



Evaluating the effect of watershed management measures on soil erosion and runoff production at the plot and watershed scales in Kakhk Paired Watersheds

Hamzeh Noor^{1*}, Mahmood Arabkhedri² and Yahya Parvizi³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Khorasan Agricultural and Natural Resources Research Centre, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

² Professor. Water and Soil Conservation Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

³ Associate Professor, Water and Soil Conservation Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 18 December 2022

Accepted: 21 February 2023

Extended abstract

Introduction

Implementation of watershed management measures in Iran to reduce the damage caused by the misuse of natural resources has begun many years ago and is still ongoing. Evaluating the performance of previous remedial work is essential for better planning of future watershed management projects. In this regard, due to the monitoring of soil loss, runoff and sedimentation at slope and watershed scales, a suitable platform has been provided to assess the effects of watershed management measures.

Material and methods

The Kakhk paired watershed with an area of 217 ha is located at a distance of 300 km from Mashhad City and 35 km southwest of Gonabad City. The Kakhk paired watershed consists of two sub-watersheds, the control and the treatment. A series of biological and structural watershed management measures have been implemented in the treatment sub-watershed. While the control sub-watershed is exploited according to the custom of the region. In this research, the impact of different watershed management measures on the soil loss, sediment yield and hydrology in the Kakhk paired watershed were evaluated. For this purpose, the recorded data of suspended sediment and discharge at the watershed scale, as well as the data of soil loss (by standard plots and erosion pins) and runoff (standard plots) were analyzed at the hillslope scale.

Results and discussion

The results at plot scale showed that the average annual soil loss of the two treatment and control sub-watersheds is 0.05 and 0.27 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$, respectively. These results indicate that the soil loss in the control sub-watershed is 536% higher than the treatment sub-watershed. The amount of runoff yield in the control sub-watershed was calculated to be 138% more than the treatment sub-watershed. At watershed scale, the results showed that the total amount of suspended sediment output from the control and treatment watersheds is 379 and 85 tons, respectively, which indicates the average specific sediment of 0.4 and 0.1 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ in the control and treatment watersheds, respectively. The volume of

* Corresponding author: h.noor@areeo.ac.ir

runoff in the control sub-watershed is 1.3 times more than treatment sub-watershed. On the other hand, despite the difference between the treatment and control sub-watersheds in soil loss, run-off production and sediment yield, the role of maximum events in soil erosion and runoff production in both sub-watersheds is very significant. So that one to three erosive events in both studied sub-watershes are responsible for more than 80% of the soil loss in the slopes and the production of runoff and sediment yield of watersheds.

Conclusion

The results showed that a total of 136,000 m³ of runoff storage and 294 ton of suspended sediment control were achieved as a result of watershed operations in the treatment sub-watershed. Therefore, it can be stated that the watershed management measures carried out in the treatment sub-watershed on the one hand have reduced soil erosion and runoff production on the slopes compared to the control sub-watershed. This action has been done through increasing the vegetation, increasing the roughness of the land surface, reducing the carrying capacity of the flow and settling the materials being transported. Further, the flow from the slopes enters the waterway and is kept by watershed management structures, and as a result, the sediment yield and volume of runoff in the treatment sub-watershed is less than the control sub-watershed.

Keywords: Effectivness, Gabion dam, Paired watershed, Soil and water conservation, Suspended sediment

Cite this article: Noor, H., Arabkhedri, M., Parvizi, Y., 2024. Evaluating the effect of watershed management measures on soil erosion and runoff production at the plot and watershed scales in Kakhk Paired Watersheds. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 16-32.

© 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>)



ارزیابی اثر اقدامات آبخیزداری بر فرسایش خاک و تولید رواناب در مقیاس کرت و آبخیز زوجی کاخک

حمزه نور^{۱*}، محمود عرب‌خردی^۲ و یحیی پرویزی^۳

^۱ استادیار بخش حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

چکیده مبسوط

مقدمه

اجرای اقدامات آبخیزداری در ایران، به‌منظور کاهش خسارات ناشی از استفاده نامناسب انسان از منابع طبیعی از سال‌ها پیش آغاز شده است و اکنون نیز ادامه دارد. برای برنامه‌ریزی‌های آتی طرح‌های اجرایی آبخیزداری، ارزیابی عملکرد اقدامات گذشته، امری ضروری است. در این راستا، حوزه‌های آبخیز زوجی با توجه به نحوه اجرای اقدامات آبخیزداری در آن‌ها و همچنین، وجود تجهیزات اندازه‌گیری هدررفت خاک، رواناب و رسوبدهی در مقیاس دامنه و حوزه آبخیز، کمک زیادی در ارزیابی اثرات اقدامات آبخیزداری می‌نمایند.

مواد و روش‌ها

حوضه زوجی کاخک، با مساحت ۲۱۷ هکتار در فاصله ۳۰۰ کیلومتری از شهر مشهد و ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهر گناباد واقع شده است. حوضه زوجی کاخک از دو زیرحوضه شاهد و نمونه تشکیل شده است. در حوضه نمونه، مجموعه ای از اقدامات بیولوژیک و سازه‌ای اجرا شده است، در حالی که زیرحوضه شاهد طبق عرف منطقه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در این پژوهش، تاثیر اقدامات مختلف آبخیزداری بر وضعیت هدررفت خاک، رسوبدهی و هیدرولوژی در حوضه زوجی کاخک گناباد مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های ثبت شده رسوب معلق و دبی در مقیاس حوضه و همچنین، داده‌های هدررفت خاک (به‌وسیله کرت استاندارد و میخ فرسایشی) و تولید رواناب (کرت‌های استاندارد) در مقیاس دامنه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج بررسی‌های صورت گرفته در مقیاس کرت نشان داد که متوسط سالانه هدررفت خاک دو زیرحوضه نمونه و شاهد به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۲۷ تن بر هکتار در سال است. این نتایج دلالت بر آن دارد که میزان هدررفت خاک در زیرحوضه شاهد ۵۳۶ درصد بیشتر از زیرحوضه نمونه است. میزان تولید رواناب در مقیاس کرت نیز در زیرحوضه شاهد ۱۳۸ درصد بیشتر از زیرحوضه نمونه محاسبه شد. در مقیاس حوضه‌ای نیز نتایج نشان داد که مقدار کل رسوب معلق خروجی از حوضه‌های شاهد و نمونه طی دوره مورد بررسی به‌ترتیب ۳۷۹ و ۸۵ تن است، که نشان‌دهنده متوسط رسوبدهی ویژه

۰/۴ و ۰/۱ تن در هکتار، به ترتیب در حوضه‌های شاهد و نمونه است. حجم رواناب نیز در زیرحوضه شاهد ۱/۳ برابر زیرحوضه نمونه ثبت شده است. در نهایت، بررسی زمان شروع رواناب نیز نشان داد که در زیرحوضه نمونه، به طور متوسط رواناب ۱۳۲ دقیقه دیرتر از زیرحوضه شاهد به خروجی حوضه می‌رسد. از سوی دیگر، با وجود تفاوت زیرحوضه‌های نمونه و شاهد در هدررفت خاک، تولید رواناب و رسوبدهی، نقش وقایع حداکثری در فرسایش خاک و تولید رواناب هر دو زیرحوضه بسیار چشم‌گیر است. به طوری که یک تا سه واقعه فرساینده در هر دو زیرحوضه مورد مطالعه، مسئول بیش از ۸۰ درصد هدررفت خاک در دامنه‌ها و تولید رواناب و رسوبدهی حوضه‌ها هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در مجموع حدود ۱۳۶ هزار متر مکعب ذخیره رواناب و ۲۹۴ تن کنترل رسوب معلق، در اثر عملیات آبخیزداری در زیرحوضه نمونه صورت پذیرفته است. بنابراین، می‌توان بیان کرد که اقدامات آبخیزداری انجام شده در زیرحوضه نمونه، باعث کاهش فرسایش خاک و تولید رواناب در سطح دامنه‌ها نسبت به زیرحوضه شاهد شده است. این عمل از طریق افزایش پوشش گیاهی، افزایش زبری سطح زمین، کاهش توان حمل جریان و ترسیب مواد در حال حمل صورت گرفته است. در ادامه، جریان از دامنه‌ها وارد آبراهه شده و به وسیله سازه‌های آبخیزداری، جریان رواناب نگه داشته شده و در نتیجه، میزان رسوبدهی و حجم رواناب زیرحوضه نمونه کمتر از زیرحوضه شاهد است.

واژه‌های کلیدی: اثربخشی، اقدامات سازه‌ای، حفاظت آب و خاک، حوضه آزمایشی، رسوب معلق

مقدمه

زوجی نوعی آزمایشگاه میدانی هستند که برای بررسی اثرات تیمارهای مختلف حفاظت خاک و آبخیزداری به کار می‌روند. حوضه‌های زوجی، از دو زیرحوضه نمونه و شاهد تشکیل شده‌اند. این دو زیرحوضه از نظر مساحت، توپوگرافی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، خاک، شیب، فرسایش، آب و هوا و غیره تا حد امکان یکسان هستند (Soleimani et al., 2021).

