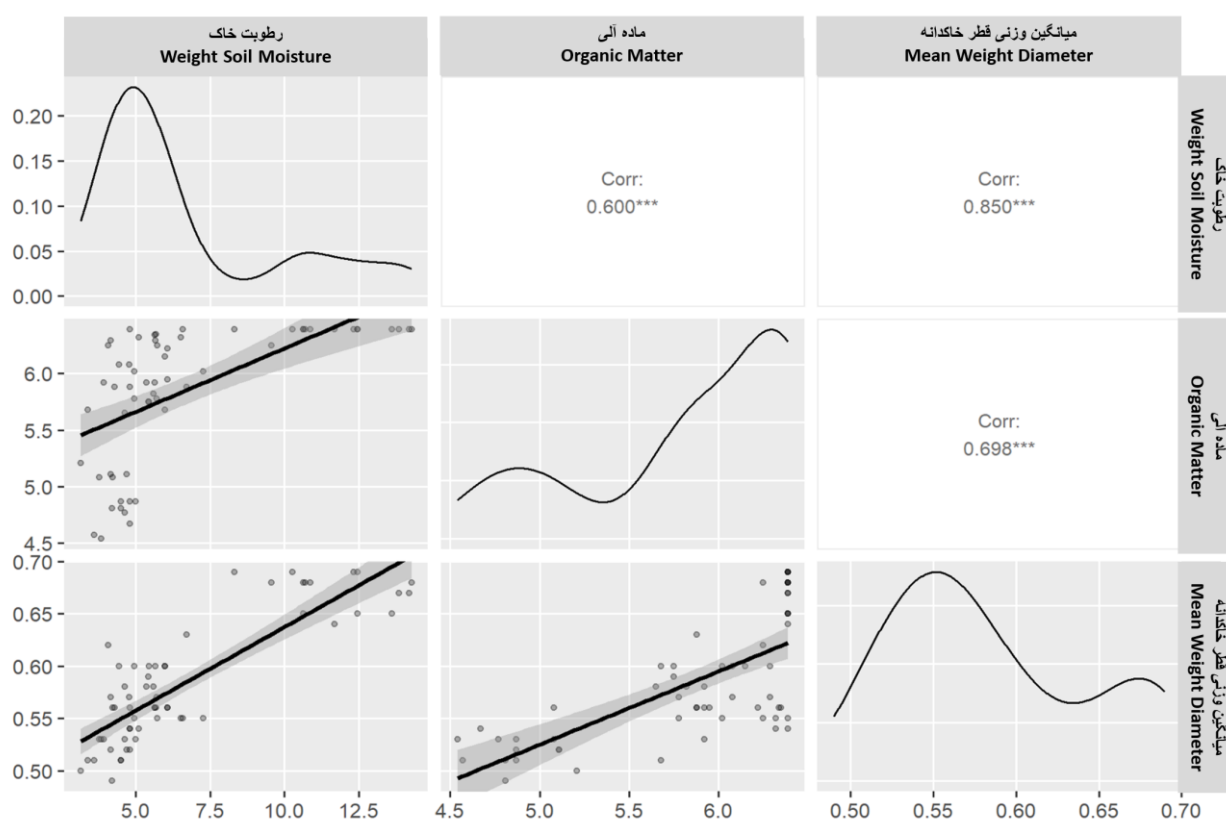
کیفیت خاکدانه به‌ویژه در مورد میانگین قطر خاکدانه کمک می‌کند. نمودارهای شکل ۵، روابط مثبت و معنی‌دار بین سه متغیر را نشان می‌دهند و نتایج حاکی از اهمیت مدیریت رطوبت خاک و ماده آلی در بهبود پایداری خاک است.

### بحث

به‌طورکلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بین صفر تا یک متغیر است. هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، پایداری خاک بیشتر و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، پایداری خاک کمتر است. باتوجه‌به اینکه مقدار این شاخص در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۵۲ تا ۰/۶۹ میلی‌متر به‌دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که خاک این منطقه جنگلی از پایداری به‌نسبت زیادی برخوردار است (شکل ۲).

