



The challenges of measuring and estimating the soil erodibility factor (K) of the (R)USLE model in rangelands of arid regions

Ayoub Avizhgan¹ | Hossein Asadi² | Mahmood Arabkhedri³ | Hamzeh Noor⁴ | Aliakbar Nazari Samani⁵

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: a.avizhgan@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ho.asadi@ut.ac.ir
3. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: arabkhedri@scwmri.a.ir
4. Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran. E-mail: noonhamze@gmail.com
5. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aknazari@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 29, 2024

Revised: Dec. 10, 2024

Accepted: Dec. 21, 2024

Published online: April. 2025

Keywords:

Erosion Modelling,
Plot Length,
Rainfall Intensity,
Soil Loss.

ABSTRACT

This research aimed to determine the soil erodibility factor (K) of the Universal Soil Loss Equation (USLE) by direct measurement of soil loss at natural runoff plots (K_{obs}), and to compare it with the estimated K by the USLE-nomograph (K_{est}). The research carried out at the Sanganeh Soil Conservation Research Site located in the northeast of Iran, in dry rangelands. The soil loss data were obtained from 19 plots with lengths of 20 and 25 m, and different conditions in terms of soil, slope, vegetation cover, and rock fragments under 20 natural rainfall events. The results showed that average intensity and the maximum 30-minute intensity had a greater correlation with soil loss compared to the EI_{30} . Based on the results obtained, K_{est} is at least 24, 7, and 6 times of K_{obs} , obtained using the soil loss data of the long-term average, the year with the largest share, and the most intense event ($I_{ave} = \text{Max}I_{30} = 30.9 \text{ mm h}^{-1}$), respectively. The main reasons likely for this overestimation are the low intensity of erosive events and the resulting uncertainties in the measurement of soil loss and other USLE model factors in dry rangelands. Therefore, based on the overestimation of the USLE nomograph, more research, especially with a longer statistical period or using a rainfall simulator with an intensity of 63 mm h^{-1} in field, is needed to develop appropriate relationships to estimate the K factor in rangelands in dry regions.

Cite this article: Avizhgan, A., Asadi, H., Arabkhedri, M., Noor, H. & Nazari Samani, A. (2025). The challenges of measuring and estimating the soil erodibility factor (K) of the (R) USLE model in rangelands of arid region, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (2), 351-371. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.386195.669845>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.386195.669845>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Erodibility represents the inherent susceptibility of the soil to detachment and transportation by rainfall and surface runoff, which was introduced as K factor in the Universal Soil Loss Equation (USLE). Assuming that the methods of determining the other USLE factors (i.e. R, LS, C, and P) are appropriate, it was hypothesized that the USLE nomograph or its derived classical equation is the best available prediction tool for the K factor. This research aimed to determine the K factor by direct measurement of soil loss at natural runoff plots (K_{obs}), and to compare it with the estimated K by the USLE nomograph (K_{est}). The research was carried out at the Sanganeh Soil Conservation Research site with an area of 20 ha located in the northeast of Iran, in dry rangelands.

Method

To consider different conditions in terms of slope steepness, soil, vegetation cover, surface rock fragments, and soil depth, 19 plots were installed throughout the site. The plots had lengths of 20 and 25 m and a fixed width of 2 m. Unlike the USLE unit plot, the plots were not disturbed and were in natural conditions. After installing the plots, the most important soil attributes and surface characteristics were measured in each hillslope. They include vegetation cover, primary soil particle size distribution and surface rock fragments, structural stability index, electrical conductivity, pH, organic carbon, cation exchange capacity, and carbonate calcium equivalent.

