



Analysis the relationship between the changes of hydrological components and landscape metrics under rainfall simulation and rangeland vegetation of Ardabil Province

Mahin Kalehhouei¹, Raof Mostafazadeh², Abazar Esmaeli Ouri³, Fardin Rahmani Naneh Karan⁴, Alireza Fazeli⁴, Nazila Alaei⁵ and Zeinab Hazbavi^{6*}

¹ Former PhD Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

² Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

³ Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

⁴ Former Msc Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

⁵ PhD Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

⁶ Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 01 July 2023

Accepted: 30 September 2023

Extended abstract

Introduction

The rainfall system of a major part of Iran is mediterranean, where the precipitation amount during the vegetation period is low. In addition, the occurrence of precipitation in the non-vegetation period or beginning of the vegetation period, which does not cover the surface of the earth well, is one of the important reasons for water erosion in Iran. Since vegetation has a special role in soil erosion control and runoff retention, any change in the vegetation structure and pattern, which expresses the landscape pattern and function, can have a significant effect on changing hydrological processes. Therefore, the assessment of soil and water loss and the quantification of its relationship with landscape metrics provide key information for the development of water and soil quality management strategies.

Materials and methods

The current research was conducted to investigate the hydrological component changes with landscape metrics on 2 m² plots using simulated rainfall at an intensity of 32 mm.h⁻¹ in a part of rangelands of Ardabil County. At first, considering the type and percentage of vegetation as the main variable, eight groups of vegetation composition along with one group without vegetation (control) were considered with three replications. The composition (and percentage) of the vegetation from the first to the eighth groups, respectively, include low-height graminea predominance (45), the composition of dense bushes with graminea (43), bushes with low-height and medium-distribution (37), sparse bushes mostly with low and medium height (31), the composition of sparse bushes with graminea (56), dense bushes in

* Corresponding author: z.hazbavi@uma.ac.ir

upper parts (54), low-height bushes with very low distribution (15), and dense bushes with almost uniform distribution (56). After measuring the runoff and sediment at the plot outlets, different hydrological components were calculated. Then, plots with nine different vegetation combinations were imaged in three replicates before and after rainfall simulation. After transferring the images prepared from the plots to the Arc/Map10.8 environment, nine important landscape metrics were calculated.

Results and discussion

Changes in the mean patch density (4.43-26.90), largest patch index (54.16-86.75), edge density (17.12-107.38), landscape shape index (1.50-4.47), mean shape area (4.16-37.46), mean Euclidean nearest neighbor distance (0.00-1.65), landscape division index (0.19-2.31), mean patch shape index (1.24-22.85), and the effective mesh size (15.80-43.96) indicate their different influence from different percentage and composition of vegetation cover. Spearman's correlation matrix analysis showed a nonsignificant relationship between the mean soil loss, runoff volume, runoff coefficient, and sediment concentration with landscape metrics ($r < 0.26$ and $p\text{-value} > 0.10$). The small scale of the studied plots, the lack of diversity in the vegetation composition, and the uniformity in terms of vegetation height can be cited as the reasons for the lack of correlation. In general, groups with vegetation values above 50% had a better condition in terms of LPI, AREA_MN, and MESH, which indicates more connectivity and less degradation. The increase in vegetation cover and spatial heterogeneity above the landscape surface can change the path of sediment transport, reduce sediment connectivity, and lead to a decrease in sedimentation.

Conclusion

The obtained results are applicable in explaining the appropriate reference to optimize water and soil protection measures on the watershed scale. However, It is suggested that similar and more comprehensive research be done in different scales of erosion plots and even in the landscape (slope) scale so that by considering a wide range of vegetation, topography, climatic conditions, as well as successive rains, it is possible to compare the results, optimum selection of study scale, and finally planning to manage and protect vegetation and water and soil resources.

Keywords: Field survey, Rangeland cover, Runoff coefficient, Soil loss, Spatial variability

Cite this article: Kalehhouei, M., Mostafazadeh, R., Esmaeli Ouri, A., Rahmani Naneh Karan, F., Fazeli, A., Alaei, N., Hazbavi, Z., 2024. Analysis the relationship between the changes of hydrological components and landscape metrics under rainfall simulation and rangeland vegetation of Ardabil Province. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 98-116.

© 2024, 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>)



تحلیل ارتباط بین تغییرات مولفه‌های هیدرولوژیکی و سنجه‌های سیمای سرزمین تحت شبیه‌سازی باران و پوشش گیاهی مرتعی استان اردبیل

مهین کله‌هوئی^۱، رئوف مصطفی‌زاده^۲، اباذر اسمعیلی‌عوری^۳، فردین رحمانی ننه‌کران^۴، علیرضا فاضلی^۴، نازیلا علائی^۵ و زینب حزباوی^{۶*}

- ۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۳- استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۵- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- ۶- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

چکیده مبسوط

مقدمه

سامانه بارشی در بخش عمده‌ای از سرزمین ایران، از نوع مدیترانه‌ای است که در آن میزان ریزش‌های جوی در دوره رویش گیاهان کم است. علاوه بر این، وقوع بارش در دوره غیررویشی و یا اوایل دوره رویشی که گیاهان هنوز سطح زمین را به خوبی نپوشانده‌اند، از دلایل مهم فرسایش آبی در ایران است. از آنجایی که پوشش گیاهی نقش ویژه‌ای در مهار فرسایش خاک و نگهداشت رواناب دارد، هرگونه تغییر در ساختار و الگوی آن که بیان‌گر الگو و عملکرد سیمای سرزمین است، می‌تواند اثر قابل توجهی در تغییر فرایندهای هیدرولوژیکی داشته باشد. لذا، ارزیابی از هدررفت آب و خاک و کمی‌سازی ارتباط آن با سنجه‌های سیمای سرزمین، اطلاعات کلیدی به‌منظور توسعه راهبردهای مدیریتی کیفیت آب و خاک فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات مولفه‌های هیدرولوژیکی در ارتباط با سنجه‌های سیمای سرزمین در مقیاس کرت‌های صحرائی دو متر مربعی و با استفاده از باران شبیه‌سازی شده در شدت ۳۲ میلی‌متر بر ساعت، در بخشی از مراتع شهرستان اردبیل انجام شد. در ابتدا، با در نظر گرفتن نوع و درصد پوشش گیاهی به‌عنوان متغیر اصلی، هشت گروه از ترکیب پوشش گیاهی به‌همراه یک گروه بدون پوشش گیاهی (شاهد) با سه تکرار در نظر گرفته شد. ترکیب و درصد پوشش گیاهی از گروه اول تا هشتم به‌ترتیب شامل غالبیت گرامینه با ارتفاع کم (۴۵)، ترکیب بوته‌ای متراکم با گرامینه (۴۳)، بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش متوسط (۳۷)، بوته‌ای پراکنده با ارتفاع عمدتاً کم و متوسط (۳۱)، ترکیب بوته‌ای پراکنده با گرامینه (۵۶)، بوته‌ای متراکم در بالادست (۵۴)، بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش بسیار کم (۱۵) و بوته‌ای متراکم با پوشش تقریباً یکنواخت (۵۶) بوده است. پس از اندازه‌گیری رواناب و رسوب در خروجی کرت‌ها،

* مسئول مکاتبات: z.hazbavi@uma.ac.ir

مولفه‌های هیدرولوژیکی مختلف محاسبه شدند. سپس، کرت‌های دارای نه ترکیب مختلف از پوشش گیاهی در سه تکرار قبل و پس از شبیه‌سازی باران، تصویربرداری شدند. پس از انتقال تصاویر تهیه شده از کرت‌ها به محیط Arc/Map 10.8، نه سنجه مهم سیمای سرزمین محاسبه شد.

نتایج و بحث

تغییرات میانگین سنجه‌های تراکم لکه (۲۶/۹۰-۴/۴۳)، شاخص بزرگ‌ترین لکه (۸۶/۷۵-۵۴/۱۶)، تراکم حاشیه (۱۷/۱۲-۱۰۷/۳۸)، شاخص شکل سیمای سرزمین (۴/۴۷-۱/۵۰)، میانگین اندازه لکه (۳۷/۴۶-۴/۱۶)، میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه اقلیدسی (۱/۶۵-۰/۰۰)، شاخص گسستگی سیما (۲/۳۱-۰/۱۹)، میانگین شاخص شکل لکه (۲۲/۸۵-۱/۲۴) و اندازه شبکه تاثیرگذار (۴۳/۹۶-۱۵/۸۰)، نشان‌دهنده تاثیرپذیری متفاوت آن‌ها از درصد و ترکیب مختلف پوشش گیاهی بوده است. تحلیل ماتریس همبستگی اسپیرمن، ارتباط غیرمعنی‌داری ($r < 0.26$ و $p > 0.10$) بین مقادیر میانگین هدررفت خاک، حجم رواناب، ضریب رواناب و غلظت رسوب با سنجه‌های سیمای سرزمین نشان داد. کوچک بودن مقیاس کرت‌های مورد بررسی، عدم تنوع زیاد در ترکیب پوشش گیاهی و یکنواختی از نظر ارتفاع پوشش گیاهی را می‌توان از دلایل عدم همبستگی ذکر کرد. در حالت کلی، گروه‌هایی که مقادیر پوشش گیاهی بالای ۵۰ درصد داشتند، از وضعیت بهتری از نظر AREA_MN، LPI و MESH برخوردار بودند که نشان‌دهنده پیوستگی بیشتر و تخریب کمتر است. افزایش پوشش گیاهی و ناهمگنی مکانی بالای سیمای سرزمین می‌تواند مسیر انتقال رسوب را تغییر داده، اتصال رسوب را کاهش داده است و منجر به کاهش رسوبگذاری شود.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده، در تبیین مرجع مناسب به‌منظور بهینه‌سازی اقدامات حفاظت آب و خاک در مقیاس حوزه آبخیز کاربرد دارند. هر چند، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های مشابه و جامع‌تر در مقیاس‌های مختلف از کرت‌های فرسایشی و نیز حتی در مقیاس دامنه صورت بگیرد تا با در نظر گرفتن طیف وسیعی از شرایط پوشش گیاهی، توپوگرافی، اقلیمی و نیز رگبارهای متوالی، امکان مقایسه نتایج، انتخاب بهینه مقیاس مطالعاتی و در نهایت، برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت و حفاظت از پوشش گیاهی و منابع آب و خاک، فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: بررسی میدانی، پوشش مرتعی، تغییرپذیری مکانی، ضریب رواناب، هدررفت خاک

