

Prediction of soil erosion and sediment delivery ratio using RUSLE at Sanganeh soil conservation research station

Hamzeh Noor ^{1*} , Mahmood Arabkhedri ² 

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Khorasan Agricultural and Natural Resources Research Centre, Mashhad, Iran

² Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Soil erosion by water is one of the most common environmental problems worldwide and is considered a serious risk for sustainability in developing countries. Water erosion on a global scale is one of the most critical types of soil and environmental degradation due to its geographical extent and ecological effects. In this regard, effectively controlling sediment load is an important component in watershed management. In the formulation of a watershed management strategy, the estimation of sediment delivery ratio (SDR) plays a significant role. SDR is defined as the sediment yield from an area divided by the gross erosion of that same area. SDR is expressed as a percentage and represents the efficiency of the watershed in moving soil particles from areas of erosion to the point where sediment yield is measured. One of the problems in estimating the SDR in watersheds is the lack of proper information on the amount of soil erosion and sediment yield. In this context, the Sanganeh soil conservation research station, having measured soil erosion and sediment yield of small watersheds, is a suitable place to evaluate the accuracy of the RUSLE model and estimate the ratio of sediment delivery on the scale of small watersheds. The current research aims to achieve two goals: a) determining the accuracy of the RUSLE model in estimating soil erosion based on the measurements in the erosion plots, and b) estimating the SDR using the estimated soil erosion values as well as the sediment yield measured at the outlet small watershed are planned.

Materials and Methods

Considering the importance of soil erosion and the study of sediment processes in semi-arid rangeland ecosystems, the Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center (KANRRC) assessed some micro-watersheds for the collection of storm-wise runoff and associated sediment. The Sanganeh research micro-watershed, located 100 km from Mashhad City (northeast Iran), is one of the watersheds selected for this study. The watershed area, the longest waterways, and the mean slope of the watershed are 1.2 ha, 145.0 m, and 31.2%, respectively. The study watershed consists of semi-arid rangeland dominated by *Bromus tectorum* and *Artemisia diffusa*, with a coverage of 50%. The soil is Entisol and Aridosol, young, with a maximum depth of 30 cm. The mean electrical soil conductivity (EC), soil organic matter (OM), clay, sand, silt, and surface rock fragments of soils are 1.81, 1.57, 10.6, 54.7, 34.7, and 5%, respectively. In this research, three experimental small watersheds with areas between 4300-12000 m² were selected along with the erosion plots in them. Then, 24 rainfall events related to two periods of 2006-2009 and 2016-2018 were recorded along with the corresponding data of runoff and sediment in watersheds and plots. In this study, water flow and sediment yield were monitored at the main outlet of the micro-watersheds and plots. The runoff volume was calculated after each storm event by multiplying the depth of collected water, measured using an iron ruler at five points in the tank (corners and central), by the surface area of the collector. The collected runoff and sediment were then mixed thoroughly and one sample was taken to determine sediment concentration and sediment yield. Then, by collecting the required information (including rainfall erosivity, topography, conservation practice, soil erodibility, and cover-crop management factors), the RUSLE model was run and compared with the observation data of the plots. The storm-wise soil erosion predictions were compared with observed data based on the criteria of the coefficient of determination (R²) and relative estimation error (RE). In the following, by modifying the

RUSLE model and observing the sedimentation data of the studied watersheds, the value of the SDR was estimated.

Results and Discussion

After collecting the required information, the RUSLE model was implemented at the plot scale. The accuracy of the model was evaluated using erosion plot data, which was not confirmed due to huge overestimations of RUSLE. Next, to achieve more accurate results, regression types (linear, exponential, power, etc.) were used between the observed and estimated values of soil erosion (RUSLE). After applying the correction coefficient, this model was able to estimate the average erosion rate of the whole period are 12, 17, and 2% for E1, E4, and E6 watersheds, respectively, which is within the acceptable range of soil erosion modeling. Therefore, it can be said that the accuracy of the modified RUSLE model (by regression model) in estimating the average soil erosion during the period is higher than the event-based scale. Also, the prediction of maximum event estimation error for E1, E4, and E6 watersheds was 25.7, 35.8, and 21.6%, respectively. After evaluating the accuracy of the RUSLE model at the plot scale and in order to know the amount of soil erosion at the watershed scale, the values of L, S, K, and C factors for the watersheds were calculated based on a weighted average and entered into the modified model. Therefore, the results of the RUSLE model were generalized to the watershed scale. In the final stage, by dividing the amount of erosion by the corresponding amounts of sediment yield measured at the outlet of watersheds, the ratio of sediment delivery was calculated. The average SDR of the entire period in the E1, E4, and E6 watersheds are 42.2, 41.5, and 39.7%, respectively, and in the maximum events, it is one or two percent higher.

Conclusion

Overall, the results of this research showed that using the modified RUSLE model, it is possible to estimate the average soil erosion in the Sanganeh soil conservation station and also estimate the SDR. Therefore, this approach can be used in executive programs in similar areas. According to the obtained results, the classification of rainfall data based on the rain erosive factor and then the evaluation of the RUSLE model can provide more accurate results. In addition, in this research, due to the small area of the watersheds, waterway processes did not play a role in the deposition and transfer of eroded soils. It is also suggested that similar research could be done in larger watersheds. Finally, considering the determination of the SDR in this area, it is recommended to evaluate the accuracy of the experimental methods for determining the SDR.

Key Words: Erosion Plots, Experimental watersheds, RUSLE, SDR

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: h.noor@areeo.ac.ir

Citation: Noor, H., & Arabkhedri, M. (2023). Prediction of Soil Erosion and Sediment Delivery Ratio using RUSLE at Sanganeh Soil Conservation Research Station. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 42-53.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11085.1098

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.2.4

Received: 05 August 2022, Received in revised form: 05 August 2022, Accepted: 01 August 2022, Published Online: 03 July 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 42-53

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه

حمزه نور^{۱*}، محمود عرب‌خدری^۲

^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 مهندسی حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