A recording gauge meteorological station with a measurement precision of 0.2 mm has been established to collect the characteristics of each rainfall event in the vicinity of the site. To perform calculations related to the rainfall erosivity index, the data of each event was converted to a time step of 5 minutes and then the relevant calculations were performed. During the research (1997-2000 and 2006-2009), 20 erosive rainfall-runoff events were recorded. The erosive events were defined based on Renard et al. (1997)'s conditions. To determine the concentration of sediment resulting from each rainfall event, after thoroughly mixing the runoff and sediment, a two-liter sample was taken using the valve at the bottom of the tank and transferred to the laboratory. Sediment samples were transferred to the laboratory and placed in an oven at 105 °C for 24 hours. The concentration of each sample was determined in terms of $mg L^{-1}$ and finally, it was converted into $t ha^{-1} y^{-1}$ using the volume of the tank and the dimensions of the plot. Then, K_{obs} calculated by $K_{obs} = \frac{A}{RLSCP}$ for three cases: 1) the long-term average of soil loss during the research period. 2) the year with the highest annual soil loss, and 3) events with the highest contribution to annual soil loss (high-intensity events). Finally, K_{est} was estimated by applying silt + very fine sand correction (> 70%) by the classic equation of the USLE nomograph. and comparing to K_{obs} .

Results

The average intensity (I_{ave}) of the 20 measured rainfall events during the seven years was $11.6 mm h^{-1}$. The average maximum 30-minute intensity ($MaxI_{30}$) was $16.7 mm h^{-1}$. The annual rainfall erosivity index (EI_{30}) was $45.8 MJ mm ha^{-1} h^{-1} y^{-1}$. Based on the erosive events (20 events) in the 7-year research period, the average annual soil loss was about $22.3 kg ha^{-1} yr^{-1}$ in the whole site. While the minimum average annual soil loss was 0.11 (Plot no. 4), its maximum for was about $213.69 kg ha^{-1} y^{-1}$ (Plot no. 15).

In general, no relationship ($R^2 = 0.0142$) was observed between K_{obs} and K_{est} . The values of long-term K_{obs} varied in the range of 0.00004 (plot no. 4) to 0.00293 (plot no. 1) $t ha h MJ^{-1} ha^{-1} mm^{-1}$, while the values of K_{est} were in the range of 0.056 (plot no. 18 and 19) to 0.077 (plot no. 5 and 6) $t ha h MJ^{-1} ha^{-1} mm^{-1}$. Using the seven-year average soil loss, the year with the highest contribution to the total soil loss, and soil loss induced by the event with the highest intensity ($I_{ave} = MaxI_{30} = 30.9 mm h^{-1}$), K_{est} was at least 24, 7, and 6 times of K_{obs} , respectively.

Conclusion

The results showed that the value of K_{est} obtained from the USLE nomograph significantly overestimated the K_{obs} value, leading to the rejection of the research hypothesis. The main reasons for this overestimation would be the low intensity of erosive events and the resulting uncertainties in the measurement of soil loss, in on hand, and determination uncertainty of the other USLE model factors (R, LS, C and P) in dry rangelands, on the other hand. The intensity of the rains used to develop the USLE nomograph was $63 mm h^{-1}$. Events of this intensity rarely occur in arid regions. On the other hand, due to the variable duration of the drought period and fear in arid regions, the periods of 1-3 years, and even 7 years of measuring the K factor are associated with a high uncertainty and errors. Therefore, based on the overestimation of the USLE nomograph, further research is needed, especially with a longer statistical period or using a rainfall simulator with an intensity of

$>63 \text{ mm h}^{-1}$ in the field conditions, to develop appropriate relationships for estimating the K factor in rangelands in arid regions.

Author Contributions

Ayoub Avizhgan: Design, Analysis, and Interpretation of data Writing- Original draft preparation, Visualization. Hossein Asadi: Conceptualization, Methodology, Design, Revision of the manuscript and Editing. Mahmood Arabkhedri: Design, Revision of the manuscript and Editing. Hamzeh Noor: Revision of the manuscript and Editing. Aliakbar Nazari Samani: Revision of the manuscript and Editing.

Data Availability Statement

Data can be sent from the corresponding author by email upon request.