مقدمه

باران و رواناب است (Cheng et al., 2008). رواناب از عوامل مهم انتقال‌دهنده ذرات خاک از بستر اولیه است (Eslami and Vaezi, 2015). تولید رواناب و رسوب از حوزه‌های آبخیز، فرایندهایی غیرقابل اجتناب هستند و نیازمند شناخت کامل عوامل تاثیرگذار در این فرایند برای مدیریت بهتر حوزه‌های آبخیز با تاکید بر کاهش آن‌ها است. نوع سازند زمین‌شناسی، آب و هوا و توپوگرافی و فیزیوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و نوع استفاده از زمین (کاربری اراضی)، از عوامل موثر بر فرسایش آبی و تولید رسوب در یک حوزه آبخیز هستند (Zhou et al., 2008; Tan et al., 2022).

سرعت عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر شبیه‌سازهای باران، از مزایای استفاده از

میزان تخریب خاک در اثر بهره‌برداری بی‌رویه بدون در نظر گرفتن پتانسیل منطقه و تغییر کاربری زمین در نتیجه افزایش روند رو به رشد جمعیت و افزایش نیاز به مواد غذایی، روند فزونی در پیش گرفته است (Baude et al., 2019; Gioia et al., 2021; Ferreira et al., 2022). میزان فرسایش خاک در ایران، حدود ۵/۵ تن در هکتار در سال برآورد شده است (Arabkhedri et al., 2018). فرسایش خاک و انتقال رسوب به آبراهه‌ها، از مهم‌ترین مشکلات محیطی در توسعه پایدار است و اثرات منفی بر بوم‌سازگان وارد می‌کنند.

فرسایش آبی شامل فرایندهای جدایش، دخول، انتقال ذرات و در نهایت، رسوبگذاری به‌وسیله دو عامل

آن‌هاست (Meyer and Harmon, 1984) و ابزاری مناسب برای درک بهتر فرایندهای موثر در فرسایش و رواناب به‌شمار می‌رود (Morgan, 2005). با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش‌های متعددی در زمینه تاثیرگذاری کاربری و نوع پوشش زمین در تولید رواناب و رسوب با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شده است (Zhao et al., 2019; Munoth and Goyal, 2020; Hu et al., 2021). برای نمونه، (Duley and Hays (1932) از جمله اولین پژوهشگرانی بودند که هدررفت خاک را با استفاده از شبیه‌ساز باران برآورد کردند. از آن زمان به بعد، استفاده‌های مداوم از شبیه‌ساز باران، به‌عنوان ابزاری اساسی در تحقیقات فرسایش خاک صورت گرفته است (برای نمونه، (Lassu; Habzavi et al., 2012; Rodrigo-Comino; Kaviani et al., 2016; et al., 2015; et al., 2018; Stašek et al., 2023).

سامانه بارشی بخش عمده‌ای از سرزمین ایران، مدیترانه‌ای است که در آن میزان ریزش‌های جوی در دوره رویش گیاهان کم بوده، علاوه بر آن، وقوع بارش در دوره غیررویشی و یا اوایل دوره رویشی که گیاه سطح زمین را به خوبی نپوشانده، از دلایل مهم فرسایش آبی در ایران است (Arabkhedri et al., 2018). مقدار کم بارش به‌دلیل شرایط خاص اقلیمی حاکم در کشور باعث شده که بارش‌ها معمولاً به‌صورت رگبار کوتاه‌مدت و با شدت زیاد باشند. بررسی سوابق پژوهشی نشان می‌دهد که مداخلات انسانی در طبیعت، نظیر تغییر نوع کاربری اراضی، چرای بی‌رویه و جنگل‌تراشی سیلاب‌های مخربی را به بار می‌آورد که سالیانه بشر خسارت‌های زیادی از این پدیده متحمل می‌شود. فرسایش خاک، تولید رسوب و رواناب از جمله بارزترین نوع تخریب و پیامدهای ناشی از مداخلات انسانی به‌شمار می‌رود (Van Oost et al., 2000; Wynants et al., 2018).

اخیراً، کاربرد سنجه‌های سیمای سرزمین در ارزیابی ویژگی‌های مربوط به ترکیب، ساختار و طرز قرارگیری مکانی اجزا سیمای سرزمین با کاربری‌های متنوع، به‌دلیل تحلیل کمی تغییرات شاخص‌های سیمای سرزمین و ارتباط آن با مولفه‌های مختلف هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است (Uemaa et al., 2011; Alaei et al., 2022). در واقع، این گونه ارزیابی از تغییرات سیمای سرزمین، بازتابی از وضعیت گذشته و سیر تحول کاربری اراضی را نشان می‌دهد و به‌عنوان چارچوبی پویا برای برنامه‌ریزی استفاده پایدار از منابع زمین به‌کار گرفته می‌شود (Feghhi and Karami, 2011). سیمای سرزمین، می‌تواند در چهار سطح سلول، لکه، طبقه و سیما تحلیل و ارزیابی شود که سنجه‌ها ضمن تبیین الگوی سیمای سرزمین در یافتن الگوی نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاربرد دارند (Bautista et al., 2007).

در همین زمینه، تاثیرپذیری سنجه‌های سیمای سرزمین از فرایندهای هیدرولوژیکی به‌وسیله پژوهش‌های مختلف به اثبات رسیده است. برای نمونه، (Carey et al., 2011) در خصوص تخریب کاربری اراضی در حوزه آبخیز با، واقع در ایالت فلوریدا آمریکا گزارش کردند که شاخص توسعه سیمای سرزمین و سنجه بزرگ‌ترین لکه بیشترین ارتباط را با بار معلق دارد. همچنین، (Marco da Silva et al., 2015) به تحلیل ارتباط سنجه‌های سیمای سرزمین و فرسایش خاک در مقیاس کرت و تحت شبیه‌سازی باران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ارتباط تنگاتنگی بین تغییرپذیری فرسایش خاک و سنجه‌های سیمای سرزمین از جمله تعداد لکه، تراکم لکه، بزرگ‌ترین اندازه لکه، تراکم حاشیه، شاخص شکل سیمای سرزمین و بعد فرکتال وجود دارد و از حساسیت بسیار بالایی برخوردار هستند. (Xu et al., 2017). نیز اثرات الگوی سیمای سرزمین را بر فرایندهای فرسایش خاک در منطقه کوهستانی در شمال چین بررسی کردند. در این پژوهش کاربری‌های زمین لخت، کشاورزی و شهری، به‌عنوان منابع تولید رسوب و کاربری‌های جنگلی و مرتعی به‌عنوان منابع انباشت رسوب در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها تاکید بر وجود ارتباط معنی‌دار بین الگوی سیمای سرزمین و تولید رسوب و فرسایش خاک بود.

Zhang et al., (2017) با تلفیق نتایج مدل SWAT و سنجه‌های سیمای سرزمین در زیرحوزه‌های

کاهش یافت. همچنین، وجود ارتباط معنی‌دار بین فرسایش خاک و رواناب با سنج‌های سیمای سرزمین تایید شد. اخیراً، Chen et al., (2023) در بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و تغییرات بلندمدت الگوی سیمای سرزمین در یک حوزه آبخیز کوچک در فلات لس چین به این نتیجه رسیدند که با احیا سریع کشاورزی طی سال‌های ۱۹۵۸-۱۹۳۸ و احیا پوشش گیاهی در طول سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۵۸، میانگین سالانه رسوب به‌طور پیوسته با تغییرات کاربری اراضی متفاوت بوده است. تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد که کارایی رسوب ارتباط نزدیکی با سنج‌های سیمای سرزمین دارد. نتایج نشان داد که افزایش پوشش گیاهی و ناهمگونی فضایی بالای سیمای سرزمین می‌تواند مسیرهای انتقال رسوب را تغییر دهد.

در ایران، Ahmadi Mirghaed et al., (2018) در ارزیابی ارتباط بین فرسایش خاک و سنج‌های سیمای سرزمین در حوزه آبخیز گرگان بیان کردند که هدررفت خاک با کاهش سنج‌های مرتبط با جنگل و مرتع افزایش و نیز با افزایش سنج‌های مرتبط با مناطق شهری و کشاورزی تشدید پیدا کرده است. همچنین، مشخص شد که نوع کاربری اراضی، مهم ترین عامل در تعیین فرسایش خاک بوده و مقدار هدررفت خاک، بیشترین تأثیرپذیری را از نظر مساحت، تعداد، شکل و تراکم لکه‌های سیمای سرزمین داشته است. همچنین، Ghorbani et al., (2021) به تحلیل ارتباط بین سنج‌های سیمای سرزمین و فرسایش خاک حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی، استان اردبیل پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Fragstats 4.2.1، ۱۴ سنج سیمای سرزمین مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج بیان‌گر وجود یک رابطه غیرمستقیم میان سنج‌های ED، DIVISION و LPI و رابطه مستقیم بین SHAPE-MN و AREA-MN با فرسایش ویژه خاک بود.