در یکی از زیرحوضه‌ها، شرایط ثابت باقی می‌ماند و به روش‌های متداول، هر منطقه مورد بهره‌برداری کشاورزی و چرای دام قرار می‌گیرد. این آبخیز کوچک، به عنوان زیرحوضه شاهد در نظر گرفته می‌شود (Organization of Forests and Rangelands and Watershed Management, 2020). در زیرحوضه دیگر، تغییراتی با اعمال روش‌ها و تکنیک‌های آبخیزداری صورت می‌گیرد و اثرات آن‌ها مطالعه می‌شود که زیرحوضه نمونه خوانده می‌شود. در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد، پایش و اندازه‌گیری فرسایش خاک، تولید رواناب، رسوبدهی، خصوصیات پوشش گیاهی و غیره، به صورت منظم صورت می‌گیرد.

افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به منابع جدید، موجب فشار مضاعف بر منابع طبیعی و تخریب آن شده است، به گونه‌ای که تخریب منابع طبیعی یکی از معضلات قرن حاضر است (Vafakhah and Mohseni, 2011; Saravi, 2011; Seppelt et al., 2013; Noor et al., 2017). فرسایش خاک، سیل‌خیزی و آلودگی منابع آب بخشی از نتایج استفاده نامناسب منابع طبیعی هستند. در این راستا، آبخیزداری با استفاده از مجموعه اقدامات سازه‌ای، زیستی و مدیریتی به دنبال بهبود شرایط هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز با توجه به وضعیت اقتصادی و اجتماعی ذی‌نفعان^۱ است (Sadoddin et al., 2010; Noot et al., 2020).

تحقیقات مختلفی در زمینه اثرگذاری اقدامات آبخیزداری بر هدررفت خاک، رسوبدهی و تولید رواناب گزارش شده است. اغلب این تحقیقات با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک (Fazli and Noor, 2017; Ghermezcheshmeh et al., 2019) و یا مقایسه دوره قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری (Sadeghi et al., 2006)، صورت گرفته‌اند. در این میان، حوضه‌های

¹ Stakeholders

غربی شهر گناباد در بخش کاخک از شهرستان گناباد واقع شده است. این حوضه، از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز شهید مهدی نوری کاخک بوده است و در فاصله هفت کیلومتری جنوب غربی شهر کاخک قرار دارد (Organization of Forests and Rangelands and Watershed Management, 2020). حوزه آبخیز زوجی کاخک، بخشی از حوضه کویر نمک ایران بوده، هم مرز با خراسان جنوبی و جزئی از سیاه کوه است (شکل ۱).

حوضه زوجی، شامل دو زیرحوضه نمونه به مساحت ۱۰۶/۵ هکتار و زیرحوضه شاهد به مساحت ۱۱۰/۶ هکتار است. شکل هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد کشیده هستند. اقلیم حوضه زوجی کاخک گناباد، به روش آمبرژه و دومارتن به ترتیب نیمه خشک سرد و نیمه خشک، برآورد شده است.

حوضه زوجی کاخک از نظر زمین‌شناسی تماماً روی تشکیلات شمشک قرار دارد. سازند شمشک خود از شیل‌های سیلتی تا ماسه‌ای خاکستری رنگ همراه با ماسه سنگ و برش‌های آتشفشانی و گابرو تشکیل شده است (Organization of Forests and Rangelands and Watershed Management, 2020). طول آبراهه اصلی در زیرحوضه نمونه و شاهد به ترتیب ۱/۸۱ و ۱/۸۷ کیلومتر است. شیب متوسط در این دو زیرحوضه نیز به ترتیب ۵۲/۹ و ۵۵/۴ درصد است. در نهایت، زمان تمرکز زیرحوضه نمونه ۰/۶۱ ساعت و برای زیرحوضه شاهد ۰/۵۴ است (Organization of Forests and Rangelands and Watershed Management, 2020).

کاربری اراضی غالب در زیرحوضه نمونه، به ترتیب مرتع (۹۱/۵)، نهال‌کاری (۴/۵ درصد) و بستر آبراهه‌ها (۴/۰ درصد) است. در زیرحوضه شاهد نیز مرتع (۹۵/۱ درصد)، دیم‌کاری (۲/۰ درصد) و باغات (۱/۰ درصد) را شامل می‌شوند. در زیرحوضه نمونه ۴/۲ هکتار بانکت‌بندی به همراه نهال‌کاری، ۱۰۲/۳ هکتار کپه‌کاری، ۱۹ بندگابیونی و هفت بند خشک‌چین اجرا شده است.

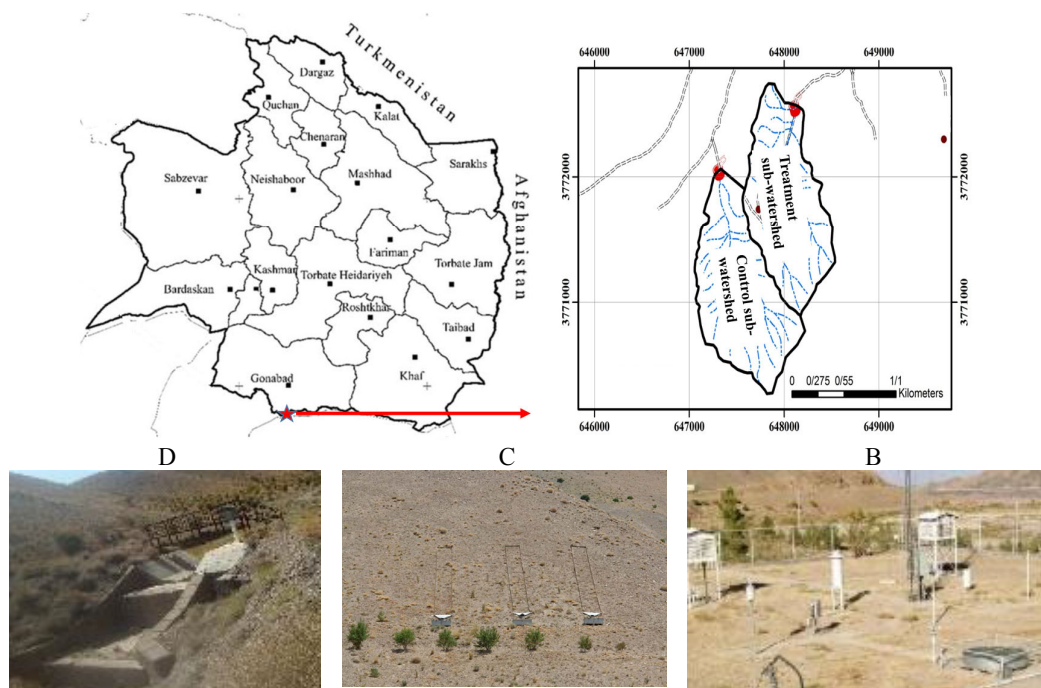
تحقیقات متعددی به مقایسه رسوبدهی حوضه‌ای (Ebling et al., 2021; Ehabu et al., 2018)، فرسایش خاک در دامنه‌ها (Eshghizadeh et al., 2015)، تولید رواناب (Ebling et al., 2021)، خصوصیات خاک و پوشش گیاهی (Aghabeygi and Fatahi, 2017) و تبخیر و تعرق در حوضه‌های زوجی در مناطق مختلف پرداخته‌اند. با این حال ضروری است، مطالعه جامعی در حوزه‌های آبخیز زوجی، با هدف مقایسه هم‌زمان هدررفت خاک در دامنه‌ها، رسوبدهی حوضه‌ای و تولید رواناب طرح‌ریزی شود.

حدود دو دهه از تجهیز حوضه زوجی کاخک گناباد می‌گذرد و در این مدت، ابزار و کارشناسان مختلفی به‌منظور پایش مولفه‌های متنوع هیدرولوژی، فرسایش خاک و پوشش گیاهی در منطقه مستقر شده‌اند. به‌گونه‌ای که طی این مدت اطلاعات هواشناسی (مهم ترین آن بارش ساعتی، روزانه و ماهانه)، آب‌سنجی، رسوب حوضه، هدررفت خاک در سطح دامنه، نفوذپذیری و پوشش گیاهی به‌نحوی ثبت شده‌اند.