Acknowledgements

We are grateful to the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute of Tehran for for measurement and data collection.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

چالش‌های اندازه‌گیری و برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) مدل (R)USLE در مراتع مناطق خشک

ایوب اویژگان^۱ | حسین اسدی^۲ | محمود عرب‌خدری^۳ | حمزه نور^۴ | علی‌اکبر نظری سامانی^۵۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: a.avizhgan@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: ho.asadi@ut.ac.ir۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران، رایانامه: arabkhedri.mahmood@yahoo.com۴. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران، رایانامه: noorhamze@gmail.com۵. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: aknazari@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این تحقیق تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری (K) معادله جهانی هدر رفت خاک (USLE) به روش مستقیم با بهره‌گیری از کرت‌های رواناب طبیعی (K_{obs}) و مقایسه آن با روش غیرمستقیم برآوردی با نمودار USLE (K_{est}) در مراتع مناطق خشک در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه واقع در شمال شرق ایران بود. داده‌های هدر رفت خاک در ۱۹ کرت با طول ۲۰ و ۲۵ متر، و شرایط مختلف از نظر خاک، شیب، پوشش گیاهی و سنگریزه سطحی تحت ۲۰ رخداد بارندگی از سال ۱۳۷۵-۱۳۷۹ و ۱۳۸۸-۱۳۸۵ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد شدت متوسط و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای نسبت به شاخص فرسایش‌پذیری باران (EI_{30}) همبستگی بیش‌تری با هدر رفت خاک داشتند. بر اساس نتایج حاصل شده، K_{est} به ترتیب حداقل ۱۲، ۱۴ و ۲۴ برابر K_{obs} به‌دست آمده از داده‌های هدر رفت خاک میانگین بلندمدت سالانه، سال با بیش‌ترین سهم از کل هدر رفت خاک و شدیدترین رخداد ($I_{ave} = \text{Max}I_{30} = 30.9 \text{ mm h}^{-1}$) است. دلایل احتمالی اصلی برای این بیش برآوردی شدت کم رخدادهای فرسایش و عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری هدر رفت خاک و دیگر فاکتورهای مدل USLE در مراتع خشک هستند. بنابراین، بر اساس بیش‌برآوردی نمودار USLE، تحقیقات بیش‌تری به ویژه با دوره آماری طولانی‌تر یا با استفاده از شبیه‌ساز باران با شدت ۶۳ میلی‌متر بر ساعت در شرایط میدانی برای توسعه روابط مناسب برای برآورد فاکتور K در مراتع مناطق خشک مورد نیاز است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

شدت بارندگی،

کرت فرسایش،

مدلسازی فرسایش،

هدر رفت خاک.

استناد: اویژگان؛ ایوب، اسدی؛ حسین، عرب‌خدری، محمود؛ نور؛ حمزه، نظری سامانی؛ علی‌اکبر (۱۴۰۴). چالش‌های اندازه‌گیری و برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) مدل

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.386195.669845>، ۳۷۱-۳۵۱، ۵۶ (۲)، ۳۷۱-۳۵۱.

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.386195.669845>

مقدمه

فرسایش خاک یک مشکل زیست‌محیطی اساسی در سراسر جهان از جمله ایران است (اسدی، ۱۴۰۱) که اندازه‌گیری و برآورد دقیق آن بسیار حائز اهمیت است. معادله جهانی هدر رفت خاک (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) و نسخه‌های جایگزین آن از جمله معادله جهانی هدر رفت خاک تجدیدنظر شده (RUSLE)^۱ نسخه ۱ (Renard et al., 1997) و نسخه ۲ (RUSLE2) (Foster, 2005) رایج‌ترین مدل‌های استفاده شده برای پیش‌بینی فرسایش خاک هستند. این مدل‌ها به طور گسترده برای برآورد خطر فرسایش خاک (Asadi et al., 2017; Khaleghpanah et al., 2018; Khaleghpanah et al., 2016) و در تلفیق با مدل‌های نسبت تحویل رسوب برای برآورد خطر فرسایش و رسوبدهی (Fallah et al., 2023) در حوضه‌های مرتعی کشور مورد استفاده هستند. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) که تأثیر زیادی بر صحت پیش‌بینی هدر رفت خاک دارد، عامل بسیار مهمی در این مدل‌ها است (Zhang et al., 2016). فاکتور K نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خاک در برابر اثر عوامل اقلیمی فرسایش یعنی بارش و رواناب سطحی است (Eftthimiou, 2020). به بیان دیگر، فاکتور K یک فاکتور کلیدی در مدلسازی فرسایش خاک است که حساسیت خاک به بارندگی (جدا شدن توسط پاشمان) و جریان سطحی (جدا شدن توسط تنش برشی و انتقال رسوب) را بیان می‌کند (Renard et al., 1997; Wischmeier & Smith, 1978; Zhao et al., 2018) و اثر ترکیب شده بارندگی، نفوذ و رواناب بر فرسایش را منعکس می‌کند (Raj et al., 2023). فاکتور K یک ویژگی مرکب خاک است که وابسته به طیف وسیعی از ویژگی‌های خاک است. از مهم‌ترین ویژگی‌های ذاتی خاک مؤثر بر فاکتور K می‌توان توزیع اندازه ذرات (سیلت، شن خیلی ریز، رس، سنگریزه سطحی)، ماده آلی، ساختمان خاک، نفوذپذیری، آهک (Khormai et al., 2008; A. Vaezi et al., 2010; A. Vaezi et al., 2008; Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2016; et al., 2017)، رطوبت خاک (Kinnell, 2015)، مقاومت برشی خاک (Hussein et al., 2007)، تخلخل، جرم مخصوص ظاهری، ترکیب شیمیایی خاک و نوع رس را ذکر کرد (Arabkhedri et al., 2020; Auerswald et al., 2016; Raj et al., 2023; A. Vaezi et al., 2008; Wischmeier et al., 1978).