Rahmani Naneh Karan et al., (2021, 2022)

در شبیه‌سازی اثر نوع پوشش گیاهی بر پاسخ هیدرولوژیکی در مقیاس کرت صحرایی، به این نتیجه رسیدند که پوشش گیاهی بوته‌ای تأثیری مثبت و معنادار بر کاهش رواناب تولیدی به میزان ۷۵/۴۵ درصد دارد. بر عکس آن، پوشش گرامینه نتوانسته

آبخیز لیوشا^۱ چین به این نتیجه رسیدند که تغییرات فرسایش خاک به‌طور معنی‌داری وابسته به تغییرات شاخص بزرگ‌ترین لکه، شاخص پیوستگی لکه، شاخص یکنواختی اصلاح‌شده سیمپسون و شاخص تجمع است. همچنین، Li et al., (2021) به بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر الگوی سیمای سرزمین و فرسایش خاک استان هوئی^۲ غربی در کشور چین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ پرداختند. در این پژوهش از رگرسیون گام به گام، برای تعیین ارتباط بین الگوهای سیمای سرزمین و فرسایش خاک تحت کاربری‌های مختلف و تغییرات پوشش گیاهی استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین فرسایش خاک در مناطق کوهستانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ افزایش و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ کاهش یافته است. همچنین، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ شاخص تکه‌شدگی افزایش و پیوستگی سیمای سرزمین کاهش یافته است. Brini et al., (2021) به تحلیل ارتباط فرسایش خاک با الگوهای سیمای سرزمین و زمین‌ریخت‌شناسی^۳ در منطقه پالئوچورا^۴ (چانیا^۵ جنوبی، کرت^۶ و یونان) پرداختند. در این پژوهش ارزیابی نرخ فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE صورت گرفت و سنج‌های سیمای سرزمین برای تحلیل ارتباط فرسایش خاک با الگوهای سیمای سرزمین محاسبه شدند. نتایج نشان داد که روابط قوی بین مدل‌سازی فرسایش خاک، الگوهای سیمای سرزمین و ریخت‌شناسی وجود دارد. Liu et al., (2022) به تجزیه و تحلیل رواناب و رسوب بر اساس تغییر کاربری/پوشش زمین در دو حوزه آبخیز گوشانچوان و تویی^۷ در فلات لس چین از ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۰ پرداختند. نتایج نشان داد که زمین‌های بدون استفاده و زمین‌های زراعی بیشترین گسستگی را دارند. طی سال‌های مورد بررسی شاخص تنوع شانون و بزرگ‌ترین شاخص لکه، افزایش و گسستگی سیمای سرزمین

¹ Liusha

² Hubei

³ Geomorphometry

⁴ Paleochora

⁵ Chania

⁶ Crete

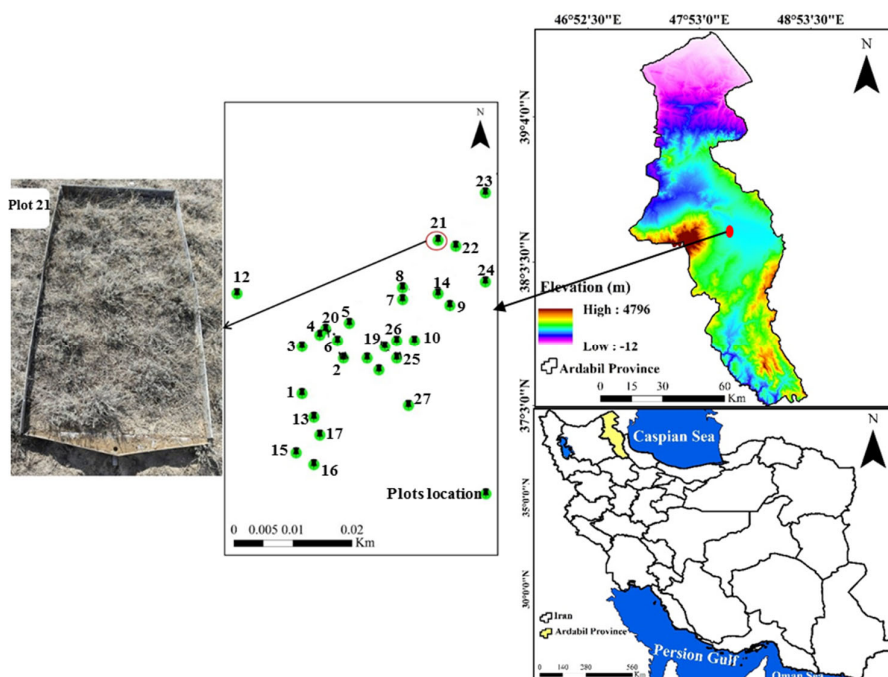
⁷ Gushanchuan and Tuweihe

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر در کاربری مرتع با خاک‌های دست‌نخورده اطراف محوطه دانشگاه محقق اردبیلی شهرستان اردبیل، با مختصات "۱۸ عرض شمالی و "۴۰ ۱۷ ۴۸ طول شرقی انجام شد (شکل ۱). متوسط ارتفاع محدوده مورد مطالعه برابر با 14 ± 1407 متر از سطح دریا و شیب آن بین ۱۰ تا ۱۵ درصد متغیر بوده است. به‌طور کلی، بارش‌های استان اردبیل تحت تاثیر اقلیم منطقه شمال غرب بوده است که در اوایل فصل پاییز با ورود سامانه‌های باران‌زای غربی، شروع می‌شوند (Aghabeigi et al., 2020). متوسط بارندگی برابر با $328/63$ میلی‌متر و شیب غالب منطقه دارای جهت جنوبی است. مطابق نتایج فیزیکی و شیمیایی خاک، بافت خاک، ماده آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته منطقه مورد مطالعه به ترتیب لومی شنی، ۰/۰۸ درصد، ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۸/۳ بوده است (Abbasi Khalki, 2018). همچنین، بر اساس شواهد صحرایی، فرسایش غالب منطقه، از نوع فرسایش سطحی و شیبی بوده است.

است در کاهش تولید رواناب نقش داشته باشد و بلکه موجب افزایش حدود هفت درصدی تولید رواناب نسبت به شاهد شده است.

جمع‌بندی سابقه پژوهش نشان‌دهنده وجود ارتباطات پیچیده و پویا بین الگوی مکانی، توزیع و تغییر کاربری زمین و فرایندهای هیدرولوژی خاک از جمله فرسایش خاک در مقیاس‌های مختلف کرت، دامنه و حوزه آبخیز است. طی چند دهه گذشته، ساختار پوشش زمین، به‌عنوان یکی از مولفه‌های مهم مطالعات مربوط به فرایندهای زمین‌ریخت‌شناسی مرتبط با فرسایش خاک در نظر گرفته شده است. بر همین اساس، انجام پژوهش‌های بیشتر به‌منظور بهره‌برداری پایدار از اراضی و گسترش روش‌های مناسب و صحیح مدیریتی لازم و ضروری است. لذا، پژوهش پیشرو به تحلیل تاثیرپذیری سنجه‌های سیمای سرزمین از پوشش‌های گیاهی مختلف و نیز ارتباط آن‌ها با مولفه‌های رواناب و رسوب در مقیاس کرت در کاربری مرتع واقع در استان اردبیل پرداخته است.



شکل ۱- نمایی از منطقه مورد مطالعه در ایران و استان اردبیل
Fig. 1. A view of the study area in Iran and Ardabil Province

منحنی‌های به‌دست آمده، شدت باران منطقه مورد مطالعه، ۳۲ میلی‌متر بر ساعت در دوره بازگشت ۲۰ ساله با تداوم زمانی ۱۵ دقیقه تعیین شد. بر همین اساس، دستگاه شبیه‌ساز باران، بر اساس شدت مورد نظر تنظیم و واسنجی شد. بدین ترتیب که ظروف پلاستیکی هم راستا با نازل‌ها روی سطح زمین چیده شد و پس از شروع بارش به مدت دو دقیقه، حجم آب جمع شده در ظروف به مساحت ظرف تقسیم شد. پس از محاسبات آماری و تبدیل واحد، شدت مورد نظر تنظیم شد. چنانچه شدت محاسبه شده از شدت مورد نظر بیشتر یا کمتر بود، مجدداً با تغییر سرعت و فشار آب نازل‌ها، این مراحل تکرار شد تا شدت مورد نظر به‌دست آید (شکل ۲).

دستگاه شبیه‌ساز باران: شبیه‌ساز باران، متشکل از سامانه آبرسانی، صفحه بارش، سامانه جمع‌آوری آب مازاد و برد کنترلی است. صفحه بارش شامل دو نازل نوسانی از نوع ویجت ۸۰۱۰۰ با قطر روزنه ۴/۵ میلی‌متر، با قابلیت جابه‌جایی بر ریلی به طول دو متر است که روی پایه‌هایی متحرک با قابلیت تنظیم ارتفاع تا ۲۷۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. دامنه قطری قطرات باران شبیه‌سازی شده بین سه تا پنج میلی‌متر، تحت فشار بین ۰/۳ تا یک بار است (دستورالعمل شبیه‌ساز باران، شرکت آذر خاک آب ارومیه) (شکل ۲).

به‌منظور بیشینه مشابهت شدت باران شبیه‌سازی شده با منطقه مورد مطالعه، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی برای داده‌های بارش نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک (ایستگاه سامیان) تهیه شد. مطابق



شکل ۲- نمایی از شبیه‌ساز باران به‌همراه کرت‌های فرسایشی (بالا) و واسنجی آن (پایین)
 Fig. 2. A view of the rain simulator with erosion plots (up) and its calibration (down)

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی: حجم رواناب تولیدی از هر یک از کرت‌ها، با استفاده از استوانه مدرج قرائت شد. همچنین، به‌منظور برآورد هدررفت خاک، نمونه‌های جمع‌آوری شده به مدت ۲۴ ساعت به حالت سکون قرار داده شدند و پس از تخلیه آب اضافی روی نمونه‌ها، رسوب باقیمانده به داخل ظرف‌های مناسب با وزن مشخص منتقل شد (Duley and Hays, 1932؛ Kukal and Sarkar, 2011؛ and Kavian et al., 2016) (شکل ۴).