همبستگی بین میانگین قطر خاکدانه با رطوبت خاک و ماده آلی

همبستگی بین میانگین قطر خاکدانه با رطوبت خاک و میانگین قطر خاکدانه با ماده آلی در شکل ۵ ارائه شده است. همبستگی بین رطوبت خاک و ماده آلی برابر با ۰/۶ و معنی‌دار به‌دست آمد. همچنین، همبستگی بین رطوبت خاک و میانگین قطر خاکدانه به ۰/۸۵ رسید که نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی و مثبت است ( $p < 0.001$ ). به‌علاوه، همبستگی بین ماده آلی و میانگین قطر خاکدانه ۰/۶۹۸ و معنی‌دار است ( $p < 0.001$ ). این نتایج بیانگر آن است که با افزایش رطوبت خاک، مقدار ماده آلی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، رطوبت بیشتر خاک به‌طور معنی‌داری با افزایش میانگین قطر خاکدانه همراه است. افزایش ماده آلی نیز به بهبود



شکل ۵- ارتباط بین سه متغیر رطوبت خاک، ماده آلی و میانگین قطر خاکدانه

Figure 6. The relationship between three variables: Soil moisture, organic matter, and mean weighted diameter of soil aggregates

گیاهی می‌تواند به تثبیت خاک و کاهش فرسایش کمک کند (Zhang *et al.*, 2018). نتایج پژوهش پیش‌رو با یافته‌های گزارش‌شده توسط Aazami و همکاران (۲۰۱۸) در جنگل‌های مله‌سیاه (ایلام) مبنی بر اینکه جهت دامنه، تأثیر معنی‌داری بر رطوبت خاک دارد و ذخیره رطوبتی در دامنه شمالی بیشتر از دامنه‌های دیگر است، همخوانی دارد. براساس پژوهش Haidari و همکاران (۲۰۲۴) میزان رطوبت خاک در جنگل‌های مریوان استان کردستان در دامنه شمالی بیشتر از دامنه جنوبی بود. در بررسی اثر جهت دامنه بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک جنگلی در شهرستان بانه گزارش شد که دامنه‌های شمالی به دلیل ویژگی‌های محیطی مانند رطوبت و درجه حرارت خاک، پوشش گیاهی متراکم‌تر و در نتیجه، خاک بهتری نیز دارند (Sadeghi *et al.*, 2017). همچنین، براساس پژوهش Kertész (۲۰۱۲) در جنگل‌های

جهت دامنه و پایداری خاکدانه‌ها

این بررسی نشان داد که دامنه‌های شمالی، پایداری خاک‌دانه‌ها و رطوبت خاک بیشتری نسبت به دامنه‌های جنوبی دارند. به‌طور کلی، دامنه‌های جنوبی در نیم‌کره شمالی، مدت بیشتری از طول روز را در معرض تابش خورشید هستند. به همین دلیل به‌طور معمول دما و تبخیر بیشتری دارند (McCune & Grace, 2002). در مقابل، دامنه‌های شمالی، دمای کمتر و رطوبت بیشتری دارند که به افزایش پوشش گیاهی و مواد آلی و غنی‌تر شدن خاک منجر می‌شود (Pimentel & Pimentel, 2008). پایداری خاک نیز تحت تأثیر عواملی مانند رطوبت، پوشش گیاهی و جهت دامنه است. دامنه‌های جنوبی به دلیل خشکی بیشتر، پوشش تنک و در نتیجه، کاهش مواد آلی موجود در خاک، به‌طور معمول فرسایش بیشتری نسبت به جهت شمالی دارند، اما پوشش

مجارستان، دامنه‌های شمالی به دلیل قرارگیری در معرض تابش کمتر خورشید و حفظ رطوبت بیشتر، خاک پایداری دارند و کمتر دچار فرسایش می‌شوند. Beheshti و همکاران (۲۰۱۲) در مناطق کوهستانی شمال ایران تأیید کردند که جهت دامنه، تأثیر مستقیمی بر توزیع رطوبت و پایداری خاک دارد. همچنین، نتایج پژوهشی در کشور نیجریه نشان داد که دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت کمتر نور خورشید و رطوبت بیشتر، خاکدانه‌های پایداری دارند، درحالی‌که دامنه‌های جنوبی به دلیل خشک‌تر بودن، با کاهش پایداری خاکدانه‌ها روبه‌رو هستند (Ogban, 2021). درمجموع، نتایج پژوهش پیش‌رو و پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهند که جهت دامنه، تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های خاک دارد و پایداری خاک در دامنه‌های شمالی با حفظ رطوبت بیشتر و دمای کمتر نسبت به دامنه‌های جنوبی، بیشتر است.