بنابراین، بستر مناسبی به‌منظور ارزیابی اثر اقدامات مدیریتی و سازه‌ای آبخیزداری بر هدررفت خاک، رسوبدهی و تولید رواناب در مقیاس دامنه و آبخیز کوچک فراهم شده است. در این راستا، پژوهش حاضر در نظر دارد تا اثر اقدامات مدیریت چرا (قرق زیرحوضه نمونه) بر هدررفت خاک و تولید رواناب در مقیاس دامنه و همچنین، اثرات اقدامات سازه‌ای و مدیریتی (قرق) بر رسوبدهی و تولید رواناب در مقیاس آبخیز را در حوضه زوجی کاخک گناباد، مورد بررسی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوضه زوجی کاخک با مساحت ۲۱۷/۱ هکتار، در جنوب استان خراسان رضوی بین طول جغرافیایی ۳۷° ۳۵' ۵۸" تا ۴۱° ۳۶' ۵۸" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴° ۰۳' ۴۶" تا ۳۴° ۰۵' ۰۶" شمالی قرار دارد. این آبخیز، در فاصله ۳۰۰ کیلومتری از شهر مشهد و ۳۵ کیلومتری جنوب



شکل ۱- موقعیت حوضه زوجی کاخک گناباد در استان خراسان رضوی (الف)، ایستگاه هواشناسی (ب)، کرت‌های فرسایشی حوضه شاهد (ج) و ایستگاه هیدرومتری زیرحوضه نمونه (د)

Fig. 1. The location of the Kakhk paired watershed in Khorasan Razavi Province (a), the meteorological station (b), the erosion plots of control sub-watershed (c) and the hydrometric station of treatment sub-watershed (d)

شرقی و شمالی وجود دارد که در هر یک از این محدوده‌ها، سه کرت احداث شده است. به عبارتی در زیرحوضه‌های نمونه و شاهد در مجموع تعداد ۱۸ کرت به ابعاد ۲۴ متر طول و ۱/۸۳ متر عرض و مخزن با ابعاد دو متر طول، یک متر عرض و ۰/۵ متر ارتفاع ساخته و نصب شده است. لازم به توضیح است که زیرحوضه نمونه، قرق بوده است، در نتیجه کرت‌های مستقر در این حوضه تحت چرای دام قرار نمی‌گیرد. با این حال، در زیرحوضه شاهد، چرای دام‌ها معنی ندارد و دام‌ها به صورت آزادانه از علوفه مراتع تغذیه می‌کنند. بنابراین، در این شرایط امکان بررسی اثر قرق مرتع به‌عنوان یک اقدام مدیریتی، بر هدررفت خاک و تولید رواناب وجود دارد. مقدار رواناب و رسوب به‌صورت ماهانه ثبت و اندازه‌گیری شده است.

میخ‌های فرسایشی در حوضه زوجی کاخک:
میخ‌های فرسایشی در سال ۱۳۷۸ به تعداد ۴۸۶ میخ در سه میدان به ابعاد نه متر طول و نه متر عرض در مجاورت محدوده کرت‌های فرسایشی در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد ساخته و نصب شده است. این میخ‌ها در یک شبکه با فاصله یک متر قرار گرفته‌اند و

روش انجام تحقیق: به‌منظور انجام پژوهش حاضر، لازم است تا اثر اقدامات آبخیزداری در مقیاس دامنه بر تولید رواناب و فرسایش خاک و همچنین، در مقیاس حوضه بر رسوبدهی و تولید رواناب مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، تمامی گزارش‌ها و داده‌های ثبت شده تا ابتدای سال ۲۰۲۰ (سال انجام پژوهش حاضر) جمع‌آوری شدند. در مقیاس دامنه، مقادیر رواناب تولیدی به‌وسیله کرت فرسایشی و هدررفت خاک به‌وسیله کرت و میخ فرسایشی در دو زیرحوضه نمونه و شاهد ثبت می‌شوند (این داده‌ها تا سال ۲۰۱۷ ثبت شده است). همچنین، برای ارزیابی اثرات اقدامات آبخیزداری در مقیاس حوضه‌ای نیز از داده‌های ثبت شده رواناب و رسوب در فلوم موجود در خروجی حوضه‌های نمونه و شاهد استفاده شد (این داده‌ها تا سال ۲۰۱۷ ثبت شده است). در ادامه توضیحاتی در زمینه فلوم، کرت و میخ فرسایشی در حوضه زوجی کاخک ارائه می‌شود.

کرت‌های فرسایشی در حوضه زوجی کاخک: در هر کدام از زیرحوضه‌های نمونه و شاهد، سه محدوده اندازه‌گیری فرسایش در سه جهت اصلی منطقه غربی،

واقعه که در حوضه‌های نمونه و شاهد دارای بیشترین رسوبدهی و دبی اوج بودند نیز انتخاب و تحلیل شدند. (ب) مقایسه داده‌ها در مقیاس کرت: برای این منظور، مقایسه مولفه‌های حجم رواناب، هدررفت خاک با استفاده از کرت و هدررفت خاک با استفاده از میخ‌های فرسایشی مربوط به حوضه‌های نمونه و شاهد، مد نظر قرار گرفت. این مقایسه‌ها با استفاده از میانگین داده‌ها (درصد تفاوت در دو حوضه) و آزمون t صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

ارزیابی بارش‌های حداکثری: به‌منظور شناخت بهتر وضعیت هیدرولوژیک منطقه، در ابتدا ویژگی‌های بارش‌های ثبت شده در ایستگاه باران‌سنجی حوضه زوجی ارائه می‌شود. نتایج بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، ۴۰ روز در سال بارندگی در منطقه ثبت شده است. در این میان، بارش‌ها اغلب زیر ۱۰ میلی‌متر (مقدار روزانه بارش) به وقوع پیوسته که به طور متوسط ۳۴ روز در سال را به خود اختصاص داده است. همچنین، بارش‌های بیش از ۱۰، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر به‌طور متوسط ۴/۲، ۱/۷ و ۰/۱ روز در سال است. در نهایت، داده‌های ۱۰ بارش بیشینه ثبت شده در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱، ارائه شده است.

در هر میدان نیز ۸۱ میخ فرسایشی وجود دارد. از آنجایی‌که فرایند فرسایش خاک باعث تغییر سطح خاک به‌صورت کاهش عمق در منطقه برداشت و افزایش عمق در محل رسوبگذاری می‌شود، به‌صورت نظری می‌توان با ثبت این تغییرات، حجم خاک منتقل شده را برآورد کرد (Boardman and Favis-Mortlock, 2016). اندازه‌گیری ارتفاع بخش بیرون از خاک میخ‌ها، ماهانه با دقت نیم میلی‌متر صورت پذیرفته است.

ایستگاه هیدرومتری در حوضه زوجی کاخک: دو

ایستگاه هیدرومتری در محل فلوم انتهای حوضه‌های نمونه و شاهد (با ظرفیت پنج متر مکعب) احداث شده است. در این ایستگاه‌ها دبی جریان از سال ۲۰۰۹ تا کنون اندازه‌گیری شده است. هم‌زمان با وقوع جریان، نمونه‌برداری از رسوب معلق نیز در محل فلوم طی دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ انجام شده است.

در نهایت، پس از جمع‌آوری داده‌ها، ارزیابی‌ها به صورت زیر مد نظر قرار گرفت:

الف) مقایسه داده‌ها در مقیاس حوضه آبخیز: برای این منظور، مقایسه مولفه‌های حجم رواناب، دبی اوج آب‌نمود، زمان شروع رواناب و رسوبدهی مربوط به حوضه‌های نمونه و شاهد مد نظر قرار گرفت. این مقایسه‌ها با استفاده از میانگین داده‌ها (درصد تفاوت در دو حوضه) و آزمون t، صورت پذیرفت. همچنین، پنج

جدول ۱- ۱۰ بارش بیشینه ثبت شده در حوضه زوجی کاخک

Table 1. The ten maximum rainfalls recorded in the Kakhk paired watershed

No	Date	Maximum of daily rainfall (mm)	The relative share of the rainfall from the total rainfall of the corresponding year (%)	Maximum intensity (mm.hr ⁻¹)
1	2017.02.17	53.5	17.5	9.6
2	2012.02.02	46.6	16.3	14.4
3	2012.02.26	39.8	13.9	6.0
4	2016.01.02	37.8	21.8	12.1
5	2018.02.25	37.3	15.5	-
6	2017.01.02	29.7	9.7	12.0
7	2013.02.14	28.4	15.4	6.6
8	2017.02.13	27.1	8.9	13.8
9	2013.02.01	26.5	14.3	8.4
10	2017.03.20	25.8	8.4	18.6

متوسط بارش منطقه (۲۲۶ میلی‌متر در ایستگاه هواشناسی) دارای سهم ۲۳ درصدی است. در این میان، بارش ۲ فوریه ۲۰۱۲ دارای رتبه دوم مقدار بارش و رتبه اول شدت بارش در این جدول است. بیشینه هدررفت

همان‌گونه که در جدول ۱، مشاهده می‌شود، بیشینه بارش‌های ۲۴ ساعته ثبت شده در این منطقه مربوط به فصل زمستان هستند. همچنین، بیشینه بارش ۲۴ ساعته ثبت شده، ۵۳/۵ میلی‌متر است که نسبت به

مقایسه تولید رواناب در حوضه‌های نمونه و

شاهد: حجم رواناب تولیدی سالانه دو زیرحوضه نمونه و شاهد در جدول ۲، ارائه شده است. طی این دوره، ۳۲ واقعه رواناب در زیرحوضه شاهد و ۱۱ واقعه نیز در زیرحوضه نمونه ثبت شده است. اولین واقعه رواناب در زیرحوضه شاهد در تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۰۹ ثبت شده است. با این حال، در زیرحوضه نمونه تا فوریه ۲۰۱۲ هیچ‌گونه روانابیی ثبت نشده است که دلیل این امر نیز مقدار کم رواناب ۱۰ واقعه طی دوره ۲۰۰۹ تا فوریه ۲۰۱۲ و وجود سازه‌های آبخیزداری در زیرحوضه نمونه است.

خاک و تولید رواناب در دامنه‌ها و همچنین، خروجی زیرحوضه‌های نمونه و شاهد در این واقعه ثبت شده است.