سپس، به‌منظور خشک شدن آن‌ها، به مدت ۲۴ ساعت در کوره حرارتی با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. اختلاف وزن نمونه قبل و پس از خشک شدن، به‌عنوان وزن هدررفت خاک در نظر گرفته شد (Kukal and Sarkar, 2011؛ and شکل ۴).

غلظت رسوب نیز از تقسیم مقدار هدررفت خاک بر حجم رواناب به‌دست آورده شد. همچنین، برای اندازه‌گیری ضریب رواناب هر یک از کرت‌ها، حجم رواناب خروجی از کرت را بر کل حجم بارندگی تقسیم، با ضرب در عدد ۱۰۰، ضریب رواناب بر حسب درصد محاسبه شد (Kukal and Sarkar, 2011؛ Kalehhouie et al., 2020).

محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین: نرم‌افزار Fragstats4.2 (<https://fragstats.software.informer.com/4.2/>)، شامل مجموعه‌ای از سنج‌های فضایی است که به‌وسیله بوم‌شناسان برای توضیح برخی از ویژگی‌ها، تسهیل ارزیابی و تجزیه و تحلیل فرایندهای سیمای سرزمین طراحی شده است. به ازای هر ورودی در نرم‌افزار Fragstats 4.2، سه فایل خروجی Patch، Class و Landscape ایجاد می‌شود که تمامی آن‌ها به‌صورت فایل متنی و قابل مشاهده است.

قابل ذکر است که نرم‌افزار Fragstats، محدودیتی در مقیاس (پهنه و بزرگ‌نمایی) نداشته، برای تجزیه و تحلیل الگوی مکانی و سنج‌های مختلف لکه‌های تشکیل‌دهنده سیمای سرزمین در محیط‌های ناهمگن و شرایط متفاوت، مناسب است (McGarigal, 2001؛ Raines, 2002).

سنج‌ها در بسیاری از موارد دارای همپوشانی بوده است و اطلاعات مشابهی از وضعیت سیمای سرزمین ارائه می‌کنند. بر همین اساس، یکی از چالش‌های مهم، انتخاب سنج‌های مناسب از میان طیف وسیعی از

عملیات صحرائی و روش نمونه‌برداری: در ابتدا، با در نظر گرفتن نوع و درصد پوشش گیاهی به‌عنوان متغیر اصلی، هشت گروه از ترکیب پوشش گیاهی به‌همراه یک گروه بدون پوشش گیاهی (شاهد) با سه تکرار در نظر گرفته شد. ترکیب و درصد پوشش گیاهی از گروه اول تا هشتم به‌ترتیب شامل غالبیت گرامینه با ارتفاع کم (۴۵)، ترکیب بوته‌ای متراکم با گرامینه (۴۳)، بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش متوسط (۳۷)، بوته‌ای پراکنده با ارتفاع عمدتاً کم و متوسط (۳۱)، ترکیب بوته‌ای پراکنده با گرامینه (۵۶)، بوته‌ای متراکم در بالادست (۵۴)، بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش بسیار کم (۱۵) و بوته‌ای متراکم با پوشش تقریباً یکنواخت (۵۶)، بوده است (شکل ۳).

پوشش گیاهی انتخاب شده به‌وسیله ۲۷ کرت صحرائی از جنس ورقه‌های گالوانیزه با مساحت دو مترمربع با شیب ۱۰ درصد، محصور شد. دیواره‌هایی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برای جلوگیری از ترواش رواناب و رسوب به بیرون از کرت‌ها نصب شدند.

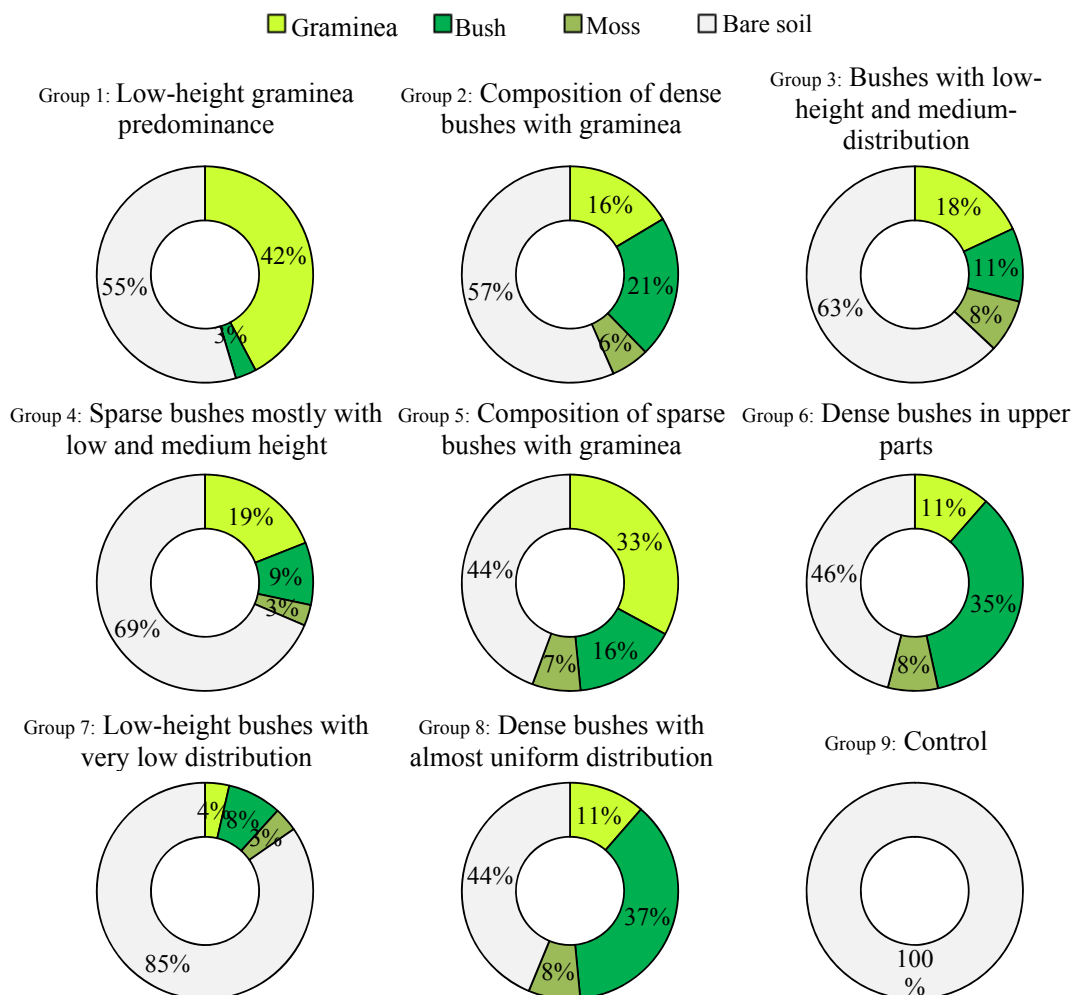
فاصله بین کرت‌های انتخابی طوری بوده است که ویژگی‌های خاکشناسی و درصد و جهت شیب بدون تغییر مانده‌اند. همچنین، از نظر تکرار آزمایش‌ها نیز سعی شده است که کرت‌ها طوری انتخاب شوند تا دارای بیشینه مشابهت از نظر درصد و ترکیب پوشش گیاهی باشند.

به‌منظور جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب تولیدی، سامانه جمع‌آوری رواناب در پایین‌دست هر یک از کرت‌ها تعبیه شد. پس از شروع شبیه‌سازی باران، زمان شروع رواناب به‌محض رسیدن اولین قطره به خروجی کرت‌های مورد بررسی با استفاده از زمان‌سنج ثبت شد. سپس، نمونه‌های رواناب و رسوب خروجی از هر یک از کرت‌ها در بازه زمانی سه دقیقه‌ای جمع‌آوری شد (Kalehhouie et al., 2020).

پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها، تمام نمونه‌های جمع‌آوری شده به آزمایشگاه علوم آبخیز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی منتقل شدند. قابل ذکر است که زمان انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی باران، شهریور ۱۳۹۹ بوده است.

برای محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین مستخرج از هر کرت، تصویربرداری به‌وسیله دوربین عکاسی بلافاصله قبل و پس از شبیه‌سازی صورت گرفت. سپس تصاویر تهیه شده به محیط Arc/Map 10.8 منتقل شدند و لایه پوشش سطح هر کرت استخراج شد (شکل ۵). در ادامه، برای کمی‌سازی سنجه‌های سیمای سرزمین، فرمت رستری تصاویر تهیه شده بر اساس استانداردهای مورد نیاز نرم‌افزار Fragstats 4.2، تهیه شد و سنجه‌ها در سطح سیمای برای هر یک از کرت‌های مورد بررسی محاسبه شدند (McGarigal and Ene, 2003).

سنجه‌های محاسبه شده به‌وسیله نرم‌افزار است که در پژوهش حاضر، پالایش لازم بر اساس مرور منابع صورت گرفت (Ghorbani et al., 2021; McGarigal, 2001). به‌طوری‌که در صورت عدم وجود سابقه پژوهش، در خصوص ارتباط مفهومی آن با فرایندهای هیدرولوژیکی حذف شدند و به‌طور کلی، نه سنجه مربوط به سطح سیمای به شرح جدول ۱، در نظر گرفته شد. این سنجه‌ها به‌دلیل ارتباط زیاد آن‌ها در فرایندهای هیدرولوژیکی از جمله فرسایش خاک و تولید رواناب بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Marco da Silva et al., 2015; Ghorbani et al., 2021).