#### تأثیر تراکم تاج‌پوشش بر ویژگی‌های خاک

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که پایداری خاکدانه، میزان ماده آلی و رطوبت خاک در جنگل‌های با تاج‌پوشش نیمه‌انبوه، بیشتر از توده‌های با تاج‌پوشش تنک است. تاج‌پوشش به‌عنوان لایه‌ای از برگ‌ها و شاخه‌های درختان، نور خورشید را جذب می‌کند و بر فرایندهایی مانند تبخیر و تعرق و نیز گردش عناصر غذایی در خاک تأثیر می‌گذارد. تراکم بیشتر تاج‌پوشش می‌تواند به کاهش میزان نور ورودی به سطح خاک منجر شود و باعث حفظ رطوبت بیشتر در خاک شود (Nunes et al., 2019). همچنین، تراکم زیاد تاج‌پوشش باعث می‌شود که برگ‌ها و شاخه‌ها، انرژی قطرات باران را پیش از رسیدن به سطح زمین جذب کنند که این مسئله، مانع از فرسایش سریع خاک می‌شود (Lal, 2015). در مناطق جنگلی با تراکم زیاد، مقدار بیشتری از برگ‌ریزان و مواد آلی به سطح خاک افزوده می‌شود که این مواد به تدریج تجزیه می‌شوند و افزایش مواد آلی خاک را در پی دارند (Rahman et al., 2013). ماده آلی با افزایش نفوذپذیری خاک و بهبود ساختار آن، به کاهش فرسایش خاک کمک می‌کند. در مقابل، در مناطق با تاج‌پوشش تنک که خاک بیشتر در معرض

#### اثر ارتفاع از سطح دریا بر ویژگی‌های خاک

این پژوهش نشان داد که ارتفاع از سطح دریا بر رطوبت خاک تأثیرگذار است، اما به‌طور معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها اثر ندارد. این یافته‌ها با نتایج Dou و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد که تأثیر ارتفاع بر پایداری خاک در فلات لوئس چین پیچیده است و به شرایط خاص منطقه بستگی دارد. Karamian و Hosseini (۲۰۱۶) بیان کردند که تأثیر ارتفاع بر ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در

جنگل‌های زاگرس پیچیده است و به شرایط محلی مانند توپوگرافی و پوشش گیاهی بستگی دارد. به‌طورکلی، ارتفاعات بالاتر به دلیل دمای کمتر و بارندگی بیشتر ممکن است رطوبت بیشتری داشته باشند، اما تأثیر آن بر پایداری خاک به شرایط محلی مانند توپوگرافی و پوشش گیاهی نیز وابسته است. Guo و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که در ارتفاعات بالاتر، به دلیل شیب تند و بارش‌های ناگهانی، حساسیت به فرسایش افزایش می‌یابد. همچنین، Kou و همکاران (۲۰۲۵) دریافتند که در ارتفاعات پایین‌تر به دلیل پوشش گیاهی متراکم‌تر، پایداری خاک بیشتر است، درحالی‌که در ارتفاعات بالاتر به دلیل پوشش گیاهی کم‌تراکم و کاهش مواد آلی، فرسایش افزایش می‌یابد. این تفاوت‌ها، اهمیت شرایط محلی را در بررسی تأثیر ارتفاع بر پایداری خاک نشان می‌دهد.