فرسایش آبی در مقیاس جهانی به دلیل وسعت جغرافیایی و اثرات محیط زیستی آن از مهم‌ترین چالش‌های تخریب زمین است. در این راستا، تدوین روش‌ها و راهبردهای مدیریت حوضه‌ها و طراحی برنامه‌های حفاظت خاک مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. شناسایی مناطق اصلی تولید رسوب و همچنین برآورد نسبت تحویل رسوب نقش به‌سزایی در تدوین این راهبردها دارد. هدف از تحقیق حاضر برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از اصلاح شده معادله جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه است. برای این منظور سه حوضه کوچک به همراه کرت‌های فرسایشی موجود در آن‌ها انتخاب شد. سپس، ۲۴ واقعه بارش مربوط به دو دوره ۸۵-۱۳۸۸ و ۹۶-۱۳۹۸ به همراه داده‌های متناظر رواناب و رسوب در حوضه‌ها و کرت‌ها ثبت شد. سپس با جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، مدل RUSLE اجرا و با داده‌های مشاهداتی کرت‌ها مقایسه شد. در ادامه با اصلاح مدل RUSLE و داده‌های مشاهداتی رسوب‌دهی حوضه‌های مورد مطالعه، مقدار نسبت تحویل رسوب برآورد شد. یافته‌ها حاکی از آن است که برآوردهای مدل RUSLE از وضعیت فرسایش و رسوب با نتایج داده‌های کرت‌های فرسایشی تطابق نداشت. اما پس از اعمال ضریب اصلاحی، این مدل توانست میزان متوسط فرسایش کل دوره را با خطای بین ۲ الی ۱۷ درصد برآورد نماید که در دامنه قابل قبول مدل سازی فرسایش خاک است. نسبت تحویل رسوب برای حوضه‌های E1، E4 و E6 به ترتیب ۴۲/۲، ۴۱/۵ و ۳۹/۷ درصد به دست آمد. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از مدل اصلاح شده RUSLE امکان برآورد متوسط فرسایش خاک منطقه و همچنین تخمین نسبت تحویل رسوب وجود دارد. بنابراین، می‌توان در برنامه‌های اجرایی در مناطق مشابه از این رویکرد استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: کرت‌های فرسایشی، معادله جهانی فرسایش خاک، نسبت تحویل رسوب

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.noor@areeo.ac.ir

استناد: نور، ح. و عرب‌خدری، م. (۱۴۰۲). برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۴۲-۵۳.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11085.1098

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.2.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۴۲ تا ۵۳

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

امروزه فرسایش خاک به عنوان خطری برای رفاه انسان و حتی برای حیات او به شمار می‌آید (Saeediyan and Refahi, 2001; Moradi, 2022; Koohdarzi Moghaddam et al., 2022). در این راستا Pimental et al (1995) متوسط سالانه فرسایش خاک جهان را ۷۵ میلیارد تن تخمین زده‌اند. از سوی دیگر و بنابر پژوهش‌های انجام شده متوسط میزان رسوب‌گذاری در سدهای جهان در حدود یک درصد حجم مخازن در سال است (Jacobsen, 2009). بنابراین، کنترل فرسایش خاک و تولید رسوب، جزء مهمی در مدیریت حوضه است (Karimi et al., 2022). برآورد نسبت تحویل رسوب در تدوین استراتژی مدیریت حوضه‌ها نقش به‌سزایی دارد. نسبت تحویل رسوب درصدی از فرسایش ناخالص است که از یک حوضه معین در یک زمان تمرکز مشخص منتقل می‌شود. این وابسته به مقیاس است و میزان فراهمی رسوب را بازگو می‌کند (Bayat and Moradi, 2014).

به‌رغم مفهوم ارزشمند نسبت تحویل رسوب، اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه ضعف‌های اساسی دارند. برای تعیین نسبت تحویل رسوب نیاز به اطلاعات فرسایش خاک و تولید رسوب است که این اطلاعات در بسیاری از مناطق در دسترس نیست. گروهی از محققان برای تخمین فرسایش خاک از مدل‌های برآورد فرسایش خاک استفاده نموده‌اند. در این بین نسخه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش خاک (RUSLE)^۱ یکی از پرکاربردترین مدل‌های تجربی در مطالعات فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف است. بنابراین، می‌توان از آن در تخمین هدررفت خاک و سپس برآورد نسبت تحویل رسوب در حوضه‌های کشور (که اغلب دارای کاربری غیرکشاورزی هستند) استفاده نمود. با این حال پیش از استفاده از مدل‌های هیدرولوژی و فرسایش خاک، باید دقت آن‌ها با داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گیرد تا به‌توان به نتایج آن‌ها در برآورد فرسایش خاک اعتماد کرد.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که محققان از مدل‌های مختلفی برای برآورد فرسایش خاک به‌منظور تعیین نسبت تحویل رسوب استفاده نموده‌اند، در این زمینه استفاده از مدل پتانسیل فرسایش (Asadi Nalivan et al., 2013; Safari et al., 2015; Komaki et al., 2019) و نسخه‌های مختلف USLE (Khorsand et al., 2016; Williams, 1997; Santos et al., 2017; Mirakhorlo and Rahimzadegan, 2020) مد نظر محققان بوده است. با این حال ارزیابی دقت

مدل‌های مذکور با استفاده از داده‌های مشاهداتی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

همان‌گونه که بیان شد برای تعیین نسبت تحویل رسوب علاوه بر داده‌های فرسایش خاک نیازمند وجود داده‌های رسوب‌دهی حوضه است. در این زمینه، برای آگاهی از وضعیت تولید رسوب نیز روش‌ها و مدل‌های متعددی وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آن‌ها استفاده از داده‌های غلظت رسوبات معلق و روش منحنی‌سنجی رسوب است (Fu et al., 2010; Santos et al., 2017; Mirakhorlo and Rahimzadegan, 2020). منابع متعددی (برای نمونه، Arabkhedri et al., 2010) ایرادات روش منحنی‌سنجی رسوب را در کم برآوردی رسوب‌دهی معلق ذکر کرده‌اند. بار کف نیز بخشی از رسوب کل خروجی از حوضه است که اندازه‌گیری آن به‌ندرت انجام می‌شود (Arabkhedri et al., 2014) ولی باید در محاسبه نسبت لحاظ شود.