شکل ۳- توزیع میانگین درصد کل پوشش سطح کرت‌ها در هر گروه مورد بررسی

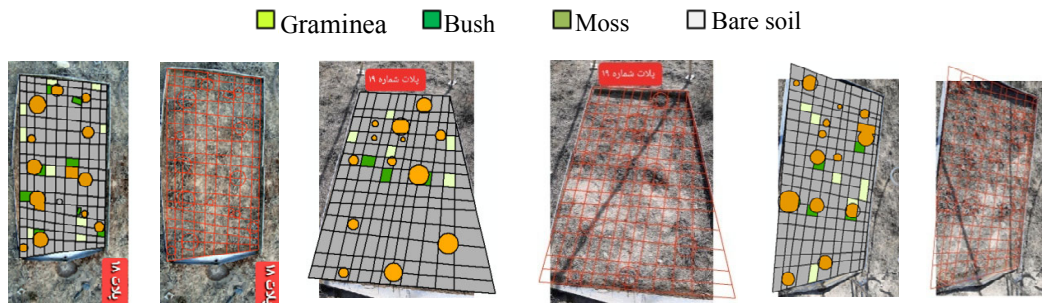
Fig. 3. Distribution of the average percentage of the total surface coverage of plots in each investigated group



شکل ۴- نمایشی از ته‌نشینی (راست) و خشک نمودن رسوبات در کوره حرارتی (چپ)
Fig. 4. A view of sedimentation (right) and drying of sediments in a thermal furnace (left)

جدول ۱- ویژگی‌های کلی سنج‌های سیمای سرزمین مورد بررسی در پژوهش حاضر (McGarigal, 2001)
Table 1. The general characteristics of the landscape metrics examined in the current research (McGarigal, 2001)

Name	Symbol	Unit	Eq.	Range
Patch density	PD	m per 100 ha	$PD = \frac{n_i}{A} (10000) (100)$	$PD > 0$
Largest patch index	LPI	%	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	$0 < LPI \leq 100$
Edge density	ED	m per 100 ha	$ED = \frac{E}{A} (10000)$	$TE \geq 0$
Landscape shape index	LSI	Unit less	$LSI = \frac{0.25E^*}{\sqrt{A}}$	$LSI \geq 1$
Mean patch area	AREA_MN	ha	$AREA-MN = \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{1}{10000}$	$AREA_MN > 0$
Mean Euclidean nearest neighbor distance	ENN_MN	m	$\frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{N}$	No limit + $ENN_MN > 0$
Landscape division index	DIVISION	Unit less	$DIVISION = \left[1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right]$	$0 \leq DIVISION < 1$
Mean patch shape index	SHAPE_MN	Unit less	$SHAPE = \frac{P_{ij}}{\min P_{ij}}$	$SHAPE \geq 1$
Effective mesh size	MESH	ha	$MESH = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}{A}$	Cell No. \leq SPLIT \leq Total area of landscape



شکل ۵- نمایشی از نحوه تفکیک انواع پوشش گیاهی در کرت‌های مورد مطالعه
 (سه تکرار مربوط به گروه ۷، دارای ترکیب پوشش غالب بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش بسیار کم نشان داده شده است.)
Fig. 5. A view of the extraction style of vegetation types in the study plots
 (Three repetitions related to group 7, low-height bushes with very low distribution, have been shown.)

تجزیه و تحلیل داده‌ها: به منظور تجزیه و تحلیل آماری، ابتدا بانک اطلاعاتی شامل داده‌های حاصل از رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی هر یک از کرت‌ها و اطلاعات مستخرج از نرم‌افزار Fragstats در محیط Microsoft Excel 2021، تهیه شد. سپس محاسبات مربوط به مولفه‌های هیدرولوژیکی انجام و نمودارهای مورد نیاز رسم شدند. نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده رواناب و رسوب و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk به دلیل کم بودن تعداد داده‌های هر گروه از حد ۵۰ داده (Shapiro and Wilk, 1965)، در محیط IBM SPSS

تجزیه و تحلیل داده‌ها: به منظور تجزیه و تحلیل آماری، ابتدا بانک اطلاعاتی شامل داده‌های حاصل از رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی هر یک از کرت‌ها و اطلاعات مستخرج از نرم‌افزار Fragstats در محیط Microsoft Excel 2021، تهیه شد. سپس محاسبات مربوط به مولفه‌های هیدرولوژیکی انجام و نمودارهای مورد نیاز رسم شدند. نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده رواناب و رسوب و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk به دلیل کم بودن تعداد داده‌های هر گروه از حد ۵۰ داده (Shapiro and Wilk, 1965)، در محیط IBM SPSS

جدول ۲- نتایج حاصل از بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk (درجه آزادی=۲۷)

Table 2. The results of the data normality check using the Shapiro-Wilk test (df = 27)

Component/Metric	Soil loss	Runoff volume	Runoff Coefficient	Sediment yield	PD	LPI	ED
P-value	0.000	0.003	0.003	0.236	0.004	0.152	0.512
Component/Metric	LSI	AREA_MN	ENN_MN	DIVISION	SHAPE_MN	MESH	-
P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.161	-

(ترکیب بوته‌ای متراکم با گرامینه) بوده است. هم‌روندی تغییرات این دو مولفه هیدرولوژیکی در بسیاری از مطالعات گزارش شده است (برای مثال، Hazbavi et al., 2012; Kavian et al., 2016).

از نتایج چنین بر می‌آید که گروه ۲، دارای کمینه مقدار مولفه‌های هیدرولوژیکی بوده و بهترین اثرگذاری را نسبت به شاهد از خود نشان داده است. در نهایت، کمینه و بیشینه مقدار غلظت رسوب به ترتیب مربوط به گروه‌های ۸ و ۹، یافت شد. به عبارتی، گروه ۸ که بیشینه حجم و ضریب رواناب را تولید کرده است، کمینه غلظت رسوب را دارد. این پیچیدگی رفتارپذیری الگوی پوشش گیاهی و سنجه‌های سیمای سرزمین در فرایندهای هیدرولوژیکی به‌وسیله سایر مطالعات (Baude et al., 2015; Marco da Silva et al., 2019) گزارش شده و به عبارتی بیان‌گر تفاوت در عملکرد انواع پوشش گیاهی و حتی ترکیب و آرایش مکانی لکه‌های پوشش گیاهی و خاک لخت است. همان‌گونه که از ترکیب‌های مختلف گروه‌های مورد بررسی (شکل ۳) استنتاج می‌شود، خاک لخت، انواع پوشش گیاهی بوته‌ای، خزه و گرامینه، با درصد‌های مختلف درون کرت‌های صحرایی وجود داشته، خاک لخت بخش عمده کرت‌ها را تشکیل داده است.

نتایج و بحث

تغییرات مولفه‌های هیدرولوژیکی تحت ترکیب‌های مختلف پوشش گیاهی: طبق نتایج مندرج در جدول ۳، کمترین میانگین هدررفت خاک بین ۱/۳۰ تا ۵/۵۳ گرم مربوط به گروه‌های ۲، ۳ و ۶ به‌دست آمد که به ترتیب دارای ترکیب بوته‌ای متراکم با گرامینه، بوته‌ای با ارتفاع کم و پراکنش متوسط، و بوته‌ای متراکم در بالادست هستند. در واقع، بین ۳۷ تا ۵۴ درصد این گروه‌ها، پوشیده از پوشش گیاهی مرتعی است. بیشینه مقدار هدررفت خاک نیز پس از گروه شاهد به میزان $9/13 \pm 5/47$ گرم، در گروه ۵ با ترکیب بوته‌ای پراکنده با گرامینه به میزان $7/20 \pm 3/02$ گرم مشاهده شد. بنابراین، تراکم و نوع پوشش گیاهی بر تغییرات هدررفت خاک تاثیر گذاشته است. در پژوهشی که در یک آبخیز کوهستانی در چین به‌وسیله Zhou et al. (2008) انجام شده است، فرسایش خاک در سناریوهای با پوشش گیاهی بیشتر کاهش یافته بود. آن‌ها نتایج به‌دست آمده را برای توسعه راهبردهای بهینه مدیریت آبخیز با هدف توسعه پوشش گیاهی کاربردی گزارش دادند. بیشینه و کمینه مقدار حجم رواناب و ضریب رواناب به ترتیب مربوط به گروه‌های ۸ (ترکیب بوته‌ای متراکم با پوشش تقریباً یکنواخت) و ۲

و ارتباط معکوس آن با مقدار رواناب در منطقه نیمه‌خشک مدیترانه‌ای اشاره کردند. همچنین، Alavizadeh et al., (2014) در بررسی اثر پوسته‌های زیستی بر فرسایش آبی مراتع استان خراسان رضوی در مقیاس کرت به این نتیجه رسیدند که با افزایش تراکم گیاهان خزه‌ای، تولید رسوب و فرسایش ویژه کاهش می‌یابد.