در جهت جنوبی و در مناطق با تاج نیمه‌انبوه، تغییرات ارتفاع، عامل مهمی در پویایی خاک نیست و تأثیری بر پایداری خاکدانه ندارد، اما اثرات متقابل ارتفاع و جهت در مناطق با تاج تنک بر پویایی خاک و پایداری خاکدانه مؤثر است. در مناطق با تاج پوشش نیمه‌انبوه، به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم، تغییرات ارتفاع به‌طور معمول تأثیر کمتری بر ویژگی‌های خاک دارند. تاج‌پوشش در این مناطق می‌تواند مانع از تغییرات شدید در دما و رطوبت خاک شود. از این رو، پایداری خاکدانه‌ها بیشتر حفظ می‌شود. این وضعیت به دلیل وجود ریشه‌ها و مواد آلی است که در خاک تجمع می‌یابند و باعث بهبود ساختار خاک و جلوگیری از فرسایش می‌شوند. به‌علاوه، پوشش گیاهی باعث می‌شود که رطوبت خاک به‌طور یکنواخت توزیع شود و در نتیجه، تغییرات فیزیکی خاک به حداقل برسد (Li et al., 2016)، بنابراین در مناطق با تاج‌پوشش نیمه‌انبوه، ارتفاع به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم، تأثیر کمتری بر پویایی خاک و پایداری خاکدانه‌ها دارد، اما در مناطق با تاج‌پوشش تنک، تغییرات ارتفاع و جهت بر این ویژگی‌ها تأثیرگذار هستند و می‌توانند پویایی خاک و پایداری خاکدانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهند.

ارتباط بین ماده آلی، رطوبت و پایداری خاکدانه پژوهش پیش‌رو نشان داد که رطوبت خاک و ماده آلی، ارتباط مثبتی با پایداری خاک‌دانه‌ها دارند. این نتایج هم‌راستا با یافته‌های Zheng و همکاران (۲۰۲۳) در جنگل‌های جنوب غرب چین است که گزارش کردند درختان پهن‌برگ با تولید مواد آلی بیشتر و بهبود ساختار خاک، به افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش فرسایش کمک می‌کنند. به‌علاوه، Mirzashahi و Rouhipour (۲۰۰۵) نشان دادند که افزایش ماده آلی در استان خوزستان باعث افزایش پایداری خاکدانه می‌شود. بررسی پایداری خاکدانه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف در مناطق نیمه‌خشک استان زنجان نشان داد که پایداری خاکدانه، رابطه مثبتی با مقدار ماده آلی دارد (Ybat et al., 2016). همچنین، ارزیابی تأثیر ماده آلی بر ساختار و پایداری خاکدانه نشان داد که افزایش ماده آلی موجب بهبود ساختار خاک و افزایش پایداری آن می‌شود (Six et al., 2002). بررسی ارتباط بین ماده آلی، رطوبت و پایداری خاک در مناطق کشاورزی نشان داد که افزایش هم‌زمان ماده آلی و رطوبت خاک به پایداری بیشتر و کاهش فرسایش کمک می‌کند (Tejada & Gonzalez, 2007). همچنین، تأثیر مواد آلی بر پایداری خاک و میزان رطوبت در شرایط تغییرات اقلیمی نشان داد که افزایش محتوای مواد آلی می‌تواند به بهبود پایداری خاک و افزایش توانایی آن در نگهداری رطوبت کمک کند (Lal, 2020).

در این پژوهش، تأثیر ویژگی‌های فیزیوگرافی و تراکم تاج‌پوشش اشکوب فوقانی بر ویژگی‌های مختلف شامل پایداری خاکدانه و ماده آلی بررسی شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، جهت و تراکم، تأثیر بیشتری بر ویژگی‌های خاک از جمله پایداری خاکدانه دارند. همچنین، اثر تراکم تاج بر پایداری خاکدانه وابسته به جهت جغرافیایی است. به همین دلیل، در بررسی پایداری خاکدانه، توجه به جهت جغرافیایی و تغییرات ارتفاع از سطح دریا در کنار تغییرات تاج‌پوشش، اهمیت زیادی دارد. جهت دامنه، تراکم تاج‌پوشش و ماده آلی از عوامل کلیدی در پایداری خاکدانه هستند. مدیریت پوشش گیاهی و حفظ جنگل‌های با تاج‌پوشش نیمه‌انبوه، برای کاهش

که اثرات فیزیوگرافی بر ویژگی‌های خاک، پیچیدگی‌های خاصی دارند که پیش از این در پژوهش‌های دیگر به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته بود.