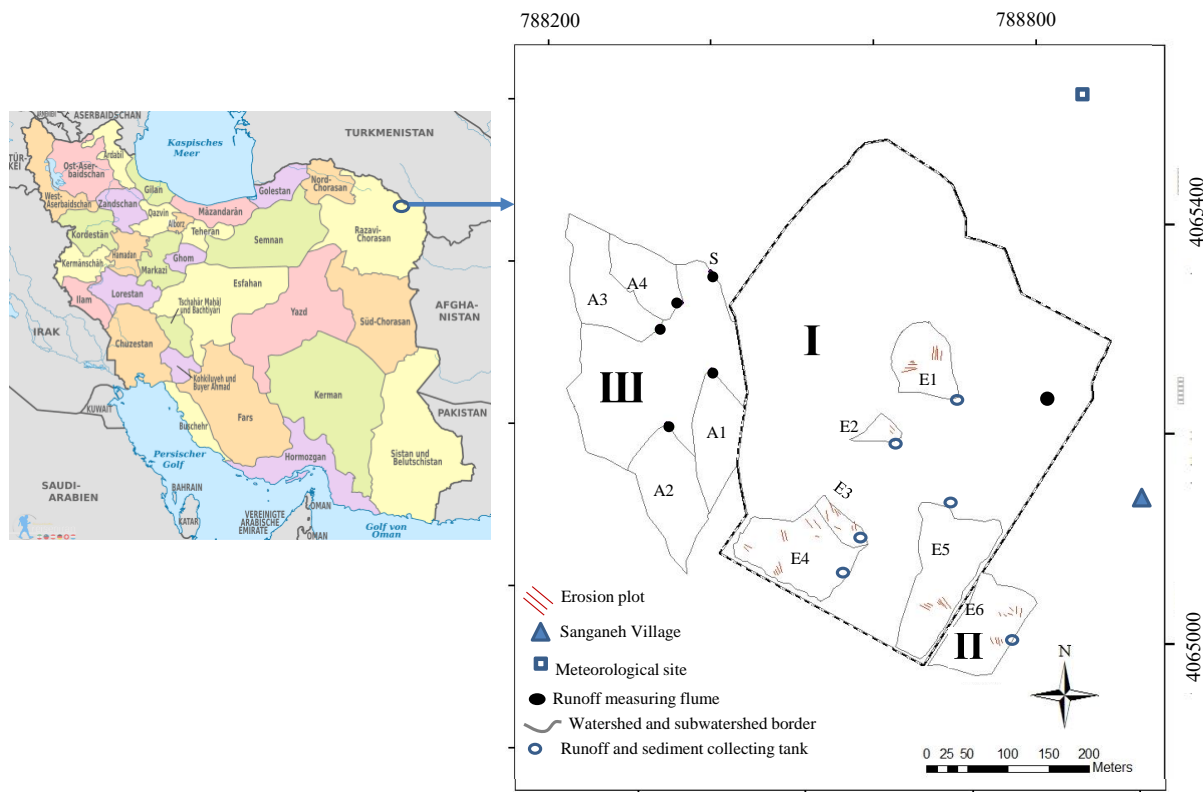
بنابراین، می‌توان بیان نمود که یکی از مشکلات موجود در زمینه برآورد نسبت تحویل رسوب در حوضه‌ها، فقدان اطلاعات مناسب از میزان فرسایش خاک در دامنه‌ها و میزان رسوب خروجی از حوضه است. در این زمینه پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه کلات با دارا بودن اطلاعات اندازه‌گیری شده از فرسایش خاک در کرت‌های فرسایشی و همچنین رسوب‌دهی حوضه‌های کوچک، محلی مناسب برای ارزیابی دقت مدل RUSLE و برآورد نسبت تحویل رسوب در مقیاس حوضه‌های کوچک است. بر همین اساس، تحقیق حاضر به‌منظور نیل به دو هدف: الف) تعیین دقت مدل RUSLE در برآورد فرسایش خاک بر اساس اندازه‌گیری‌های موجود در کرت‌های فرسایشی، و ب) برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از مقادیر برآوردی فرسایش خاک دامنه‌ها و همچنین مقدار رسوب‌دهی اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه‌های کوچک، طرح‌ریزی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه با مساحت حدود ۳۰ هکتار از نظر مختصات جغرافیایی در محدوده طول‌های $40^{\circ}07'13''$ الی $40^{\circ}06'13''$ شرقی و عرض‌های $84^{\circ}41'36''$ الی $84^{\circ}30'18''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱).

¹ Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)



شکل ۱- موقعیت پایگاه تحقیقاتی سنگانه در شهرستان کلات، خراسان رضوی و اجزاء اصلی آن

Figure 1- Location of Sanganeh Research Site in Kalat city, Razavi Khorasan and its main components

آبراهه آن ۷۹ متر است. در مجموع در این حوضه کوچک هشت کرت در دو دامنه غربی و شرقی وجود دارد. شکل ۲ نمایی از حوضه E1 را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از حوضه E1 در پایگاه تحقیقات سنگانه کلات

Figure 2- A view of the E1 watershed in Sanganeh Kalat research Station

به‌طور خلاصه این پایگاه از سه بخش تشکیل شده است (Noor et al., 2020).

بخش اصلی پایگاه شامل ۸۰ کرت فرسایش و پنج زیرحوضه مجهز به مخازن اندازه‌گیری رواناب و رسوب (I) یک زیرحوضه در شرق پایگاه اصلی مشتمل بر ۱۲ کرت فرسایش مجهز به مخازن اندازه‌گیری رواناب و رسوب (II) یک حوضه در غرب پایگاه اصلی به همراه چهار زیرحوضه مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری رواناب برای دستیابی به اهداف متصور در این تحقیق، سه حوضه کوچک با مساحت بین ۴۳۰۸-۱۱۹۹۵ مترمربع که داده‌های مناسب‌تری از نظر فرسایش در کرت‌های فرسایش و رسوب‌دهی در خروجی حوضه‌ها داشتند انتخاب شد که در ادامه مشخصات حوضه‌ها به همراه روش‌های اندازه‌گیری و تحلیل ارائه شده است.

۲-۲- حوضه‌های مورد بررسی

حوضه (E1):

این حوضه کوچک در "بخش I" پایگاه قرار دارد و دارای مساحت ۴۳۰۸ مترمربع، شیب متوسط ۴۰ درصد و طول بلندترین

۳-۲- برداشت نمونه‌های رواناب و رسوب

با توجه به آماده بودن نسبی بستر تحقیق مورد نظر، با استفاده از نیروی آموزش دیده مستقر در محل، اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از رواناب و رسوب مخازن کرت‌های فرسایشی و حوضه‌های کوچک از سال‌های پیش آغاز شده است. به‌منظور جمع‌آوری رواناب و رسوب تولیدی، در انتهای هر کرت و حوضه، مخازن جمع‌آوری رواناب و رسوب با ظرفیت مناسب نصب و رواناب و رسوب حاصل از هر رگبار در آن‌ها ذخیره شد. پس از هر واقعه بارندگی، ارتفاع رواناب جمع‌آوری شده در پنج نقطه مخزن (چهار گوش و مرکز) به‌وسیله خط‌کش استاندارد اندازه‌گیری و در فرم‌های از پیش تهیه شده یادداشت و حجم رواناب با توجه به مشخص بودن طول و عرض مخزن برای هر کرت و هر حوضه محاسبه شد (Noor et al., 2020). برای تعیین مقدار رسوب تولید شده از رواناب جمع‌آوری شده در مخازن، پس از مخلوط کردن کامل، نمونه‌برداری به حجم دو لیتر انجام و پس از انتقال به آزمایشگاه، خشک و توزین شدند. مشخصات رگبار شامل شدت و مقدار باران با استفاده از باران‌نگار ثبت و در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲- برآورد هدررفت خاک توسط مدل RUSLE