بر همین اساس، این انتظار می‌رفت که میزان قابل توجهی رواناب و رسوب تولید شده و بر تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین تاثیر می‌گذارد. نکته قابل توجه در ترکیب پوشش گیاهی، وجود خزه به نسبت‌های مختلف در هر گروه بوده است. برخی از تفاوت‌های رفتاری را نیز می‌توان به این عامل نسبت داد. همان‌گونه که Bautista et al., (2007) به ارتباط مستقیم پوسته زیستی خاک با عملکرد پوشش گیاهی

جدول ۳- ویژگی‌های آمار توصیفی مولفه‌های هیدرولوژیکی در گروه‌های مورد بررسی

Table 3. Characteristics of descriptive statistics of hydrological components in the investigated groups

Group		Soil loss (gr)	Runoff volume (l)	Runoff coefficient (%)	Sediment yield (gr l ⁻¹)
1	Mean	3.53	3.38	15.97	2.24
	Standard deviation	0.60	2.76	14.35	0.65
	Coefficient of variation	0.17	0.71	0.90	0.29
2	Mean	4.67	2.04	6.43	3.76
	Standard deviation	3.32	0.52	2.71	0.64
	Coefficient of variation	0.71	0.25	0.42	0.17
3	Mean	8.20	3.09	12.04	4.03
	Standard deviation	8.10	2.18	11.66	1.03
	Coefficient of variation	0.99	0.71	0.97	0.26
4	Mean	3.20	2.50	8.81	2.66
	Standard deviation	1.91	2.05	10.71	2.08
	Coefficient of variation	0.60	0.82	1.22	0.78
5	Mean	3.40	2.49	8.78	3.67
	Standard deviation	1.31	1.41	7.35	1.99
	Coefficient of variation	0.39	0.57	0.84	0.54
6	Mean	5.37	4.27	18.06	3.05
	Standard deviation	3.38	2.69	14.02	1.33
	Coefficient of variation	0.63	0.63	0.78	0.44
7	Mean	8.13	3.85	15.84	3.87
	Standard deviation	5.12	1.58	8.21	1.24
	Coefficient of variation	0.63	0.41	0.52	0.32
8	Mean	4.37	2.94	11.09	3.42
	Standard deviation	1.40	1.31	6.79	0.91
	Coefficient of variation	0.32	0.44	0.61	0.27
9	Mean	7.00	2.31	7.84	3.18
	Standard deviation	4.07	1.18	6.15	0.62
	Coefficient of variation	0.58	0.51	0.78	0.20

سایر گروه‌های دارای مقادیر زیر یک بودند. در واقع، گروه ۶ با پوشش بوته‌ای مترکم در بالادست بهترین پیوستگی را داشته است. دو سنجه PD و LPI، جز سنجه‌های حاشیه هستند. این نوع سنجه‌ها، معمولاً به بهترین وجه، پیکربندی سیمای سرزمین را نشان می‌دهند، حتی اگر اصلاً از نظر مکانی کاملاً قابل تفکیک نباشند (McGarigal, 2001).

سنجه ED، به‌عنوان یک سنجه قدرتمند در تشخیص ساختار، الگو و ترکیب زیستگاه در سطح سیمای سرزمین است که در تمام گروه‌ها به‌جز گروه‌های ۷ و ۹، تقریباً برابر صفر به‌دست آمده است. گروه ۶، با پوشش بوته‌ای مترکم در بالادست (حدود ۵۴ درصد) بیشترین میانگین سنجه‌های LPI، LSI و

تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین تحت ترکیب‌های مختلف پوشش گیاهی: با توجه به جدول ۴ و شکل ۶، مقادیر بالاتر PD (۴۵-۴۲ متر در ۱۰۰ هکتار) در گروه‌های ۴ تا ۶، به‌ترتیب با پوشش بوته‌ای پراکنده با ارتفاع عمدتاً کم و متوسط (۳۱)، ترکیب بوته‌ای پراکنده با گرامینه (۵۶)، بوته‌ای مترکم در بالادست (۵۴)، نشان‌دهنده تکه‌تکه‌شدگی بیشتر است. اعتقاد بر این است که مقادیر بالای PD یک نوع کاربری خاص، ممکن است فرایندهای اکولوژیکی حیاتی حوزه آبخیز را تحت تاثیر قرار دهد (Alaei et al., 2022). دامنه تغییرات LPI، بین صفر تا ۱۰۰ است که هر چه به ۱۰۰ نزدیک‌تر، نشان‌دهنده پیوستگی بیشتر است. در گروه‌های مورد بررسی، به‌جز گروه ۶،

را برای کاربری جنگل به‌دست آوردند. در حالت کلی، طبق نتایج گروه‌هایی که دارای مقادیر پوشش گیاهی بالای ۵۰ درصد داشتند، از وضعیت بهتری از نظر AREA_MN، LPI و MESH برخوردار بودند که نشان‌دهنده پیوستگی بیشتر و تخریب کمتر است که با نتایج Chen et al., (2023) در فلات لسی چین مطابقت دارد. آن‌ها تاکید کردند که افزایش پوشش گیاهی و ناهمگنی مکانی بالای سیمای سرزمین می‌تواند مسیر انتقال رسوب را تغییر داده، اتصال رسوب را کاهش داده و منجر به کاهش رسوبگذاری در رودخانه‌ها شود. چنین نتایجی، در تبیین مرجع مناسب به‌منظور بهینه‌سازی اقدامات حفاظت آب و خاک در حوزه آبخیز مفید خواهد بود.

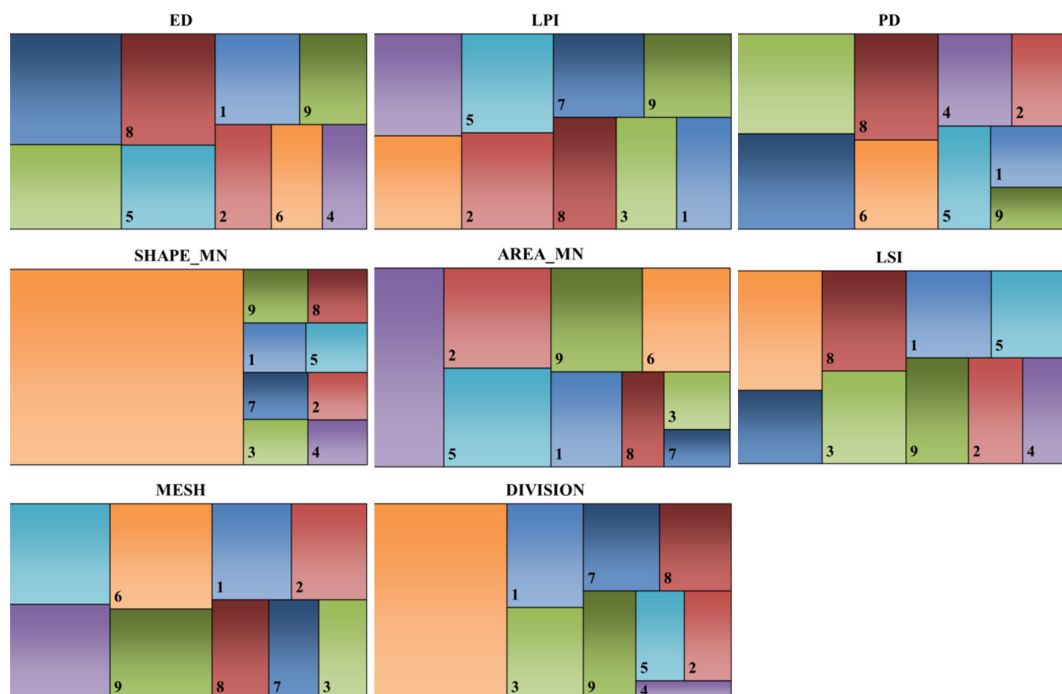
SHAPE -MN را به خود اختصاص داده است. همچنین، بیشترین میانگین سنجه‌های AREA_MN و DIVISION مربوط به گروه ۴ با پوشش بوته‌ای پراکنده با ارتفاع عمدتاً کم و متوسط (حدود ۳۱ درصد) است. ENN_MN به‌عنوان ساده‌ترین سنجه نشان‌دهنده جدایی لکه در نظر گرفته می‌شود و هر چه مقدار آن بیشتر باشد نشان‌دهنده جدایی بیشتر لکه‌هاست که در پژوهش حاضر بیشینه مقدار آن برای گروه‌های ۳، ۷ و ۸ (حدود ۹۵-۷۰ متر) به‌دست آمده است. در همین راستا، Kiyani and Fegghi (2015) در بررسی ساختار پوشش اراضی حوزه آبخیز سفیدرود، بیشترین مقدار ENN_MN را برای کاربری مرتع و کمترین میزان آن