فرسایش خاک و حفظ کیفیت آن ضروری است. این یافته‌ها به مدیران منابع طبیعی کمک می‌کند تا راهبردهای حفاظتی متناسب با ویژگی‌های فیزیوگرافی مختلف برای حفاظت از خاک و جلوگیری از فرسایش طراحی کنند. به‌ویژه در مناطقی

## References

- Aazami, A., Hosseini, A. and Hoseinzadeh, J., 2018. The effect of depth and aspect on soil moisture in dieback affected oak forests (Case study: Meleh Siah Forest, Ilam Province). *Ecology of Iranian Forest*, 6(11): 41-50 (In Persian with English summary).
- Ali, S., Hussain, I., Hussain, S., Hussain, A., Ali, H. and Ali, M., 2019. Effect of altitude on forest soil properties at Northern Karakoram. *Eurasian Soil Science*, 52: 1159-1169.
- Alizadeh, A., 2009. *Soil Physics*. Published by Imam Reza International University, Mashhad, Iran, 568p (In Persian).
- Allahinezhad, E., Heydari, M., Mirzaei, J., Fathizadeh, O. and Attarod, P., 2024. Estimation of canopy and trunk ecohydrological parameters of coniferous and broadleaf trees in Zagros forests (Case study: Choqasabz Forest Park, Ilam). *Iranian Journal of Forest*, 15(4): 429-444 (In Persian with English summary).
- Anonymous, 2010. Data of meteorology station of Ilam. National Meteorology Organization, Ilam, Iran, 51p (In Persian).
- Asadian, M., Hojjati, S.M., Mohammadzadeh, M. and Nadi, M., 2023. Evaluating the response of ecosystems to land-use change using soil quality index-Alandan forest Sari. *Iranian Journal of Forest*, 15(1): 17-34 (In Persian with English summary).
- Attarod, P., Sadighi, S.M.M., Taheri Sarteshnizi, F., Saroyi, S., Abbasian, P., Masihpoor, M., Kordrostami, F. and Dirikvandi, A., 2016. Meteorological parameters and evapotranspiration affecting the Zagros forests decline in Lorestan province. *Iranian Journal of Forest and Rangeland Protection Research*, 13(2): 97-112 (In Persian with English summary).
- Azizi, Y., Akhavan, R., Kia-Daliri, H. and Soleimani, R., 2021. Evaluation of soil erodibility using FAO fuzzy model in closed and unclosed forest zones in Dinarkouh of Iran. *Eurasian Soil Science*, 54: 304-315.
- Bayat, H., Vaezi, A.R. and Rahmati, S., 2016. Relationship between aggregate stability and some soil properties in semi-arid region soils. *Abstracts of the 3<sup>th</sup> National Conference on New Findings in Environment and Agricultural Ecosystems*. Tehran, Iran, 23 Sep. 2016: 7p (In Persian with English summary).
- Beheshti, A., Raiesi, F. and Golchin, A., 2012. Soil properties, C fractions and their dynamics in land use conversion from native forests to croplands in northern Iran. *Agricultural Ecosystems and Environment*, 148: 121-133.
- Bojko, O. and Kabała, C., 2016. Transformation of physicochemical soil properties along a mountain slope due to land management and climate changes- A case study from the Karkonosze Mountains, SW Poland. *Catena*, 140: 43-54.
- Cheraghi, J., Heydari, M., Mirab-balou, M. and Omidipour, R., 2018. Efficiency of numerical and parametrical indices to evaluate biodiversity of soil and litter arthropods mesofauna in different physiographic positions in Zagros oak forests. *Journal of Forest Research and Development*, 3(4): 377-394 (In Persian with English summary).
- Don, A., Schumacher, J. and Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4): 1658-1670.
- Dou, Y., Yang, Y., An, S. and Zhu, Z., 2020. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena*, 185: 104294.
- Etehad Abari, M., Majnounian, B., Malekian, A. and Jourgholami, M., 2018. Runoff and sediment variations due to change in some soil properties following forest harvesting (Case study: Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest*, 10(3): 267-278 (In Persian with English summary).
- Fabre, S., Briottet, X. and Lesaignoux, A., 2015. Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5  $\mu\text{m}$  domain. *Sensors*, 15(2): 3262-3281.
- Fani, B., Banj Shafiei, A., Porhashmi, M. and Heydari, M., 2024. Changes of some soil components under the influence of thinning intensity in Marivan forests. *Forest Research and Development*, 10(2): 183-203 (In Persian with English summary).
- Fathizadeh, O., Hosseini, S.M., Zimmermann, A.,