مدل RUSLE برای برآورد فرسایش آبی در اراضی کشاورزی و همچنین مرتعی به‌کار می‌رود که در آن شش عامل مؤثر بر فرسایش دخالت دارد (رابطه ۱) و می‌تواند به‌منظور برآورد فرسایش در پایه‌های زمانی مختلف به‌کار برده شود (Renard et al., 1997).

$$A=R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

در این رابطه A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح در پایه زمانی مد نظر است که در پژوهش حاضر بر اساس پایه زمانی رگبار و کل دوره (تن در هکتار) برآورد شد. R: عامل فرساینده باران، نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش ناشی از بارش باران در پایه زمانی مد نظر است. داده ایستگاه باران‌نگاری واقع در پایگاه سنگانه کلات به‌صورت فواصل حجمی ۰/۲ میلی‌متر ثبت و جمع‌آوری شدند. بر اساس راهنمای مدل (Renard et al., 1997) رگبارهایی که مقدار ارتفاع بارندگی تجمعی آن‌ها کم‌تر از ۱۲/۷ میلی‌متر بوده و بیش از شش ساعت با رگبار دیگر فاصله داشته باشند، حذف می‌شوند، مگر این‌که مقدار بارش طی ۱۵ دقیقه، حداقل ۶/۳ میلی‌متر یا حداکثر شدت ۱۵ دقیقه‌ای آن ۲۴ میلی‌متر در ساعت یا بیش‌تر باشد.

روش‌های مختلفی برای محاسبه عامل فرساینده باران وجود دارد. در متداول‌ترین روش، انرژی جنبشی رگبارها (E) و بیش‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای آن‌ها (I30) تعیین می‌شود. در این

حوضه (E4):

این حوضه در "بخش I" پایگاه تحقیقاتی سنگانه کلات قرار دارد. مساحت، محیط و طول طویل‌ترین آبراهه این حوضه به‌ترتیب ۱۱۹۹۵ متر مربع، ۴۸۲ و ۱۴۵ متر است. درصد پوشش گیاهی در این حوضه ۵۰ و میزان خاک لخت آن ۴۸ درصد است. شکل ۳ نمایی از حوضه E4 را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از حوضه E4 در پایگاه تحقیقات سنگانه کلات
Figure 3- A view of the E4 watershed in Sanganeh Kalat research Station

حوضه (E6):

این حوضه که در "بخش II" پایگاه قرار دارد، تحت کنترل نبوده و بر اساس عرف محل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. این حوضه از دو دامنه جنوب غربی-غرب و شمالی-شمال شرق تشکیل شده و در مجموع در آن ۱۲ پلات وجود دارد. مساحت این حوضه ۱۰۳۹۷ متر مربع و شکل هندسی آن تقریباً کشیده است. محیط حوضه ۴۱۲/۶ متر و طول طویل‌ترین آبراهه ۱۱۰ متر و شیب متوسط آن ۳۵ درصد است. شکل ۴ نمایی از حوضه E6 را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمایی از حوضه E6 در پایگاه تحقیقات سنگانه کلات
Figure 4- A view of the E6 watershed in Sanganeh Kalat research Station

به‌دست آمده با توجه به درجه آزادی و سطح معنی‌داری (۱ درصد) مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های با ضریب همبستگی بالاتر به‌عنوان مدل نهایی در این مرحله انتخاب شدند. به‌منظور ارزیابی تطابق نتایج برآوردی و مشاهداتی و تایید کاربرد آن‌ها از شاخص خطای نسبی استفاده شد (Sadeghi et al., 2014). مدل منتخب در این مرحله، در ادامه مقاله با عنوان "مدل اصلاح شده RUSLE" نامیده می‌شود.

۲-۵- برآورد نسبت تحویل رسوب

پس از ارزیابی دقت مدل RUSLE در مقیاس کرت و به‌منظور اطلاع از میزان فرسایش خاک در سطح حوضه، مقادیر عامل‌های L ، S ، K و C برای حوضه بر اساس مساحت هر بخش و به‌صورت وزنی محاسبه و به همراه عامل R و P وارد مدل اصلاح‌شده RUSLE شد. بنابراین نتایج مدل RUSLE به سطح حوضه تعمیم و مقدار فرسایش متوسط آن در هر رگبار و میانگین کل دوره محاسبه شد. در مرحله نهایی، با تقسیم مقدار فرسایش هر رویداد و کل دوره به مقادیر متناظر رسوب‌دهی اندازه‌گیری شده در خروجی آبخیزها (بند "ب" برداشت نمونه‌های رواناب و رسوب)، نسبت تحویل رسوب به تفکیک رگبارها و میانگین کلی محاسبه و تعیین شد. تمامی محاسبات در این تحقیق در صفحه گسترده Excel صورت گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی وقایع مورد بررسی

دوره مشترک اندازه‌گیری هدررفت خاک (کرت‌های فرسایشی) و تولید رسوب (حوضه‌ها) شامل دو دوره شهریور ۱۳۸۵ الی خرداد ۱۳۸۸ و آذر ۱۳۹۶ الی آذر ۱۳۹۸ است، در این دو دوره زمانی، ۲۴ رگبار دارای داده‌های مناسب برای اهداف تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفت. از جمله خصوصیات مهم بارش، شاخص حداکثر ۳۰ دقیقه‌ای بارش است که توسط محققان پیشین به‌عنوان شاخص مؤثر در فرسایش خاک مورد توجه قرار داشته است. در این زمینه Gholami et al. (2010); Fazli and Noor (2013) به نقش مهم خصوصیات باران به‌ویژه حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای در هدررفت خاک از کرت‌های فرسایشی اشاره داشته‌اند. شکل ۵ حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای وقایع منتخب را نشان می‌دهد.

نتایج بررسی داده‌ها دلالت بر آن داشت که حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای در دامنه ۲/۴ تا ۳۲/۰ میلی‌متر در ساعت با میانگین ۹/۰ میلی‌متر در ساعت قرار دارد. بر اساس نتایج مندرج در شکل ۵، حدود ۸۰ درصد از رسوب‌دهی (بین ۷۹ الی ۸۳ درصد) سه حوضه مورد بررسی، در پنج رگبار (۶، ۹، ۱۴، ۱۵ و ۱۷) خارج شده است.