نتایج بررسی داده‌های بارش مندرج در جدول ۱، نشان‌دهنده آن است که ۱۰ واقعه بیشینه بارش طی فصل زمستان در منطقه روی داده است. طی این فصل، پوشش گیاهی در کمینه مقدار خود است و در ابتدای رشد سالانه قرار دارد. بنابراین، پوشش گیاهی ناچیز در کنار بارش‌های شدید در این فصل باعث وقوع سیلاب‌های حداکثری در زیرحوضه نمونه و شاهد شده است.

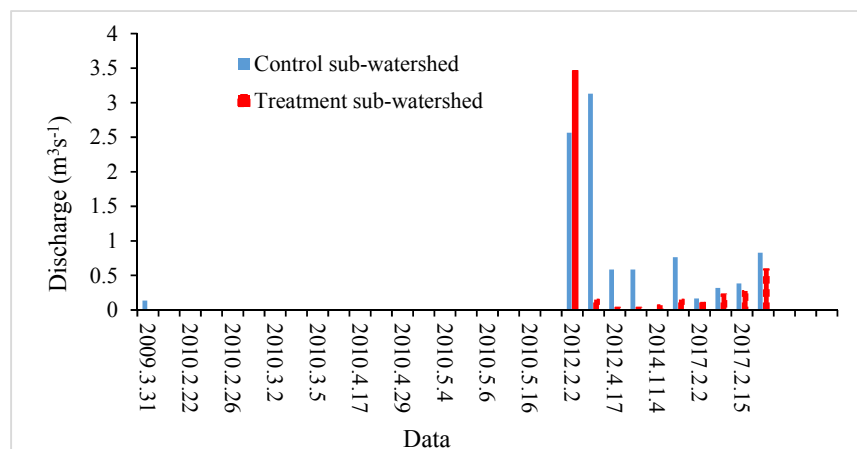
جدول ۲- حجم رواناب (متر مکعب) تولیدی سالانه در حوضه زوجی کاخک

Table 2. Runoff volume (m³) produced annually in the Kakhk paired watershed

Subwatershed	Year												
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Treatment sub-watershed	0	0	0	0	0	17748.8	110.6	3.1	2130.9	0	17523.2		Data not recorded
Control sub-watershed	0	0	245.2	39.8	0	4261.4	2104.6	48.8	15660.2	2475.0	24535.2		

زیرحوضه نمونه از زیرحوضه شاهد بیشتر گزارش شود. دبی اوج آبنمودهای ثبت شده در حوضه زوجی کاخک در شکل ۲، ارائه شده است. در جدول ۳، نیز پنج واقعه با بیشینه دبی اوج، مربوط به حوضه‌های نمونه و شاهد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تمام موارد به غیر از رویداد دوم فوریه ۲۰۱۲، دبی اوج ثبت شده در زیرحوضه شاهد به‌صورت قابل توجهی بیش از زیرحوضه نمونه است.

نتایج ارائه شده در جدول ۲، دلالت بر بالاتر بودن تولید رواناب در زیرحوضه شاهد نسبت به زیرحوضه نمونه دارد. به گونه‌ای که تولید رواناب در زیرحوضه شاهد حدود ۲۳۲ درصد بیش از رواناب تولیدی در زیرحوضه نمونه است. با این حال، در سال ۲۰۱۲ (که دارای بارش‌های شدیدی بوده است)، ترسیب بار بستر در فلولم زیرحوضه شاهد و در نتیجه عدم برآورد کامل آبنمود در این حوضه، باعث شده که میزان رواناب



شکل ۲- دبی اوج آبنمودهای ثبت شده در حوضه زوجی کاخک

Fig. 2. The recorded peak discharge of the Kakhk paired watershed

با توجه به مشکل به وجود آمده در لیمنوگراف زیرحوضه شاهد (ورود باربستر به چاهک فلوم) طی اغلب وقایع بیشینه، به نظر می‌رسد که میزان تولید رواناب و همچنین، دبی اوج واقعی در این دو ماه بیشتر از مقدار ثبت شده است. همچنین، در زیرحوضه نمونه که دارای اطلاعات دقیق‌تری است، دو واقعه ۲ فوریه ۲۰۱۲ و ۱۷ فوریه ۲۰۱۷ مسئول ۷۸ درصد رواناب تولیدی طی دوره مورد بررسی هستند. به عبارتی، ۲۰ درصد وقایع حدود ۸۰ درصد رواناب را تولید کرده‌اند. در زیرحوضه شاهد نیز به دلیل وجود اشکالات متعدد طی وقایع بیشینه، امکان این تحلیل وجود ندارد.

همان‌گونه که در شکل ۲ و جدول ۳ مشاهده می‌شود، وقایع بیشینه سیل دو زیرحوضه نمونه و شاهد در فوریه ۲۰۱۲ و فوریه ۲۰۱۷ به وقوع پیوسته است. در زیرحوضه نمونه، این دو ماه ۹۲ درصد رواناب کل دوره را ایجاد کرده‌اند (هر ماه ۴۶ درصد). در زیرحوضه شاهد، با توجه به داده‌های موجود، حدود ۶۳ درصد کل رواناب تولیدی حوضه در این دو ماه ثبت شده است (۳۶ درصد در فوریه ۲۰۱۲ و ۲۷ درصد در فوریه ۲۰۱۷). لازم به توضیح است که طبق بررسی‌های صورت گرفته در بسیاری از وقایع در زیرحوضه شاهد، بار بستر به درون فلوم وارد شده و در اندازه‌گیری‌ها خلل وارد کرده است.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به پنج رویداد حداکثری رواناب در حوضه زوجی کاخک

Table 3. The five maximum runoff events in the Kakhk paired watershed

Subwatershed	Rank	Data	Peak discharge (lit.s)	Runoff volume (m ³)	The relative share of runoff volume from the total runoff of the corresponding year (%)	The relative share of the volume of runoff from the total runoff of the sub-watershed (%)
Treatment sub-watershed	1	2012.02.02	3462.0	16760.0	94.4	44.0
	2	2017.02.17	593.0	12953.0	73.9	34.0
	3	2017.02.15	276.0	1099.0	6.3	3.0
	4	2017.02.13	229.0	1824.0	10.4	5.0
	5	2012.02.26	152.0	919.0	5.2	2.0
Control sub-watershed	1	2012.02.26	3130.0	3708.4	8.7	4.2
	2	2012.02.02	2567.0	28197.0	66.2	32.0
	3	2016.05.10	1000.0	2475.0	100.0	2.8
	4	2017.02.17	830.0	18135.0	73.9	20.6
	5	2015.02.21	764.0	15660.4	100.0	17.8

ترتیب ۳۷۹ و ۸۵ تن محاسبه شد، که نشان‌دهنده متوسط رسوب ویژه ۰/۴ و ۰/۱ تن در هکتار به ترتیب در حوضه‌های شاهد و نمونه است (این اختلاف مربوط به رسوب معلق حوضه است).

نتایج ارائه شده در جدول ۴، نشان‌دهنده آن است که وقایع بیشینه نقش مهمی در رسوبدهی حوزه آبخیز نمونه و شاهد داشته‌اند. در این زمینه، واقعه بیشینه ۲ فوریه ۲۰۱۲ در زیرحوضه نمونه مسئول ۸۸/۶ درصد و در زیرحوضه شاهد مسئول ۴۴/۷ درصد کل رسوبدهی حوضه بوده است. بنابراین، می‌توان بیان کرد که با وجود تفاوت حوضه‌های نمونه و شاهد در هدررفت خاک، تولید رواناب و رسوبدهی، هر دو حوضه از نظر نقش

ارزیابی رسوبدهی در حوضه زوجی کاخک:

اطلاعات غلظت متوسط و وزن کل رسوب معلق مربوط به شش و نه واقعه (دوره سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶) به ترتیب در حوضه‌های نمونه و شاهد در دسترس است. در جدول ۴، مقدار رسوبدهی حوضه‌های نمونه و شاهد ارائه شده است.

نتایج مندرج در جدول ۴ نشان می‌دهد که واقعه ۲ فوریه ۲۰۱۲، دارای بیشینه مقدار رسوبدهی در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد بوده است. میزان رسوب ویژه این واقعه در حوضه‌های نمونه و شاهد به ترتیب ۰/۷ و ۱/۵ تن در هکتار است. مقدار کل رسوب معلق خروجی از حوضه‌های شاهد و نمونه طی دوره مورد بررسی به

هدررفت خاک در دامنه‌ها و تولید رواناب و رسوب در خروجی آبخیزهای مورد مطالعه هستند.