- Keim, R.F. and Boloorani, A.D., 2017. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Science of the Total Environment*, 601: 1824-1837.
- Ghasemi Arian, A. and Dashti, M., 2024. Effects of soil and topography variables on canopy cover of *Dorema ammoniacum* D.Don. in Soltan Mohammad Rangeland, Sabzevar, Iran. *Journal of Rangeland Science*, 14(3): 142418.
  - Gong, C., Tan, Q., Liu, G. and Xu, M., 2022. Impacts of mixed forests on controlling soil erosion in China. *Catena*, 213: 106147.
  - Guo, M., Chen, Z., Wang, W., Wang, T., Wang, W. and Cui, Z., 2021. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 772: 145540.
  - Haidari, M., Matinizadeh, M., Pourhashemi, M., Nouri, E. and Bagheri Delijani, N., 2024. Investigating changes in the physical and chemical characteristics of soil in control and dieback stands in Marivan county, Kurdistan province in Iran. *Forest Research and Development*, 10(1): 95-111 (In Persian with English summary).
  - Heidarlou, H.B., Shafiei, A.B., Erfanian, M., Tayyebi, A. and Alijanpour, A., 2019. Effects of preservation policy on land use changes in Iranian Northern Zagros forests. *Land Use Policy*, 81: 76-90.
  - Heydari, M., Cheraghi, J., Omidipour, R., Rostaminia, M., Kooch, Y., Valkó, O. and Carcaillet, C., 2023. Tree dieback, woody plant diversity, and ecosystem driven by topography in semi-arid mountain forests: Implication for ecosystem management. *Journal of Environmental Management*, 339: 117892.
  - Hidari, M., Heidari, R.H., Hosseini, S.A. and Fallahi, A., 2014. Study of grazing ratio on the tree diversity in the Medium Zagros Forest (case study: Kermanshah Province). *Proceedings of the Second National Seminar on Biological Diversity and Its Impact on Agriculture and the Environment*. Urmia, Iran, 12 May 2014: 1192-1198 (In Persian with English summary).
  - Jafari Haghighi, M., 2003. *Methods of Soil Analysis: Sampling and Important Physical & Chemical Analysis*. Nedaye Zoha Press, Sari, Iran, 236p (In Persian).
  - Jafari, M. and Tavili, A., 2008. *Revitalization of Arid and Desert Regions*, Second Edition. University of Tehran Press, Tehran, Iran, 396 (In Persian).
  - Jobbágy, E.G. and Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2): 423-436.
  - Karamian, M. and Hosseini, V., 2014. Effect of altitude, slope and canopy on absorbable phosphorus, carbon and total nitrogen in forest soils (Case study: The forest of Ilam province, Dalab). *Journal of Forest Sustainable Development*, 1(1): 57-71 (In Persian with English summary).
  - Karamian, M. and Hosseini, V., 2016. Effect of trees canopy and topography on some chemical properties of forest soil (Case study: The forest of Ilam province, Dalab). *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 7(1): 81-97 (In Persian).
  - Karamian, M., Mirzaei, J., Heydari, M., Kooch, Y. and Labelle, E.R., 2023. Seasonal effects of native and non-native woody species on soil chemical and biological properties in semi-arid forests, western Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(3): 4474-4490.
  - Kertész, Á., 2012. The forests of Lake Balaton catchment and their role in soil conservation: 209-217. In: Krecek, J., Haigh, M.J., Hofer, T. and Kubin, E. (Eds.). *Management of Mountain Watersheds*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 269p.
  - Koosha, N., Mohammadi-Samani, K. and Hosseini, V., 2022. Carbon stock and some chemical properties of soil in sacred groves and pollarded forest stands of Northern Zagros forests. *Journal of Water and Soil*, 36(5): 579-591 (In Persian with English abstract).
  - Kou, X., et al. (2025). Spatiotemporal evolution and driving factors of soil erosion function in a typical basin of the alpine region in the upper Yellow River. *Frontiers in Plant Science*. 16, 1589848.
  - Lal, R., 2015. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 81(2): 137-148.
  - Lal, R., 2020. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5): 3265-3277.
  - Li, Y.-Y., Liu, L., An, S.-S., Zeng, Q.-C., & Li, X. (2016). Research on the effect of vegetation and slope aspect on the stability and erodibility of soil aggregate in loess hilly region based on Le Bissonnais method. *Journal of Natural Resources*, 31(2), 287-298.
  - McCune, B. and Grace, J.B., 2002. *Analysis of Ecological Communities*. MJM Software Design, Gleneden Beach, OR, London, 299p.
  - Mirzaei, J., Heydari, M. and Prevosto, B., 2017. Effects of vegetation patterns and environmental factors on woody regeneration in semi-arid oak-dominated forests of western Iran. *Journal of Arid Land*, 9: 368-378.
  - Mirzashahi, K. and Rouhipour, H., 2006. Effect of sources and rates of organic matter on the soil aggregate stability and bulk density in the northern Khuzestan. *Iranian Journal of Range and Desert*