جدول ۴- مقادیر سنجه‌های سیمای سرزمین در گروه‌های مورد بررسی

Table 4. The values of landscape metrics in the investigated groups

Group	Metric	PD	LPI	ED	LSI	AREA MN	ENN MN	DIVISION	SHAPE MN	MESH
1	Mean	29.94	0.60	0.00	1.44	10.92	52.13	54.58	2.27	9.35
	Standard Deviation	7.19	0.11	0.00	0.10	1.96	6.32	14.55	0.15	1.62
	Coefficient of variation	0.24	0.18	0.00	0.07	0.18	0.12	0.27	0.07	0.17
2	Mean	28.44	0.32	0.00	1.32	17.40	40.14	78.99	1.76	10.50
	Standard Deviation	17.22	0.32	0.00	0.19	13.52	47.19	22.26	0.63	10.21
	Coefficient of variation	0.61	0.99	0.00	0.14	0.78	1.18	0.28	0.36	0.97
3	Mean	18.75	0.53	0.00	1.37	6.18	72.53	60.66	2.38	27.10
	Standard Deviation	12.25	0.25	0.00	0.08	5.24	21.01	23.87	0.71	21.74
	Coefficient of variation	0.65	0.46	0.00	0.06	0.85	0.29	0.39	0.30	0.80
4	Mean	42.73	0.14	0.00	1.26	29.67	31.67	92.73	1.70	12.13
	Standard Deviation	22.62	0.14	0.00	0.09	34.56	38.72	7.26	0.70	14.74
	Coefficient of variation	0.53	0.99	0.00	0.07	1.16	1.22	0.08	0.41	1.22
5	Mean	45.36	0.33	0.00	1.43	17.08	53.85	80.90	2.25	9.75
	Standard Deviation	16.28	0.20	0.00	0.16	16.15	43.50	12.10	0.89	6.44
	Coefficient of variation	0.36	0.61	0.00	0.11	0.95	0.81	0.15	0.40	0.66
6	Mean	42.33	2.17	0.00	22.73	14.76	36.47	85.07	4.33	13.44
	Standard Deviation	20.21	3.27	0.00	36.70	8.84	11.31	2.56	4.23	11.05
	Coefficient of variation	0.48	1.51	0.00	1.61	0.60	0.31	0.03	0.98	0.82
7	Mean	19.51	0.50	0.64	1.41	4.00	95.27	67.79	2.66	25.97
	Standard Deviation	11.82	0.15	1.11	0.03	0.90	40.60	11.41	0.74	6.62
	Coefficient of variation	0.61	0.29	0.00	0.02	0.22	0.43	0.17	0.28	0.25
8	Mean	22.21	0.47	0.00	1.49	6.51	70.88	62.96	2.57	15.94
	Standard Deviation	11.08	0.38	0.00	0.29	1.57	37.21	37.70	0.93	3.66
	Coefficient of variation	0.50	0.80	0.00	0.19	0.24	0.53	0.60	0.36	0.23
9	Mean	36.25	0.43	1.65	1.62	15.37	41.60	65.14	2.03	6.31
	Standard Deviation	18.52	0.34	2.86	0.39	13.63	30.31	28.37	0.64	3.28
	Coefficient of variation	0.51	0.80	0.00	0.24	0.89	0.73	0.44	0.32	0.52

* The full name of the metrics has been given in Table 1.



(The size of the square from large to small indicates the values of the metrics from high to low and the numbers inside the squares indicate the groups number)

شکل ۶- تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در گروه‌های مورد بررسی

Fig. 6. The changes of landscape metrics in the study groups

پوشش گیاهی و حتی کاربری اراضی نسبت داد. در همین راستا، Stašek et al., (2023) در پژوهش خود به اثر اندازه کرت در اثرگذاری عملیات حفاظتی بر تغییرات مولفه‌های رواناب و رسوب اشاره داشتند. اگرچه طبق نتایج مندرج در جدول ۵، ارتباط معنی‌دار سنجه‌های سیمای سرزمین با همدیگر در پژوهش حاضر مورد تایید قرار گرفت که به‌وسیله سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Alaei et al., 2022; Uuema et al., 2011; Bautista et al., 2007).

یک رابطه معکوس بین سنجه‌های ED, PD, LSI و DIVISION و سه مولفه هدررفت خاک، حجم رواناب و ضریب رواناب به‌دست آمد که با یافته‌های Bautista et al., (2007) در دامنه‌های مدیترانه‌ای و Ghorbani et al., (2021) در حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی مطابقت دارد. Bautista et al., (2007) نیز بیان کردند که با درشت شدن الگوی مکانی پوشش گیاهی، میزان هدررفت خاک، حجم رواناب و ضریب رواناب افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، Ahmadi Mirghaed et al., (2018) تراکم پوشش گیاهی زیاد و مقادیر پایین هدررفت خاک

تحلیل ارتباط بین تغییرات مولفه‌های هیدرولوژیکی و سنجه‌های سیمای سرزمین:

ارزیابی میزان همبستگی میان الگوهای مکانی سیمای سرزمین، فرایندهای بوم‌شناختی و فرایندهای هیدرولوژیکی از زمان پیدایش علم بوم‌شناسی، همواره یکی از موضوعات چالش برانگیز بوده است (Carey et al., 2011; Zhang et al., 2017) که در پژوهش حاضر نیز مورد توجه قرار گرفت.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل ماتریس همبستگی (جدول ۵) نشان می‌دهد که سنجه‌های سیمای سرزمین با هدررفت خاک، حجم رواناب، ضریب رواناب و غلظت رسوب همبستگی ضعیفی دارند ($r < 0.26$ و $p > 0.10$). در حالی که در سایر مطالعات از جمله، Xu et al., (2017), Marco da Silva et al., (2015) و Chen et al., (2023)، ترکیبی از روابط معنی‌دار و غیرمعنی‌دار بین مولفه‌های فرسایش و رسوب و سنجه‌های سیمای سرزمین گزارش شده است. برخی از این عدم همخوانی نتایج را می‌توان به تفاوت در شرایط مختلف آزمایشگاهی، توپوگرافی، اقلیمی، ادافیکی،

تعداد، تراکم و اندازه بالای لکه‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در بخش‌های شمالی، تکه‌تکه‌شدگی سیمای سرزمین را مورد تایید قرار داده است.

را در بخش‌های جنوبی حوزه آبخیز گرگان‌رود نسبت به بخش‌های شمالی آن گزارش دادند که با تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین نیز در ارتباط بوده است.

جدول ۵- ضریب همبستگی سنجه‌های سیمای سرزمین و مولفه‌های رواناب و رسوب
Table 5. Correlation coefficient of landscape metrics and runoff and sediment components

	Soil loss	Runoff volume	Runoff coefficient	Sediment yield	PD	LPI	ED	LSI	AREA_MN	SHAPE_MN	ENN_MN	DIVISION	MESH
PD	-0.08	-0.15	-0.16	0.02	1.00								
P-value	0.35	0.23	0.22	0.47	0.00								
LPI	0.07	0.15	0.16	0.01	-0.29	1.00							
P-value	0.37	0.22	0.22	0.47	0.07	0.00							
ED	-0.04	-0.20	-0.21	0.08	0.73**	-0.73**	1.00						
P-value	0.42	0.16	0.15	0.35	0.00	0.00	0.00						
LSI	-0.17	-0.30	-0.32	0.09	0.64**	-0.68**	0.83**	1.00					
P-value	0.20	0.06	0.06	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00					
AREA_MN	-0.11	0.06	0.06	0.11	-0.80**	0.42*	-0.77**	-0.47**	1.00				
P-value	0.30	0.38	0.38	0.30	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00				
Shape_MN	0.02	-0.11	-0.12	0.09	0.14	-0.57**	0.34*	0.56**	-0.12	1.00			
P-value	0.45	0.29	0.28	0.32	0.25	0.00	0.04	0.00	0.27	0.00			
ENN_MN	0.26	-0.12	-0.11	0.07	0.07	-0.21	0.06	-0.04	-0.35*	0.20	1.00		
P-value	0.10	0.28	0.29	0.36	0.37	0.15	0.39	0.42	0.04	0.15	0.00		
DIVISION	-0.14	-0.18	-0.19	-0.01	0.43*	-0.87**	0.66**	0.82**	-0.34*	0.68**	0.15	1.00	
P-value	0.25	0.18	0.17	0.49	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.23	0.00	
MESH	-0.02	0.10	0.10	0.09	-0.67**	0.47**	0.53	-0.40*	0.60**	-0.19	-0.29	-0.54**	1.00
P-value	0.45	0.32	0.31	0.33	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.18	0.07	0.00	0.00

* The full name of the metrics has been given in Table 1. * and ** represent correlation at the 0.01 and 0.05 levels, respectively.

نتیجه‌گیری

مورد بررسی (دو مترمربع)، عدم تنوع زیاد در ترکیب پوشش گیاهی و یکنواختی از نظر ارتفاع پوشش گیاهی نسبت داد. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های مشابه و جامع‌تر در مقیاس‌های مختلف از کرت‌های فرسایشی و نیز حتی در مقیاس دامنه صورت بگیرد تا با در نظر گرفتن طیف وسیعی از شرایط پوشش گیاهی، توپوگرافی، اقلیمی (فصل‌های مختلف سال) و نیز رگبارهای متوالی، امکان مقایسه نتایج، انتخاب بهینه مقیاس مطالعاتی و در نهایت، برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت و حفاظت از پوشش گیاهی و منابع آب و خاک فراهم شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه افرادی که در ارتقای کیفیت مقاله نقش موثری ایفا کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

استفاده از سنجه‌های کمی، در تحلیل ویژگی‌های سیمای سرزمین و فرایندهای هیدرولوژیکی و بهینه‌سازی کاربری‌های مختلف یک حوزه آبخیز با هدف دستیابی به توسعه پایدار ضروری است. سنجه‌های سیمای سرزمین در مقیاس آبخیز، تحت تاثیر ناهمگونی‌هایی مانند توپوگرافی، شیب، کاربری اراضی، مناطق ذخیره رسوب، انتقال در شبکه زهکشی و نیز اثرات متقابل آن‌ها قرار می‌گیرند که این تغییرات در مقیاس کرت، چندان تاثیرگذار نخواهد بود. لذا، فرض بر این بود که تاثیر سنجه‌های مرتبط با پوشش گیاهی بر پاسخ رواناب و رسوب، بهتر قابل ارزیابی باشد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین، تحت ترکیب‌های مختلف پوشش گیاهی مرتعی در مقیاس کرت صحرایی انجام شد. ضمن تایید تغییرات مولفه‌های هیدرولوژیکی مختلف و سنجه‌های مورد بررسی، نتایج همبستگی اسپیرمن ارتباط معنی‌داری بین آن‌ها نشان نداد. این عدم همبستگی معنی‌دار را می‌توان به کوچک بودن مقیاس کرت‌های