تحقیق، مقدار R در مدل RUSLE بر اساس شاخص فرسایشی (EI30) از رابطه ۲ محاسبه شد (Renard et al., 1997).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI30)_i}{N} \quad (2)$$

که در آن (EI30) شاخص فرسایشی رگبار i (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت)، Z تعداد رگبارها طی دوره N سال، E انرژی جنبشی رگبار (مگاژول بر هکتار) و $I30$ بزرگ‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای (میلی‌متر در ساعت) است. کل انرژی جنبشی رگبار (E) نیز از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Renard et al., 1997):

$$KE = \sum_{i=1}^j er \Delta Vr \quad (3)$$

er انرژی رگبار در واحد عمق و مدت باران (مگاژول بر هکتار میلی‌متر ساعت) و ΔVr مقدار کل بارش (میلی‌متر) است. مقدار er بر اساس شدت رگبار (میلی‌متر در ساعت) از رابطه ۴ به‌دست می‌آید (Renard et al., 1997).

$$er = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05ir)] \quad (4)$$

K ، عامل فرسایش‌پذیری خاک، عبارت از میزان هدررفت خاک در هر بارش در واحد شاخص فرسایش است و به مواد آلی، دانه‌بندی خاک، نفوذپذیری و ساختار مقطع عرضی آن بستگی دارد. عامل فرسایش‌پذیری K با استفاده از نمودار (Renard et al., 1997) به روش ترسیمی برآورد شد. در این روش فرسایش‌پذیری به عوامل مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز، درصد شن، درصد مواد آلی خاک، ساختمان خاک و نفوذپذیری خاک بستگی دارد.

LS ، عامل توپوگرافی یا عامل طول و تندی شیب در معادله RUSLE است. طول شیب معادل فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا قسمتی از دامنه است که شیب به مقدار شایان توجهی کاهش یابد و عمل رسوب‌گذاری آغاز شود یا این‌که جریان به درون کانال متمرکز شود. عامل توپوگرافی با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند (Renard et al., 1997).

$$LS = (10/8 \sin^{\theta} + 0.03) s \leq 9\% \left(\frac{\lambda}{22/13}\right)^{0.5} \quad (5)$$

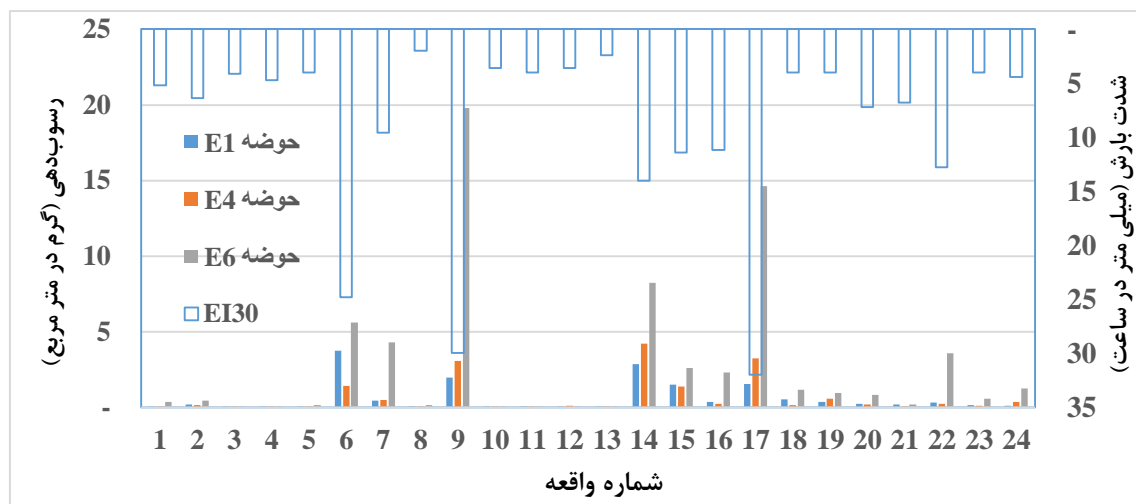
$$LS = \left(\frac{\lambda}{22/13}\right)^{0.5} \left(\frac{\sin^{\theta}}{22/13}\right)^{0.6} s > 9\% \quad (6)$$

عامل P با توجه به فقدان اقدامات حفاظتی در این منطقه و با توجه به سوابق علمی موجود (Sadeghi et al., 2014) در منابع طبیعی برابر یک در نظر گرفته شد. عامل C نیز با توجه به تغییرات فصلی پوشش گیاهی و در نظر گرفتن جدول‌های استاندارد مدل تعیین شد (Renard et al., 1997).

پس از تکمیل داده‌های ورودی مورد نیاز، مدل در مقیاس کرت اجرا شد و با داده‌های اندازه‌گیری شده فرسایش خاک مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه، برای دستیابی به نتایج با دقت بالاتر، از انواع رگرسیون (خطی، نمایی، توانی و ...) بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی فرسایش خاک استفاده شد. قابلیت اعتماد رابطه‌های

مسئول تولید بیش از ۸۰ درصد رسوب طی دوره مورد مطالعه است.

بر اساس این نتایج به خوبی مشخص می‌شود که در هر سه حوضه مورد بررسی فارغ از مساحت، شرایط محیطی و نوع بهره‌برداری از مراتع، بخش عمده‌ای از رسوب تولیدی متعلق به چند واقعه محدود است. به گونه‌ای که حدود ۲۱ درصد از رویدادها



شکل ۵- مقدار رسوب‌دهی و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه ثبت شده در وقایع منتخب

Figure 5- The sediment yield and 30-min maximum intensity value recorded in the selected events

درصد فرسایش خاک منطقه بودند، دارای خطای کم‌تری نسبت به سایر وقایع هستند.