- Research, 12(4): 395-407 (In Persian).
- Noorzad Moqaddam, M., Shamakhi, T., Etemad, V. and Aavazeh Hamet, M., 2014. Firewood consumption by rural households in upland of the Caspian forests in the northern Iran and related factors (Case study: Upland villages in southern parts of Kheyroud forest). *Iranian Journal of Forest*, 6(1): 113-125 (In Persian with English summary).
  - Nunes, J.P., Vieira, D.C., Valente, S., Serpa, D., Keizer, J.J. and Schneider, K., 2019. Combining remote sensing and hydrological modeling for post-fire soil erosion assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 79-85.
  - Ogban, P.I., 2021. Influence of slope aspect and position on soil physical quality and management implications at university of Uyo Teaching and Research Farm, Akwa Ibom State, Nigeria. *Agro-Science*, 20(3): 37-48.
  - Perrier, E.R. and Salkini, A.B., 1991. Soil water measurement: 123-131. In: Perrier, E.R., Salkini, A.B. and Ward C.F. (Eds.). *Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa*. Springer, Dordrecht, Nederland, 611p.
  - Pimentel, D. and Pimentel, M., 2003. Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 78(3): 660S-663S. S
  - Rahman, M.M., Tsukamoto, J., Tokumoto, Y. and Shuvo, M.A.R., 2013. The role of quantitative traits of leaf litter on decomposition and nutrient cycling of the forest ecosystems. *Journal of Forest Science*, 29(1): 38-48.
  - Rajbanshi, J., Das, Sh. and Paul, R., 2023. Quantification of the effects of conservation practices on surface runoff and soil erosion in croplands and their trade-off: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 864: 161015.
  - Sadeghi, S., Mohammadi Samani, K., Hosseini, V. and Shakri, Z., 2017. IEffect of aspect on some soil chemical properties in the forest (Case study: Baneh, Armardeh forest). *Abstracts of the 4th National Conference on Energy, Environment, Agriculture and Sustainable Architecture*. Sanandaj, Iran, 7-8 Mar. 2017: 10p (In Persian with English summary).
  - Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. and Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176.
  - Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B. and Taghizadeh-Mehrjardi, R., 2022. Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *Catena*, 213: 106204.
  - Teimouri, M., Alizadeh, T., Iranmanesh, Y., Sadgezdeh Hallaj, M.H. and Pourhashemi, M., 2023. The evaluation of changes in the chemical and biological properties of soil in Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests of Chaharmahal & Bakhtiari Province, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(1): 14-26 (In Persian with English summary).
  - Tejada, M. and Gonzalez, J. L. (2007). Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 197-205.
  - Valehi, M., Abdollahi, A. and Mohammadi Ghazijahani, H., 2020. Investigating the role of livestock producers in environmental degradation in mountainous areas (case study: Baruq District, Miandoab County). *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 1(1): 59-78 (In Persian with English summary).
  - Wuepper, D.J., Le Clech, S., Zilberman, D., Mueller, N. and Finger, R., 2020. Data: Countries and the relationship of crop yields and nitrogen pollution [Dataset]. *ETH Zurich Research Collection*.
  - Zeng, Q., Darboux, F., Man, C., Zhu, Z. and An, S., 2018. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *Catena*, 167: 276-283.
  - Zhang, X., Song, J., Wang, Y., Deng, W. and Liu, Y., 2021. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 755: 142418.
  - Zheng, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Wang, Y. and Zhu, J., 2023. Broadleaf trees increase soil aggregate stability in mixed forest stands of Southwest China. *Forests*, 14(12): 2402.
  - Zhu, M., Feng, Q., Qin, Y., Cao, J., Zhang, M., Liu, W., ... and Li, B., 2019. The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon. *Catena*, 176: 296-305.