چشم‌گیر وقایع حداکثری در انتقال ذرات خاک تشابه دارند. در مجموع می‌توان بیان کرد که یک تا سه واقعه فرساینده در هر دو حوضه مسئول بیش از ۸۰ درصد

جدول ۴ - مقدار رسوب معلق اندازه‌گیری شده در حوضه زوجی کاخک

Table 4. Suspended sediment measured in the Kakhk paired watershed

No	Data	Treatment sub-watershed			Control sub-watershed		
		Sediment concentration (g.lit)	Specific sediment yield (t.ha)	The relative contribution of sediment yield to the total sediment of the sub-watershed(%)	Sediment concentration (gr.lit)	Specific sediment yield (t.ha)	The relative contribution of sediment yield to the total sediment of the sub-watershed (%)
1	2012.02.02	4.5	0.7	88.6	6.0	1.5	44.7
2	2015.02.21	-	-	-	4.0	0.6	16.6
3	2012.02.19	-	-	-	6.5	0.5	14.6
4	2012.02.26	3.0	0.0	6.3	8.0	0.3	7.8
5	2016.05.10	-	-	-	10.0	0.2	6.5
6	2012.04.17	2.2	0.0	3.2	8.4	0.2	4.9
7	2013.02.01	3.0	0.0	1.3	8.0	0.2	4.4
8	2014.03.16	-	-	-	4.9	0.0	0.1
9	2014.11.05	3.0	0.0	0.4	3.0	0.0	0.3
10	2015.02.21	2.5	0.1	0.2	-	-	-

آبخیز از طریق ۱۰ درصد وقایع ایجاد شده است. Fang et al., (2013) نیز مشاهده کردند که از ۲۰۵ رویداد بارندگی-رواناب ثبت شده در منطقه مورد مطالعه، ۱۰ رویداد بزرگ‌تر، به تنهایی مسئول ۸۳/۳ درصد از کل رسوب است. Mathys et al., (2005) نیز اعلام کردند که طی دوره مورد مطالعه، سه رگبار مسئول بخش عمده‌ای از فرسایش خاک در مارن‌های مورد بررسی در فرانسه بوده است. همچنین، Li et al., (2020) با بررسی ۴۰ آبخیز مشاهده کردند که طی پنج واقعه بارش، ۵۶ درصد رسوب سالانه منتقل شده است. Duan et al., (2020) نیز سهم شدیدترین واقعه ثبت شده در پلات‌های کوچک (سه در ۲/۵ متری) در منطقه پرباران Jiangxi را برابر ۴۴ درصد کل هدررفت خاک اندازه‌گیری شده طی دو سال پژوهش، گزارش کردند. در نهایت، Noor et al., (2023) با بررسی ۶۹ واقعه منجر به فرسایش خاک در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه کلات گزارش کردند که یک تا شش رویداد باعث انتقال بیش از ۸۰ درصد رسوب در شش آبخیز کوچک مورد مطالعه شده است. در این زمینه، Arabkhedri (2014) بیان می‌دارد که در مناطق معتدل

در این میان، واقعه ۲ فوریه ۲۰۱۲ در تمامی مولفه‌های مورد بررسی شامل هدررفت خاک از دامنه، رسوبدهی آبخیز و تولید رواناب و بیشینه سیلاب در مقیاس آبخیز، بالاترین مقدار را در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد دارا بوده است. مطابق جدول ۱، این واقعه دارای بالاترین شدت بارش ثبت شده در منطقه مورد مطالعه را دارد. این نتایج تأکیدی بر اهمیت مقیاس رگبار در مطالعات فرسایش خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل خصوصیات بارشی آن‌ها است. در این زمینه، پژوهش‌های پیشین نیز بر اهمیت مقیاس رگبار در مطالعه فرسایش خاک و سهم بالای وقایع بارش محدود از کل فرسایش خاک و تولید رسوب تأکید داشته‌اند. در این رابطه، هم‌سو با یافته‌های پژوهش حاضر Regues et al., (2000) در شمال شرق اسپانیا طی ۳۵۰ رخداد بارندگی نشان دادند که بارش‌ها با شدت زیاد عامل اصلی فرسایش خاک منطقه است به‌طوری‌که حدود ۹۰ درصد از میزان فرسایش خاک به وسیله دو درصد از بارش‌ها ایجاد شده است. همچنین، Gallart et al., (2002) در منطقه نیمه‌خشک در اسپانیا ملاحظه کردند که ۹۰ درصد رسوب تولیدی در حوضه

در نهایت، حجم رواناب، دبی اوج آب‌نمود، زمان شروع رواناب، غلظت رسوب و حجم رسوب دو زیرحوضه نمونه و شاهد مورد مقایسه آماری قرار گرفتند (جدول ۵) که اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین آن‌ها وجود دارد.

به‌دلیل غلبه رویدادهای معمولی، فرسایش و تولید رسوب بیشتر متاثر از رویدادهای متوسط است. حال آن‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل اهمیت رویدادهای شدید، فرسایش و تولید رسوب بیشتر از رویدادهای بیشینه تاثیر می‌پذیرد.

جدول ۵- مقایسه آماری حجم رواناب، دبی اوج آب‌نمود، غلظت رسوب و حجم رسوب

Name	Sub-watershed	Average	Relative difference (%)	The significance level
Runoff volume (m ³)	Treatment	37881.5	132	1%
	Control	88165.2		
Peak discharge (lit.s)	Treatment	0.5	115	1%
	Control	1.1		
Sediment concentration (gr.lit)	Treatment	3.1	109	1%
	Control	6.5		
Specific sediment yield (t.ha)	Treatment	0.8	337	1%
	Control	3.5		

توجه به نقص در فلوم زیرحوضه شاهد و از دست دادن اطلاعات برخی از وقایع بیشینه، به نظر اختلاف رواناب تولیدی در زیرحوضه شاهد نسبت به زیرحوضه نمونه بیشتر از ۱۳۲ درصد است. از سوی دیگر، دبی اوج ثبت شده در زیرحوضه شاهد ۱/۱۵ برابر زیرحوضه نمونه است.

از آنجایی که اغلب سازه‌های اجرا شده در حوضه کاخک از نوع گابیون هستند، انتظار تعدیل دبی اوج وجود دارد. بررسی زمان آغاز رواناب نیز نشان داده است که در زیرحوضه نمونه به‌طور متوسط رواناب ۱۳۲ دقیقه دیرتر از زیرحوضه شاهد به فلوم رسیده است. با توجه به این‌که زمان تمرکز دو حوضه پیش از اجرای اقدامات آبخیزداری تقریباً برابر (۰/۶۱ و ۰/۵۴ ساعت) بوده است، این اختلاف زمان تا اوج، نشان‌دهنده اثر مثبت اقدامات بیولوژیک و سازه‌های آبخیزداری در افزایش زمان تمرکز حوضه و در نتیجه تاخیر در زمان اوج سیلاب (علاوه بر کاهش مقدار آن) است.

به‌طورکلی، می‌توان بیان کرد که اجرای اقدامات آبخیزداری در آبراه‌ها و قرق بودن زیرحوضه نمونه باعث افزایش نفوذ بارش در خاک و کاهش مقدار رواناب تولیدی شده است، از سوی دیگر، جریان رواناب در زیرحوضه نمونه به‌وسیله سازه‌های متخلخل (بندهای گابیونی) به‌صورت موقت ذخیره شده و به تدریج از زیرحوضه نمونه خارج می‌شود که در این حالت، اوج آب نمود دارای کاهش خواهد بود. نتایج ارائه شده در جدول

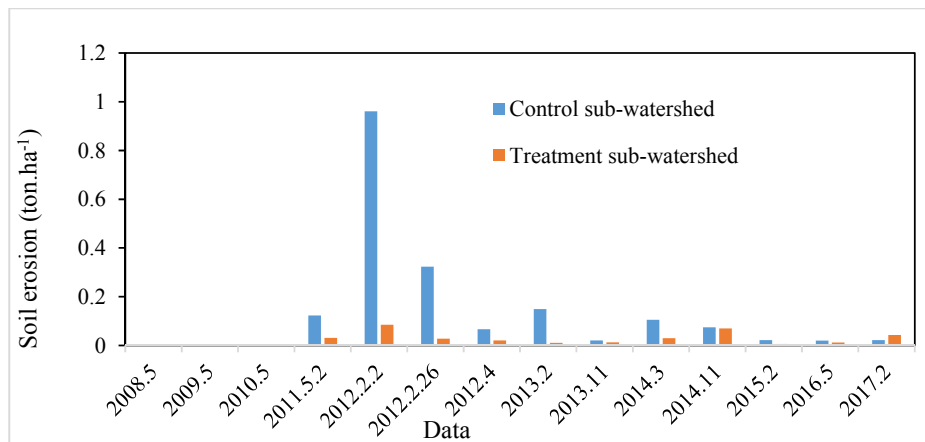
بررسی داده‌ها در مقیاس حوضه‌ای نشان داد که مجموعه اقدامات آبخیزداری در سطح دامنه‌ها و آبراه‌های زیرحوضه نمونه، باعث کاهش دبی اوج، حجم رواناب، غلظت رسوب و رسوبدهی در خروجی آبخیز نمونه نسبت به زیرحوضه شاهد شده است. با وجود گذشت چندین سال از اجرای اقدامات آبخیزداری در زیرحوضه نمونه، با این حال این سازه‌ها در کاهش رواناب، تاخیر در ایجاد رواناب و کاهش رسوبدهی اثرگذار بوده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که تعداد وقایع تولید رواناب در زیرحوضه شاهد، بیش از سه برابر زیرحوضه نمونه است. با این حال، با گذشت زمان این اختلاف به کمینه رسیده است. طی دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲، هیچ‌گونه جریان روانابی در زیرحوضه نمونه ثبت نشده است. در حالی‌که حدود ۲۱ واقعه در زیرحوضه شاهد به وقوع پیوسته است. اما پس از وقوع سیلاب شدید ۲ فوریه ۲۰۱۲ (اولین واقعه ثبت شده در زیرحوضه نمونه) تقریباً به‌صورت هم‌زمان در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد رواناب ثبت شده است. با توجه به عدم ثبت حجم رسوبگذاری در سازه‌ها (تعیین حجم قابل استفاده سازه‌ها در هر سال)، نمی‌توان تحلیل مناسبی در این زمینه ارائه داد.