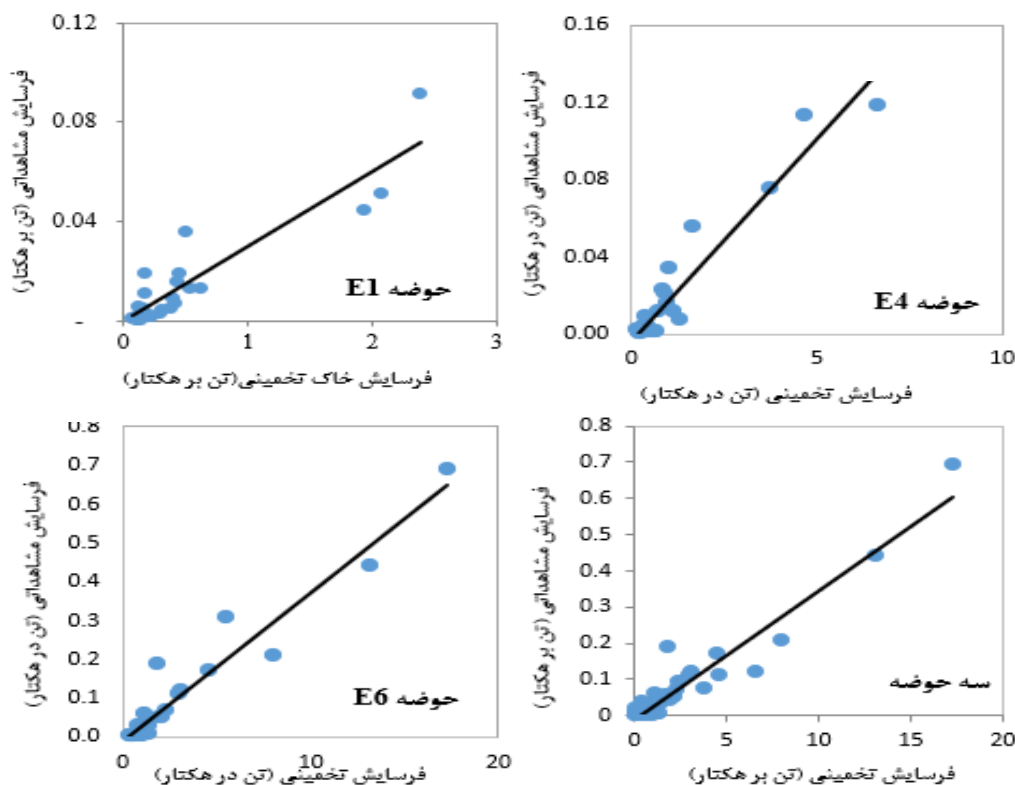
به این ترتیب می‌توان گفت که دقت مدل اصلاح شده RUSLE (توسط روابط رگرسیونی)، در برآورد متوسط فرسایش خاک طی دوره مورد نظر، بالاتر از برآوردهای این مدل در مقیاس رگبار است. در این زمینه، (Kinnell 2010) معادله جهانی فرسایش خاک و نسخه اصلاح شده آن در برآورد فرسایش خاک در مقیاس رگبار را نامناسب گزارش نموده است. ایشان دلیل آنرا نیز عدم دخالت رواناب در عامل فرسایش این مدل‌ها می‌دانند. بنابراین، کاربرد این نوع مدل‌ها در مقیاس متوسط سالانه دارای نتایج بهتری نسبت به مقیاس رگبار خواهد بود. از سوی دیگر، دقت مدل اصلاح شده RUSLE در برآورد هدرفت خاک وقایع حداکثری قابل قبول است. بنابراین، می‌توان میزان متوسط نسبت تحویل رسوب را برای کل دوره، با دقت مناسبی محاسبه کرد. همچنین با توجه به دقت مدل اصلاح شده در برآورد مقادیر حداکثر فرسایش خاک، امکان ارزیابی نسبت تحویل رسوب برای وقایع حداکثری نیز با استفاده از داده‌های مدل اصلاح شده RUSLE و مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده وجود دارد.

۲-۳- ارزیابی دقت مدل RUSLE

با توجه به روش کار ارائه شده، با تهیه اطلاعات و داده‌های مورد نیاز مدل RUSLE، میزان فرسایش خاک در کرت‌های منتخب برآورد شد. در شکل ۶ مقادیر برآوردی فرسایش خاک توسط مدل RUSLE به ازاء داده‌های مشاهداتی به تفکیک هر سه حوضه و همچنین کل داده‌ها ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مدل RUSLE در مقیاس رگبار میزان فرسایش خاک را بیش از مقدار واقعی تخمین زده و به عبارتی مدل دارای بیش تخمینی زیادی است. در اغلب مطالعات، میزان برآوردهای مدل RUSLE نسبت به مقادیر مشاهداتی بیش‌تر بوده است (Ewert et al., 2018; Barrena-González et al., 2020).

علی‌رغم نتایج ارائه شده در شکل ۶، به روشنی مشخص است که بین میزان فرسایش تخمینی توسط مدل RUSLE و مقدار مشاهداتی ارتباط معنی‌داری وجود دارد. بنابراین، می‌توان از روابط رگرسیونی ذکر شده در جدول ۱ برای کاهش خطای مقدار تخمینی استفاده نمود. جدول ۲ خطای تخمین نسبی رابطه‌های مندرج در جدول ۱ را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، مدل RUSLE و روابط رگرسیونی، در مقیاس تک‌واقعه خطای بیش‌تری نسبت به دوره طولانی‌مدت دارند. با این حال، بر اساس نتایج روابط رگرسیونی ارائه شده در جدول ۳، وقایع حداکثری که مسئول ۸۰



شکل ۶- وضعیت فرسایش خاک تخمینی با مدل RUSLE به ازاء مشاهده‌ای در حوضه‌های مورد مطالعه

Figure 6- Comparison of estimated soil erosion with RUSLE model and observations in the study watersheds

جدول ۱- روابط رگرسیونی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمین فرسایش با مدل RUSLE در حوضه‌های مورد مطالعه

Table 1- Regression relationships between observed values and erosion estimation with RUSLE model in the study watersheds

شمارهٔ رابطه	حوضه	رابطه	R2
7	E1	$0.0303x - 0.0002$ (تخمین RUSLE) = مقدار فرسایش	0.84
8	E4	$0.0308x - 0.0036$ (تخمین RUSLE) = مقدار فرسایش	0.92
9	E6	$0.0383x - 0.011$ (تخمین RUSLE) = مقدار فرسایش	0.93
10	سه حوضه	$0.035x - 0.01$ (تخمین RUSLE) = مقدار فرسایش	0.91

جدول ۲- درصد خطای نسبی روابط اصلاحی RUSLE در برآورد هدررفت خاک در حوضه‌های مورد مطالعه

Table 2- Relative percent error of modified RUSLE for soil loss estimation in the study watersheds

حوضه	مقیاس رگبار		کل دوره	
	معادله‌های جداگانه	معادله کلی	معادله‌های جداگانه	معادله کلی
E1	58.2	66.7	0.9	12.3
E4	60.5	75.2	11.4	17.1
E6	65.3	70.1	1.2	2.5
سه حوضه	61.3	70.6	4.5	1.1

۳-۳- برآورد نسبت تحویل رسوب

نتایج بر اساس رابطه ۱۰ (یک رابطه برای کل منطقه) ارائه می‌شود. بر این اساس خطای برآورد فرسایش کل دوره مورد بررسی، برای حوضه‌های E1، E4 و E6 به ترتیب ۱۲، ۱۷ و ۲ درصد است. همچنین خطای برآورد وقایع حداکثر برای حوضه‌های E1، E4 و E6 نیز به ترتیب ۲۵/۷، ۳۵/۸ و ۲۱/۶ درصد به دست آمد (جدول ۳). متوسط نسبت تحویل رسوب کل دوره در حوضه‌های E1، E4 و E6 به ترتیب ۴۲/۲، ۴۱/۵ و ۳۹/۷ درصد و در وقایع حداکثر یکی دو درصد بیش تر است.