تعارض منافع

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

منابع مورد استفاده

- Abbasi Khalaki, M., 2018. Locating for capable dryland farming lands to restoration and the effect of nano potassium silicate and other facilitators on the establishment of some rangeland species. PhD Thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil (in Persian).
- Aghabeigi, N., Esmali Ouri, A., Mostafazadeh, R., Golshan, M., 2020. The effects of climate change on runoff and suspended sediment values in some watersheds of Ardabil Province. *J. Geogr. Reg. Plan.* 24(73), 47-66 (in Persian).
- Ahmadi Mirghaed, F., Souri, B., Mohammadzadeh, M., Salmanmahiny, A.R., Mirkarimi, S.H., 2018. Evaluation of the relationship between soil erosion and landscape metrics across Gorgan Watershed in northern Iran. *Environ. Monit. Assess.* 190, 643.
- Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., Hazbavi, Z., Sharari, M., Huang, G., 2022. Spatial comparative analysis of landscape fragmentation metrics in watershed with diverse land uses in Iran. *Sustainability* 14, 14876.
- Alavizadeh, F., Naseri, K., Golkarian, A., Tavili, A., 2014. The study of biological soil crust (mosses) roles in protection of surface soil in front of water erosion, case study: Rangelands around Torogh Dam in Khorasan Razavi Province. *J. Range Watershed Manage.* 67(1), 83-92.
- Arabkhedri, M., Shadfar, S., Jafari-Ardakani, A., Bayat, R., Khajavi, E., Mahdian, M.H., 2018. Improving water erosion estimates for Iran. *Watershed Manage. Res.* 120, 13-27 (in Persian).
- Baude, M., Meyer, B.C., Schindewolf, M., 2019. Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services. *Sci. Total Environ.* 659, 1526-1536.
- Bautista, S., Mayor, A.G., Bourakhouadar, J., Bellot, J., 2007. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid Mediterranean landscape. *Ecosystems* 10, 987-998.
- Bihanta, M., Zare Chahooki, M., 2010. Principles of statistics for the natural resources science. Tehran University Press, Tehran, 300 pages (in Persian).
- Brini, I., Alexakis, D.D., Kalaitzidis, C., 2021. Linking soil erosion modeling to landscape patterns and geomorphometry: an application in Crete, Greece. *Appl. Sci.* 11(12), 5684.
- Carey, R.O., Migliaccio, K.W., Li, Y., Schaffer, B., Kiker, G.A., Brown, M.T., 2011. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida. *Ecol. Indic.* 11(5), 1093-1104.
- Chen, C., Zhao, G., Zhang, Y., Bai, Y., Tian, P., Mu, X., Tian, X., 2023. Linkages between soil erosion and long-term changes of landscape pattern in a small watershed on the Chinese loess plateau. *Catena* 220, 106659.
- Cheng, Q., Ma, W., Cai, Q., 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the loess plateau, North China. *GeoJournal* 71(2), 117-125.
- Duley, F.L., Hays, O.E., 1932. The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion. *J. Agric. Res.* 45, 349-360.
- Eslami, S.F., Vaezi, A.R., 2015. Runoff and sediment production under the similar rainfall events in different aggregate sizes of an agricultural soil. *J. Water Soil* 29(6), 41-58 (in Persian).
- Ferreira, C.S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., Kalantari, Z., 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: processes, status and consequences. *Sci. Total Environ.* 805, 150106.
- Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., De Jong, B.H.J., Huerta-Lwanga, E., Hernández-Daumas, S., 2009. Effects of land-use change on some properties of tropical soils-An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151(3-4), 87-97.
- Ghorbani, A., Hazbavi, Z., Mostafazadeh, R., Alaei, N., 2021. Analysis the relationship between landscape metrics and soil erosion of KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. *J. Geo. Environ. Hazards* 9(36), 41-58 (in Persian).
- Gioia, D., Minervino Amodio, A., Maggio, A., Sabia, C.A., 2021. Impact of land use changes on the erosion processes of a degraded rural landscape: an analysis based on high-resolution DEMs, historical images and soil erosion models. *Land* 10(7), 673.
- Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., Younesi, H., 2012. Analysis and assessing affectability of runoff components from different levels of polyacrylamide. *J. Water Soil Resour. Conserv.* 2(2), 1-12 (in Persian).

- Hu, C., Ran, G., Li, G., Yu, Y., Wu, Q., Yan, D., Jian, S., 2021. The effects of rainfall characteristics and land use and cover change on runoff in the Yellow River Basin, China. *J. Hydrol. Hydromech.* 69(1), 29-40.
- Kalehhouie, M., Kavian, A., Gholami, L., Jafarian, Z., 2018. Protective impact of colza straw (*Brassica napus* L.) on runoff and soil loss control using rainfall simulation. *J. Watershed Manag. Res.* 31(1), 73-82 (in Persian).
- Kalehhouie, M., Kavian, A., Gholami, L., Jafarian, Z., 2020. Influence of start time and coefficient of runoff to application of organic mulch under small laboratory plots. *Iran Watershed Manag. Sci. Engin.* 13(47), 9-17.
- Karami, A., Fegghi, J., 2011. Investigating the of landscape metrics in preserving land use patterns, case study: Kohgiluyeh and Boyerahmad Province. *Ecology* 2(60) 79-88 (in Persian).
- Katebikord, A., Khaledi Darvishan, A., Alavi, S.J., 2018. Effects of rainfall duration on hydrological response of field plots under rainfall simulation. *J. Watershed Manag. Res.* 9(17), 49-56 (in Persian).
- Kavian, A., Mohammadi, M., Fallah, M., Gholami, L., 2016. Effect of wheat straw on changing time to runoff and runoff coefficient in laboratory plots under rainfall simulation. *J. Water Soil Resour. Conserv.* 5(2), 73-82 (in Persian).
- Kiyani, V., Fegghi, J., 2015. Investigation of cover/land use structure of sefidrod watershed by landscape ecology metrics. *J. Environ. Sci. Tech.* 17(2), 131-141.
- Kukul, S.S., Sarkar, M., 2011. Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 59, 87-93.
- Lassu, T., Seeger, M., Peters, P., Keesstra, S.D., 2015. The Wageningen rainfall simulator: set-up and calibration of an indoor nozzle-type rainfall simulator for soil erosion studies. *Land Degrad. Dev.* 26(6), 604-612.
- Li, J., Zhou, Y., Li, Q., Yi, S., Peng, L., 2021. Exploring the effects of land use changes on the landscape pattern and soil erosion of Western Hubei Province from 2000 to 2020. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 19(3), 1571.
- Liu, X., Zhang, Y., 2022. Landscape analysis of runoff and sedimentation based on land use/cover change in two typical watersheds on the loess plateau, China. *Life* 12, 1688.
- Marco da Silva, A., Huang, C.H., Francesconi, W., Saintil, T., Villegas, J., 2015. Using landscape metrics to analyze micro-scale soil erosion processes. *Ecol. Indic.* 56, 184-193.
- Marques, M.J., Bienes, R., Jiménez, L., Pérez-Rodríguez, R., 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events, rainfall simulation over USLE plots. *Sci. Total Environ.* 378(1-2), 161-165.
- McGarigal, K., 2001. Landscape metrics for categorical map patterns. http://www.umass.edu/landeco/teaching/landscape_ecology/schedule/chapter9_metrics.pdf (accessed 10 April 2023).
- McGarigal, K., Ene, E., 2013. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Meyer, L.D., Harmon, W.C., 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am.* 48, 1152-1157.
- Morgan, R.P.C., 2005. *Soil erosion and conservation*. 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 304 pages.
- Munoth, P., Goyal, R., 2020. Impacts of land use land cover change on runoff and sediment yield of Upper Tapi River sub-basin, India. *Int. J. River Basin Manag.* 18(2), 177-189.
- Rahmani, N.K.F., Esmaeli Ouri, A., Hazbavi, Z., Kalehhouei, M., Ahmadi, M., Mostafazadeh, R., 2021. Simulating the vegetation type effect on hydrological response at field plot scale. 10th International Conference on Rainwater Catchment Systems, University of Kurdistan (in Persian).
- Rahmani Naneh Karan, F., Esmaeli Ouri, A., Kalehhouei, M., Ahmadi, M., Mostafazadeh, R., Hazbavi, Z., 2022. The changeability of runoff and sediment components from different compositions and percentages of vegetation. *Environ. Erosion Res. J.* 12(4), 158-173.
- Raines, G.L., 2002. Description and comparison of geologic maps with FRAGSTATS-a spatial statistics program. *Comput. Geosci.* 28(2), 169-177.
- Rodrigo-Comino, J., Keesstra, S., Cerdà, A., 2018. Soil erosion as an environmental concern in vineyards: the case study of Celler del Roure, Eastern Spain, by means of rainfall simulation experiments. *Beverages* 4(2), 31.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4), 591-611.

- Stašek, J., Krása, J., Mistr, M., Dostál, T., Devátý, J., Středa, T., Mikulka, J., 2023. Using a rainfall simulator to define the effect of soil conservation techniques on soil loss and water retention. *Land* 12, 431.
- Tan, Z., Leung, L.R., Li, H.Y., Cohen, S., 2022. Representing global soil erosion and sediment flux in Earth System Models. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 14, e2021MS002756.
- Uuemaa, E., Roosaare, J., Oja, T., Mander, U., 2011. Analysing the spatial structure of the Estonian landscapes: which landscape metrics are the most suitable for comparing different landscapes? *Estonian J. Ecol.* 60, 70-80.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P.J., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecol.* 15, 579-591.
- Wynants, M., Solomon, H., Ndakidemi, P., Blake, W.H., 2018. Pinpointing areas of increased soil erosion risk following land cover change in the Lake Manyara Catchment, Tanzania. *Int J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 71, 1-8.
- Xu, Y., Tang, H., Wang, B., Chen, J., 2017. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in the North China. *Nat. Hazards* 87, 1567-1585.
- Zhang, Sh., Fan, W., Li, Y., Yi, Y., 2017. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Sci. Total Environ.* 574, 34-45.
- Zhao, B., Zhang, L., Xia, Z., Xu, W., Liang, Y., Xia, D., 2019. Effects of rainfall intensity and vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope. *Hindawi Adv. Civ. Eng.* 7043428, 14.
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen J., 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75(3), 319-325.