حجم رواناب گزارش شده در زیرحوضه شاهد ۱/۳ برابر زیرحوضه نمونه است. مطمئناً، اثر اقدامات آبخیزداری باعث کاهش حجم رواناب سطحی زیرحوضه نمونه و افزایش نفوذ آب در خاک و تبخیر شده است. با

کرت‌های فرسایشی: در دو زیرحوضه شاهد و نمونه، ۱۴ واقعه هدررفت خاک به‌وسیله کرت‌های فرسایشی در دوره سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ اندازه‌گیری شده است. شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب مقدار هدررفت خاک و تولید رواناب در حوضه‌های نمونه و شاهد کاخک را نشان می‌دهد.

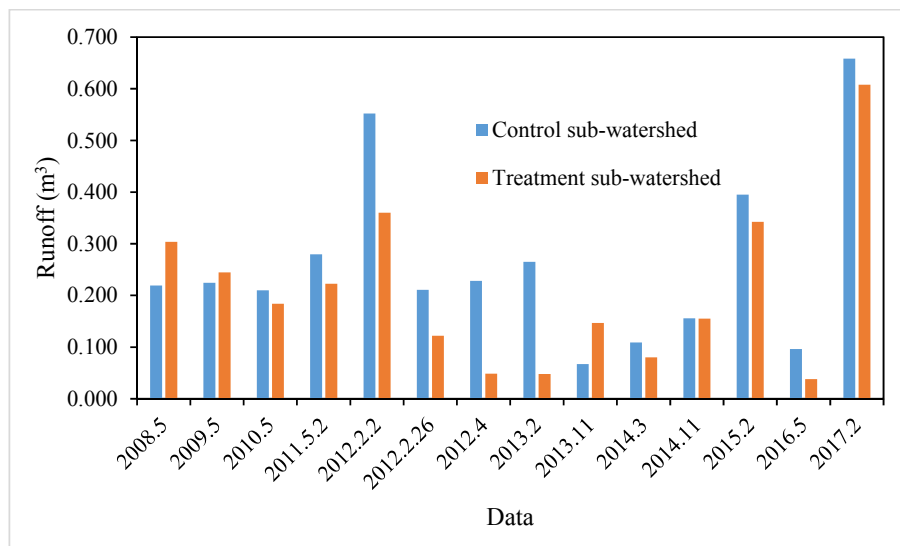
۸، نیز به‌خوبی نشان‌دهنده اثر معنی‌دار اجرای اقدامات آبخیزداری بر حجم و دبی اوج سیلاب است. در این زمینه، Hamedy et al., (2022) و Noor et al., (2017) اثر اقدامات سازه‌ای آبخیزداری را بر دبی اوج، معنی‌دار گزارش کردند.

ارزیابی داده‌ها در مقیاس دامنه، ارزیابی داده‌های



شکل ۴- مقدار هدررفت خاک در کرت‌های مستقر در حوضه‌های نمونه و شاهد کاخک

Fig. 4. Soil erosion in the plots located in the treatment and control sub-watershed of Kakhk



شکل ۵- مقدار تولید رواناب در کرت‌های مستقر در حوضه‌های نمونه و شاهد کاخک

Fig. 5. Runoff in the plots located in the treatment and control sub-watershed of Kakhk

تن بر هکتار در سال محاسبه شده است. این نتایج دلالت بر آن دارد که میزان هدررفت خاک در زیرحوضه شاهد، ۵۳۶ درصد بیشتر از زیرحوضه نمونه است. بررسی داده‌های رواناب در مقیاس کرت انجام گرفت و متوسط تولید رواناب دو زیرحوضه نمونه و شاهد به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۲۷ متر مکعب محاسبه شد. بنابراین،

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار هدررفت خاک در زیرحوضه شاهد بسیار بیشتر از زیرحوضه نمونه است. به گونه‌ای که متوسط هدررفت هر واقعه در حوضه‌های نمونه و شاهد، به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۱۷ تن بر هکتار است. متوسط سالانه هدررفت خاک دو زیرحوضه نمونه و شاهد نیز به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۲۷

در این رابطه، می‌توان تاثیر قرق در کاهش رسوب را به افزایش تراکم پوشش گیاهی در اثر عدم چرای دام و بهبود وضعیت نفوذپذیری خاک به دلیل عدم لگدکوبی خاک به وسیله دام‌ها در پهله قرق نسبت داد. این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش خاک در مقیاس دامنه، تحت تاثیر پوشش گیاهی و نحوه مدیریت و بهره‌برداری از آن است. پوشش گیاهی با کاهش سرعت رواناب، نگهداری و نفوذ مقداری از بارش، جلوگیری از برخورد مستقیم قطرات باران، تثبیت خاک به وسیله ریشه‌ها، بهبود ساختمان و خصوصیات شیمیایی خاک، باعث کاهش فرسایش می‌شود. علاوه بر این، پوشش گیاهی با ایجاد زبری و تقلیل نیروی برشی رواناب موجب کاهش رشد و توسعه شیارها شده است و در ترسیب مواد نقش مهمی دارند (Noor et al., 2023).

همچنین، نتایج دلالت بر تاثیرپذیری بالاتر هدررفت خاک (نسبت به تولید رواناب) از قرق مرتع دارد. حرکت دام‌ها در زیرحوضه شاهد باعث بهم خوردگی خاک دامنه‌های شیب‌دار می‌شود. در این حالت، افزایش ذرات قابل حمل خاک در زیرحوضه شاهد، باعث تسهیل ورود و انتقال رسوب به وسیله رواناب می‌شود. بنابراین، در حوضه تحت چرای دام، مقدار هدررفت خاک نسبت به تولید رواناب با سرعت بیشتری افزایش یافته است.

میزان تولید رواناب در زیرحوضه شاهد ۱۳۸ درصد بیشتر از زیرحوضه نمونه است.

پنج واقعه بیشینه هدررفت خاک در حوضه‌های نمونه و شاهد در جدول ۶، ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه هدررفت خاک در هر دو زیرحوضه نمونه و شاهد طی واقعه ۲ فوریه ۲۰۱۲ ثبت شده است. این واقعه بیشینه در حوضه‌های نمونه و شاهد به ترتیب مسئول ۲۳/۶ و ۵۰/۶ درصد هدررفت خاک کل دوره مورد بررسی بوده است. همچنین، سه واقعه بیشینه (سه واقعه از ۱۴ واقعه حدود ۲۰ درصد کل وقایع) در حوضه‌های نمونه و شاهد به ترتیب مسئول ۷۵/۵ و ۵۵/۲ درصد هدررفت کل دوره مورد بررسی بوده‌اند.

بررسی داده‌های ثبت شده در مقیاس دامنه نشان داد که چرای بیش از حد مرتع و لگدکوبی دام، تاثیر معنی‌داری بر افزایش هدررفت خاک و تولید رواناب در زیرحوضه شاهد داشته است، به طوری که در بارش‌های مشابه در منطقه، فرسایش خاک در آبخیز تحت چرا (زیرحوضه شاهد) بیشتر از آبخیز قرق شده (زیرحوضه نمونه) است. بر اساس گزارش اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی (۱۳۹۸)، ظرفیت مراتع حوضه شاهد حدود ۷۰ واحد دامی است، در حالی که دام‌های در حال چرا در منطقه بیش از دو برابر این ظرفیت هستند.

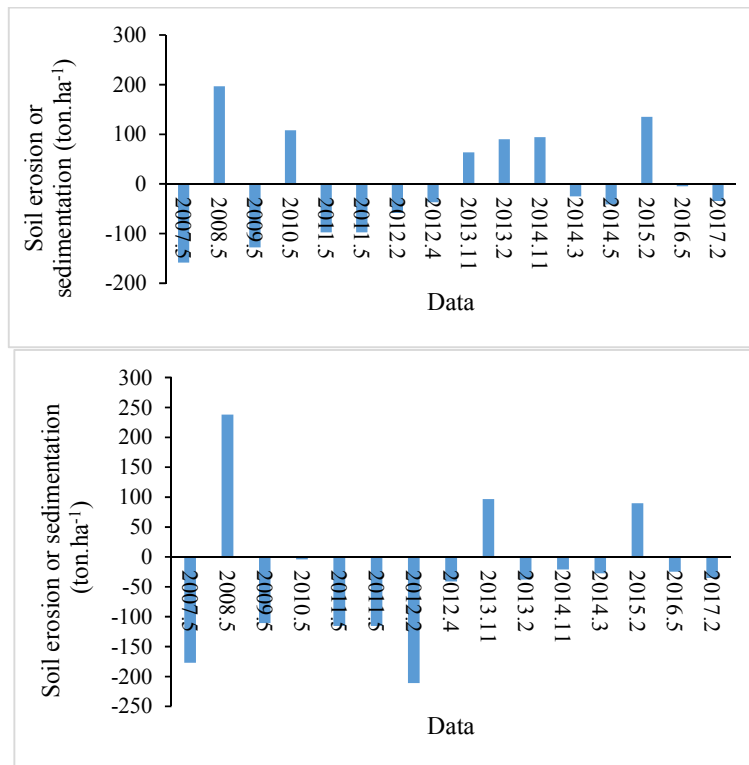
جدول ۶- پنج واقعه بیشینه هدررفت خاک از کرت‌های مستقر در حوضه زوجی کاکخ

Table 6. Five maximum events of soil erosion from the plots located in the Kakhk paired watershed

Sub-watershed	Data	Soil erosion (kg.m ⁻²)	The relative contribution of soil erosion to the total erosion of the sub-watershed (%)	The relative share of the erosion from the total erosion (%)
Treatment	2012.2.2	85.0	63.7	23.6
	2014.11	70.6	69.8	19.7
	2017.2	42.9	100.0	11.9
	2011.5.2	30.9	100.0	8.6
	2014.3	30.5	100.0	8.5
Control	2012.2.2	960.0	71.1	50.6
	2012.2.26	323.0	23.9	17.0
	2013.2	150.0	88.1	7.9
	2011.5.2	123.0	100.0	6.5
	2014.3	105.0	58.7	5.6

۶، مقادیر فرسایش یا رسوبگذاری اندازه‌گیری شده به وسیله میخ‌های فرسایشی در دو زیرحوضه نمونه و شاهد را نشان می‌دهد.