همان‌گونه که پیش از این بیان شد با مدل اصلاحی RUSLE (جدول ۱۰) مقدار فرسایش خاک سه حوضه محاسبه شد. لازم به توضیح است که متوسط خطای تخمین با استفاده از رابطه ۱۰ برای هر سه حوضه بیش تر از رابطه‌های جداگانه هر حوضه است. دلیل این امر وجود تفاوت‌های حوضه‌های مورد بررسی با هم است. با این حال با توجه به خطای قابل قبول رابطه کلی (۱۰) و همچنین به منظور بهره‌برداری بهتر از نتایج توسط بهره‌برداران،

حداکثر آن‌ها نیز در همین حدود است که می‌توان نتیجه گرفت وقایع حداکثر تعیین‌کننده وضعیت تحویل رسوب هستند. در نهایت لازم به توضیح است با توجه به شرایط حوضه‌ها مورد بررسی از نظر شیب، فرآیندهای فرسایشی و خصوصیات خاک احتمال مشاهده نسبت تحویل رسوب بالاتر از یک چندان متصور نیست. از آنجایی که فرسایش سطحی در دامنه‌های پرشیب حوضه‌های کوچک عامل اصلی هدررفت خاک است و فرآیندهای آبراهه‌ای در این منطقه وجود ندارد، بنابراین خاک فرسایش یافته در پایین دامنه و در محدوده وسیعی پخش شده و به خروجی حوضه نمی‌رسند. این مواد ترسیب شده در پایین دست اصولاً توسط پوشش گیاهی تثبیت شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده دسته‌بندی داده‌های بارندگی بر اساس عامل فرسایشی باران و سپس ارزیابی مدل RUSLE می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد. به‌عبارتی همانند دسته‌بندی داده‌ها برای تهیه منحنی سنجۀ رسوب حد واسط دسته‌ها، می‌توان داده‌ها را بر اساس یک عامل دسته‌بندی نموده و در نتیجه بر دقت برآوردهای مدل افزود. در این تحقیق با توجه به ابعاد کوچک حوضه‌ها، فرآیندهای آبراهه‌ای در ترسیب و انتقال مواد نقش نداشته‌اند و پیشنهاد می‌شود تحقیقات مشابه در حوضه‌های بزرگ‌تر صورت گیرد. در نهایت، با توجه به تعیین نسبت تحویل رسوب در این منطقه پیشنهاد می‌شود که دقت روش‌های تجربی تعیین نسبت تحویل رسوب مورد ارزیابی قرار گیرد.

صفری، ع.، فرهودی، م.ح.، میرزایی، ح.، و کاویان، ع.ا. (۱۳۹۴). مقایسه و ارزیابی روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب در سه اقلیم متفاوت ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۶(۳)، ۲۵۵-۲۷۴.

عرب‌خدری، م. (۱۳۹۳). مروری بر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی خاک در ایران. *مدیریت اراضی*، ۱۷(۱)، ۲۶-۱۷.

غلامی، ل.، صادقی، س.ح.ر.، و خالدی‌درویشان، ع.و. (۱۳۸۹). مدل‌سازی برآورد نسبت تحویل رسوب رگبار در حوزه آبخیز چهل‌گزی بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژی. *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۶(۲)، ۲۵۳-۲۶۲.

کریمی، ز.، سعدالدین، ا.، و شیخ، و. (۱۴۰۱). اثرات اقدامات آبخیزداری بر خدمات چهارگانه آبخیز چهل‌چای استان گلستان. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*.

10.22098/mmws.2022.10523.1087.

کمکی، چ.، احمدی، ح.، ممبئی، م.، احمد یوسفی، ا.، و مصطفوی، ن. (۱۳۹۷). مقایسه روش محاسبه خودکار نسبت تحویل رسوب حوزه آبخیز با روش سنتی در سامانه اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یکه چنار - استان گلستان). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۹(۱۸)، ۲۶۰-۲۷۰.

جدول ۳- متوسط برآوردی نسبت تحویل رسوب در سه حوضه کوچک مورد

مطالعه

Table 3- Estimated average sediment delivery ratio in the three studied small watersheds

حوضه	وقایع حداکثر		کل دوره	
	خطای نسبی	SDR	خطای نسبی	SDR
E1	25.7	43.8	12.3	42.2
E4	35.8	43.1	17.1	41.5
E6	21.6	41.5	2.5	39.7

۴- نتیجه‌گیری

نسبت تحویل رسوب از موضوعات مهم در مدل‌سازی فرسایش خاک، طراحی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری و هم‌چنین مطالعات علمی فرسایش خاک است. در این تحقیق با استفاده از مدل RUSLE اقدام به برآورد فرسایش خاک در سطح حوضه‌ها مورد بررسی شد. برای این منظور دقت مدل با استفاده از داده‌های کرت‌های فرسایشی بررسی و مورد تأیید قرار نگرفت. پس از اعمال ضریب اصلاحی (رابطه رگرسیونی بین نتایج RUSLE و مقادیر مشاهداتی)، مدل توانست میزان متوسط فرسایش کل دوره را با خطای بین ۲ الی ۱۷ درصد و وقایع حداکثر (مسئول ۸۰ درصد فرسایش خاک) با خطای بین ۲۲ الی ۳۵ درصد برآورد نماید که در دامنه قابل قبول مدل‌سازی فرسایش خاک است. بر اساس مقادیر به‌دست آمده فرسایش رسوب‌دهی، متوسط نسبت تحویل رسوب کل دوره در سه حوضه کمی بیش‌تر از ۴۰ درصد است و نسبت تحویل رسوب طی وقایع

منابع

اسدی نلیوان، ا.، محسنی ساروی، م.، سور، ا.، دسترنج، ع.، و طائی، س. (۱۳۹۱). تعیین مناسب‌ترین روش تجربی برآورد SDR با استفاده از مدل EPM و خصوصیات فیزیکی حوزه؛ مطالعه موردی حوزه آبخیز قورچای، استان گلستان. *آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۱)، ۱۹-۲۸.

بیات، ر.، و مرادی، ش. (۱۳۹۳). مروری بر تحقیقات انجام شده روی نسبت تحویل رسوب. *ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۲(۵)، ۲۷-۳۶. خورشید، م.، خالدی‌درویشان، ع.ا.، و غلامعلی‌فرد، م. (۱۳۹۵). مقایسه نتایج برآورد هدررفت سالانه مدل RUSLE با داده‌های به‌دست‌آمده از میخ‌ها و کرت‌های فرسایش در حوزه آبخیز معرف خامسان. *اکوهیدرولوژی*، ۳(۴)، ۶۶۹-۶۸۰.

رفاهی، ح.ق. (۱۳۸۲). کتاب فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران.

سعیدیان، ح.، و مرادی، ح.ر. (۱۴۰۱). مقایسه رواناب و رسوب سازندهای گچساران و آغاچاری تحت شبیه‌سازی باران در کاربری‌های مختلف اراضی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۵۵-۶۸.

نور، ح.، باقریام کلات، ع.، و عباسی، ع.ا. (۱۳۹۹). ارزیابی تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز کوچک تحت چرای آزاد و قرق. مطالعه موردی: منطقه سنگانه کلات. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۲)، ۵۰۵-۵۱۳.

کوهدرزی مقدم، م.، تقی پور، س.م.، و عرفانی‌پور قاسمی، و. (۱۴۰۱). اثربخشی اقدامات آبخیزداری در کاهش فرسایش خاک و تولید رسوب) مطالعه موردی: حوزه آبخیز دهلکوه. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، 10.22098/mmws.2022.10282.1080.

References

- Arabkhedri, M. (2014). A review on major water erosion factors in Iran. *Land Management*, 2(1), 17-26 (in Persian).
- Arabkhedri, M., Lai, F.S., Noor-Akma, I., & Mohamad-Roslan, M.K. (2010). Effect of adaptive cluster sampling design on accuracy of sediment rating curve estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(2), 142-151.
- Asadi Nalivan, O., Mohseni Saravi, M., Sour, A., Dastranj, A., & Taei, S. (2013). Determine the most appropriate experimental method to estimate the SDR using EPM and physical properties basin; case study Watershed Ghurchay, Golestan province. *Irrigation and Water Engineering*, 3(10), 19-28 (in Persian).
- Barrena-González, J., Rodrigo-Comino, J., Gyasi-Agyei, Y., Pulido Fernandez, M., & Cerdá, A. (2020). Applying the RUSLE and ISUM in the Tierra de Barros Vineyards (Extremadura, Spain) to estimate soil mobilisation rates. *Land*, (9)3, 93-103.
- Bayat, R., & Moradi, Sh. (2014). Review of research conducted on the sediment delivery ratio. *Journal of Extension and Development of Watershed Managment*, 2(5), 27-36 (in Persian).
- Ewert, M., Su, Y., & Zhang, H. (2018). Comparison of two RUSLE models at the hillslope scale in experimental plots in Haiyuan, Ningxia, China. *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical*, 18(2), 153-160.
- Fazli, S., & Noor, H. (2013). Storm-wise sediment yield prediction using hillslope erosion model in semi-arid abundant lands. *Soil and Water Research*, 8, 42-48.
- Fu, X., Jiang, L., Wu, B., Hu, C., Wang, G., & Fei, X. (2010). Sediment delivery ratio and its uncertainties on flood event scale: Quantification for the Lower Yellow River. *Science China Technological Sciences*, 53, 854-862.
- Gholami, L., Sadeghi, S.H.R., & Khaledi-darvishan, A. (2010). Modeling the estimation of sediment delivery ratio in Chehl Gezi watershed based on climatic and hydrological characteristics. *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 16(2), 253-262.
- Jacobsen, T. (2009). Some aspects of reservoir sedimentation. Workshop on Reservoir Sedimentation Control. Regional Centre on Urban Flood Management, Karaj, Iran.
- Karimi, Z., Sadoddin, A., & Sheikh, V. (2022). Effects of watershed management practices on the quadric services of Chehel-Chai Watershed, Golestan Province. *Water and Soil Management and Modelling*, 10.22098/mmws.2022.10523.1087 (in Persian).
- Kinnell, P.I. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review. *Journal of Hydrology*, 385, 384-397.
- Khorsand, M., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2016). Comparison between estimated annual soil loss using RUSLE model with data from the erosion pins and plots in Khamsan representative watershed. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), 669-680 (in Persian).
- Komaki, Ch., Ahmadi, H., Mombeni, M., Yousefi, S., & Mostafavi, N. (2019). Comparison of Automatic Extraction of Sediment Delivery of Watershed and Traditional Method in Geographic Information System (Case Study: Yekechenar Watershed-Golestan Province). *Journal of Watershed Management Research*, 9(18), 260-270 (in Persian).
- Koohdarzi Moghaddam, M., Taghipour, S., & Erfanipour Ghasemi, V. (2022). Effectiveness of watershed management measures on the soil erosion and sediment yield reduction (Case study: Doholkooch Watershed, South Khorasan Province). *Water and Soil Management and Modelling*, 10.22098/mmws.2022.10282.1080 (in Persian).
- Mirakhorlo, M.S., & Rahimzadegan, M. (2020). Evaluating estimated sediment delivery by Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Sediment Delivery Distributed (SEDD) in the Talar Watershed, Iran. *Frontiers of Earth Science*, 1-13.
- Noor, H., Bagherian Kalat, A., & Abbasi, A. (2020). Evaluation of sediment yield under open grazing and enclosure micro-watersheds, case study: Sangnaeh area of Kalat. *Watershed Engineering and Management*, 12(2), 505-513 (in Persian).
- Pimental, D., Harvary, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shapritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Environmental end economic costs if soil erosion and conservation benefit. *Science*, 267, 1117-1123.

- Refahi, H.G. (2001). *Water erosion and its control*. Tehran University Publisher, 625 pages (in Persian).
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook 703*. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Sadeghi, S.H.R., Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., & Saeidi, P. (2014). A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 365-375.
- Saeediyani, H., & Moradi, H. (2022). Comparing of the runoff and sediment of different land uses in Gachsaran and Aghajari formations under rain simulation. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 55-68 (in Persian).
- Safari, A., Kavyan, A., Mirzaei, H., & Farhoodi, M. (2015). Comparison and evaluation of different methods to estimate sediment delivery ratio in three different climates of Iran. *Geography and Environmental Planning*, 26(3), 255-274 (in Persian).
- Santos, J.C.N., Andrade, E.M., Medeiros, P.H.A., Palácio, H.A.Q., & Araújo Neto, J.R. (2017). Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions of low connectivity. *Revista Ciência Agronômica*, 48(1), 49-58.
- Walling, D.E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65, 209-237.
- Walling, D.E. (1994). Measuring sediment yield from river basins. Pp. 39-83. In: R. Lal (ed.), *Soil Erosion Research Methods*. 2nd edition, Soil and Water Conservation Society Publications, USA.
- Williams, J.R. (1977). Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *IAHS Publication*, 122, 168-179.