ارزیابی میخ‌های فرسایشی: طی دوره زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷، در مجموع ۱۶ و ۱۵ ثبت داده ماهانه به ترتیب در حوضه‌های نمونه و شاهد گزارش شده است. شکل



شکل ۶- مقادیر فرسایش یا رسوبگذاری اندازه‌گیری شده به‌وسیله میخ‌های فرسایشی در زیرحوضه نمونه (بالا) و شاهد (پایین)
Fig. 6. Erosion or sedimentation measured by erosion pins in the sub-watersheds of the treatment (top) and control (bottom)

نتایج این پژوهش دلالت بر آن دارد که استفاده از میخ‌های فرسایشی در حوضه زوجی کاخک گناباد در دوره‌های کوتاه مدت دارای خطای بسیار زیادی است. پژوهش‌های پیشین متعددی نیز اندازه‌گیری کوتاه مدت فرسایش خاک به‌وسیله میخ‌های فرسایشی را دارای خطا دانسته‌اند (Boardman and Favis-; Mortlock, 2016; Gholami et al., 2021). در این زمینه می‌توان بیان کرد که با توجه به دامنه فرسایش این آبخیز که کمتر از ۷/۵ تن در هکتار معادل کاهش ارتفاع ۰/۵ میلی‌متر (بالاترین دقت خط کش) در سال است، این بازه زمانی ارزیابی، بسیار کوتاه بوده و باعث خطا در ثبت داده‌ها می‌شود (Noor and Arabkhedri, 2022).

همچنین، همان‌گونه که بیان شد اساس این روش بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات تراز سطح زمین است. بنابراین، هرگونه تغییر تراز به فرسایش خاک نسبت داده می‌شود. در این زمینه، بازدید انجام شده از منطقه نشان داد که در برخی دامنه‌های حوضه زوجی کاخک درصد سنگ و سنگریزه بالا است و عملاً با جابجایی

نتایج ارائه شده در شکل ۶، نشان‌دهنده میزان تغییرات بسیار زیاد سالانه مقادیر اندازه‌گیری شده با میخ‌های فرسایشی در منطقه است. به‌گونه‌ای که بیشینه میزان تغییرات ثبت شده سالانه دو زیرحوضه شاهد و نمونه به‌ترتیب ۱۹/۳ و ۱۵/۰ میلی‌متر گزارش شده است. در این زمینه، بیشینه میزان فرسایش خاک در حوضه‌های نمونه و شاهد به‌ترتیب ۱۵۸/۶ و ۲۱۰/۸ تن در هکتار قابل محاسبه است. با این حال، کل فرسایش دوره (مقدار تجمعی تغییرات طی ۱۰ سال محاسبه شد) در حوضه‌های نمونه و شاهد به‌ترتیب ۱۳ و ۳۵ تن در هکتار اندازه‌گیری شده است.

نتایج ارائه شده در شکل ۶، نشان‌دهنده میزان تغییرات بسیار زیاد سالانه مقادیر اندازه‌گیری شده هدررفت خاک به‌وسیله میخ‌های فرسایشی در منطقه است. به‌گونه‌ای که متوسط تغییرات سالانه دو زیرحوضه شاهد و نمونه به‌ترتیب ۸/۶ و ۷/۸ میلی‌متر برآورد شده است. بیشینه میزان تغییرات سالانه ثبت شده نیز در حوضه‌های نمونه و شاهد به‌ترتیب ۱۹/۳ و ۱۵/۰ میلی‌متر گزارش شده است.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود از میخ‌های فرسایشی در منطقه مورد مطالعه برای پایش فرسایش سطحی استفاده نشود، در عین حال، این روش برای انواع فرسایش خطی و کنار رودخانه‌ای قابل استفاده است. در نهایت، مقایسه آماری حجم، رواناب، دبی اوج آب‌نمود، زمان شروع رواناب، غلظت رسوب و حجم رسوب در حوضه‌های نمونه و شاهد انجام شد (جدول ۷) که حاکی از اختلاف معنی‌دار پنج و یک درصد، به‌ترتیب برای رواناب و هدررفت خاک است.

سنگریزه‌ها مقدار بالای فرسایش یا رسوبگذاری ثبت می‌شود.

همچنین، در زیرحوضه شاهد، چرای دام‌ها وجود دارد و ممکن است بخشی از تغییرات تراز سطح مربوط به عوامل غیر از فرسایش آبی باشد. موارد مذکور قادرند در نتایج اندازه‌گیری هدررفت خاک در منطقه ایجاد خطا کند. علاوه بر این، Derikvandi et al., (2018) یخ‌زدگی خاک و ذوب مجدد آن را یکی از عوامل ایجاد خطا به‌وسیله میخ‌های فرسایشی عنوان کرده‌اند.

جدول ۷- مقایسه آماری حجم رواناب، هدررفت خاک اندازه‌گیری شده به‌وسیله کرت و میخ فرسایشی

Table 7. Statistical comparison of runoff volume, soil loss measured by erosive plots and pins

Name	Sub-watershed	Average	Relative difference (%)	The significance level
Runoff volume (m ³)	Treatment	0.19	42	5%
	Control	0.27		
Soil erosion (t.ha ⁻¹)-plot	Treatment	0.05	440	1%
	Control	0.27		
Soil erosion (t.ha ⁻¹)-pin	Treatment	1.3	141	1%
	Control	3.5		

نتیجه‌گیری

به‌وسیله بندهای آبخیزداری حتی پس از تکمیل ظرفیت مخازن آن‌ها، قرق بودن منطقه و کمتر بودن مقدار فرسایش خاک، نسبت داد.

با توجه به نقص در فلوم زیرحوضه شاهد و از دست دادن اطلاعات برخی از وقایع بیشینه، به نظر اختلاف رسوب تولیدی در زیرحوضه شاهد نسبت به زیرحوضه نمونه بیشتر از ۳۳۷ درصد است. همچنین، با توجه به گزارش‌های متعدد در زمینه رسوبگذاری بار بستر در فلوم زیرحوضه شاهد (در نتیجه از کارافتادن روند داده‌برداری صحیح در این حوضه) می‌توان بیان کرد که مقدار رسوبدهی برآوردی، بخشی از کل رسوبدهی (فقط رسوب معلق) را نشان می‌دهد.

نتایج نشان‌دهنده میزان بالای رسوب بار بستر در حوضه شاهد است، به گونه‌ای که حجم برآوردی بار بستر (عبوری از فلوم حوضه شاهد)، طی یک واقعه، بیش از حجم کل رسوب معلق طی دوره اندازه‌گیری شده است. بررسی‌ها نشان داده است که عبور بار بستر قابل ملاحظه‌ای از حوضه نمونه گزارش نشده است. بر اساس گزارش دوره‌ای آوریل ۲۰۱۲ طی واقعه ۱۷ آوریل ۲۰۱۲، حدود ۲۸۰ متر مکعب رسوب بستر منتقل شده است. با فرض جرم مخصوص ظاهری ۱/۵ تن در متر مکعب برای رسوبات بستر، میزان بار بستر

حوضه‌های زوجی، به‌عنوان یک آزمایشگاه صحرایی در مناطق مختلف کشور تاسیس شده‌اند. در این راستا، ضروری است با استفاده از روش‌های علمی به ارزیابی اطلاعات ثبت شده در این آبخیزها پرداخته شود. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف تعیین اثر اقدامات آبخیزداری (سازه‌ای و بیولوژیک) بر هدررفت خاک و تولید رواناب در حوضه زوجی کاخک طرح ریزی شده است. در مجموع، می‌توان بیان کرد که طی دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، مقدار رسوب ویژه گزارش شده در زیرحوضه شاهد ۳/۳۷ برابر زیرحوضه نمونه است. اقدامات آبخیزداری انجام شده در زیرحوضه نمونه از یک سو باعث کاهش فرسایش خاک در سطح دامنه‌ها شده است که این عمل از طریق افزایش پوشش گیاهی، افزایش زبری، کاهش توان حمل جریان و ترسیب مواد در حال حمل صورت گرفته است. در ادامه، جریان از دامنه‌ها وارد آبراهه شده و به‌وسیله سازه‌های آبخیزداری مواد رسوبی، نگه داشته شده و در نتیجه، میزان رسوبدهی زیرحوضه نمونه بسیار کمتر از زیرحوضه شاهد است. بنابراین، کمتر بودن مقدار رسوبدهی در زیرحوضه نمونه را می‌توان به وجود سازه‌های آبخیزداری به‌عنوان مخازن ذخیره رسوب به‌ویژه رسوبات معلق، تعدیل شیب آبراهه

خاک در حد ۰/۵ میلی‌متر است. در این شرایط، تخمینی که از هدررفت خاک زده می‌شود، در حدود ۷۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار خواهد بود.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر، برگرفته از طرح تحقیقاتی ۰۲۴۵-۹۹۰-۱۰-۲۹-۲۹-۰ مصوب پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. بدین‌وسیله از حامیان این طرح تحقیقاتی (پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی) و به طور ویژه، آقای مهندس محمد شرافتی و آقای مهندس حسین چمنی تشکر می‌شود.

تعارض منافع

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

طی یک واقعه، بیش از ۴۲۰ تن است که از کل رسوبدهی معلق زیرحوضه شاهد (۳۷۹ تن طی دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶) بیشتر است، که دلالت بر سهم بالای بار بستر در رسوبدهی این منطقه دارد. این امر خود دلیلی بر نقش پررنگ سازه‌های آبخیزداری در کنترل رسوب، در حوضه نمونه است. همچنین، ضرورت پایش بار بستر در حوضه‌های زوجی را دوچندان می‌کند. نتایج پایش ماهانه هدررفت خاک به‌وسیله میخ‌های فرسایشی، نشان‌دهنده مقادیر بالای فرسایش و ترسیب در منطقه مورد مطالعه است. باید توجه داشت که در هنگام انتخاب ابزار مناسب برای اندازه‌گیری فرسایش خاک لحاظ دقت روش و شرایط منطقه بسیار مهم است. برای مثال اگر هدف از پژوهش، اندازه‌گیری هدررفت خاک در مقیاس رگیار باشد استفاده از کرت فرسایشی بسیار مفیدتر از میخ فرسایشی است. در این حالت، اگر میزان هدررفت خاک از یک کرت ۱۰۰ متر مربعی حدود یک کیلوگرم اندازه‌گیری شده باشد، میزان هدررفت خاک معادل با ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار می‌شود. در اندازه‌گیری ارتفاع خاک با میخ فرسایشی، کوچکترین میزان قابل اندازه‌گیری پایین رفتن سطح

منابع مورد استفاده

- Aghabeygi, S., Fattahi, B., 2017. The effect of vegetation and soil properties on the hydrological behavior of watersheds, case study: Paired Watershed of Gonbad. *J. Rangeland* 11(1), 83-93 (in Persian).
- Arabkhedri, M., 2014. A review on major water erosion factors in Iran. *Land Manage.* 2(1), 17-26 (in Persian).
- Boardman, J., Favis-Mortlock, D., Foster, I., 2015. A 13-year record of erosion on badland sites in the Karoo, South Africa. *Earth Surf. Process. Landf.* 40(14), 1964-1981.
- Derikvandi, M., Khaledi Darvishan, A.V., Chapi, K., 2018. Measuring soil erosion at different time intervals in Khamsan representative watershed using erosion pins. *Ecohydrol.* 5(2), 675-685 (in Persian).
- Duan, J., Yao-Jun, L., Jie, Y., Chong-Jun, T., Zhi-Hua, S., 2020. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China. *J. Hydrol.* 582, 124290.
- Ebabu, K., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D.T., Aklog, D., Masunaga, T., Tsubo, M., Sultan, D., Fenta, A.A., Yibeltal, M., 2018. Analyzing the variability of sediment yield: a case study from paired watersheds in the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Geomorphology.* 303, 446-455.
- Ebling, E.D., Reichert, J.M., Peláez, J.J.Z., Rodrigues, M.F., Valente, M.L., Cavalcante, R.B.L., Reggiani, P., Srinivasan, R., 2021. Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian Pampa biome. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 9(2), 180-194.
- Eshghizadeh, M., Dastorani, M., Talebi, A., 2015. Comparison of suspended load in two sub-catchments grazed and ungrazed in the Kakhk area of Gonabad. *J. Range Watershed Manage.* 68(3), 573-588 (in Persian).
- Fang, N.F., Shi, Z.H., Yue, B.J., Wang, L., 2013. The characteristics of extreme erosion events in a small mountainous watershed. *PLoS One.* 8(10), e76610.

- Fazli, S., Noor, H., 2017. Simulation and evaluation of different vegetation cover scenarios effects on soil erosion. *Iran J. Irrig. Drain.* 11(4), 562-571 (in Persian).
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Regüés, D., 2002. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrol. Earth System Sci. Discuss.* 6(3), 527-537.
- Ghermezcheshmeh, B., Nikchegh Farahani, Sh., Agharazi, H., 2019. Effects of watershed management practices on some of flood characteristics change in Haftan Watershed. *J. Watershed Manage. Res.* 10(16), 106-116 (in Persian).
- Gholami, V., Sahour, H., Amri, M.A.H., 2021. Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks. *Catena* 196, 104902.
- Hamedi, E., Chezgi, J., Noor, H., 2022. The effect of watershed management scenarios on discharge and sedimentation with SWAT model in arid and semi-arid regions. *J. Arid Biome* 12(2), 1-11.
- Khaledi Darvishan, A.V., Gholami, L., Ghorghi, J.H., Spalević, V., Kord, A.K., Amini, H. M., 2016. Effect of enclosure on runoff, sediment concentration and soil loss in erosion plots. *Agrofor Int. J.* 1(1), 49-57.
- Khorasan Razavi Department of Natural Resources and Watershed management Assistance of Watershed management., 2020. Production of data and information, monitor and operation management Khakhk of reference and paired watershed. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 217 pages (in Persian).
- Li, Z., Xu, X., Zhu, J., Xu, C., Wang, K., 2020. The contributions of the largest erosive events to sediment yields in karst catchments. *Water Resour. Res.* 56(7), e2019WR025839.
- Mathys, N., Klotz, S., Esteves, M., Descroix, L., Lapetite, J.M., 2005. Runoff and erosion in the Black Marls of the French Alps: observations and measurements at the plot scale. *Catena* 63(2), 261-281.
- Noor, H., 2020. Evaluation of variation in sediment delivery ratio based on plot and micro-watershed scales data in Sanganeh Watershed. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), 78 pages (in Persian).
- Noor, H., Arabkheldri, M., 2022. Technical remarks on the construction, maintenance, and monitoring of erosion plots and pins. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 35 pages (in Persian).
- Noor, H., Arabkherdi, M., Dastranj, A., 2023. Evaluation of the Sediment yeild in small watersheds of arid rangeland in the northeast of Iran, case study: Sanganeh Soil Conservation Research Station. *Integr. Watershed Manage.* 3(3), 35-48 (in Persian).
- Noor, H., Bagherian Kalat, A., Abbasi, A.A., 2020. Evaluation of sediment yield under open grazing and enclosure micro-watersheds, case study: Sangnaeh area of Kalat. *J. Watershed Engin. Manage.* 12(2), 505-513 (in Persian).
- Noor, H., Fazli, S., Rostami, M., Bagherian Kalat, A., 2017. Cost-effectiveness analysis of different watershed management scenarios developed by simulation–optimization model. *Water Sci. Tech: Water Supply* 17(5), 1316-1324.
- Organization of Forests and Rangelands and Watershed Management., 2020. Production of data and information, monitor and operation management Khakhk of reference and paired watershed. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 234 pages (in Persian).
- Regues, D.J., Balasch, C., Castelltort, X., Soler, M., Gallart, F., 2000. Relaciones entre lastendencias temporalis de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas, en una pequeña cuenca de montaña Mediterránea (Vallcebre, Pirineos orientales). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 26, 41–65.
- Sadeghi, S.H.R., Frootan, E., Sharifi, F., 2006. Performance evaluation of watershed management measures using qualitative method. *Geogr. Res.* 79(4), 37-47 (in Persian).
- Sadoddin, A., Sheikh, V., Mostafazadeh, R., Halili, M.Gh., 2010. Analysis of vegetation-based management scenarios using MCDM in the Ramian Watershed, Golestan, Iran. *Int. J. Plant Prod.* 4(1), 51-62.
- Seppelt, R., Lautenbach, S., Volk, M., 2013. Identifying trade-offs between ecosystem services, land use, and biodiversity: a plea for combining scenario analysis and optimization on different spatial scales. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5(5), 458-463.
- Soleimani, F., Parvizi, Y., Rayat-pisheh, A., 2021. Opportunities, challenges and preliminary assessment of Shush paired Watershed. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 31 pages (in Persian).
- Vafakhah, M., Mohseni Saravi, M., 2011. Optimizing management of soil erosion in Orazan sub-basin, Iran. *J. Agric. Sci. Technol.* 13, 717-726.