به طور کلی، فاکتور K را می‌توان با استفاده از دو روش مستقیم و غیرمستقیم محاسبه کرد. روش مستقیم که ایده‌آل‌ترین روش اندازه‌گیری آن است (K_{Obs})، مستلزم اندازه‌گیری‌های میدانی بلندمدت هدر رفت خاک در کرت استاندارد (کرت با طول ۲۲/۱۳ متر، عرض ۱/۸۳ متر، شیب ۹ درصد و تحت شرایط آیش دائم که در جهت شیب زمین شخم خورده) تحت رخدادهای بارندگی - رواناب طبیعی یا اندازه‌گیری‌های میدانی کوتاه‌مدت توسط شبیه‌ساز باران است. هزینه زیاد، زمان‌بر بودن (Corral-Pazos-de-Provens et al., 2023; Eftthimiou, 2020; Raj et al., 2023) و غیرعملی بودن این روش در مقیاس‌های مکانی بزرگ، محققان را بر آن داشت تا آن را با استفاده از ویژگی‌های خاک مانند بافت، ساختمان، نفوذپذیری، ماده آلی و غیره با روش‌های غیرمستقیم همانند نمودار USLE، مدل EPIC (Sharpley & Williams, 1990)، مدل Dg (Römken et al., 1997) برآورد کنند (Auerswald et al., 2016; Corral-Pazos-de-Provens et al., 2023; Römken et al., 1997; Torri et al., 1997; A. Vaezi et al., 2008; Williams et al., 1971; Wischmeier & Smith, 1978). از میان روش‌های مختلف برآورد فاکتور K (K_{Est})، نمودار USLE (Wischmeier et al., 1971) و معادله کلاسیک مشتق شده از آن (Wischmeier & Smith, 1978)، بیش‌ترین کاربرد را در سراسر جهان دارد. این نمودار از مجموعه داده‌های قابل دستیابی آسان‌تر مانند بافت خاک، ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری خاک استفاده می‌کند (Eftthimiou, 2020). این نمودار برای تعیین K_{Est} توسط Wischmeier et al. (1971) از داده‌های شبیه‌ساز باران با شدت بیش‌تر از ۶۳ میلی‌متر بر ساعت حاصل از کرت‌های ۱۰/۶۷ متری (۳۵ فوت) در اراضی زراعی و مناطق مسکونی در خاک‌های ایالت‌های میانی آمریکا که عمدتاً بافت متوسط داشتند (۸۱ درصد) به‌دست آمد و با داده‌های طولانی مدت حاصل از کرت‌های فرسایش تحت باران طبیعی ارزیابی شد.

استفاده صحیح از نمودار USLE به معنای درک محدودیت‌های آن است که تا حد زیادی از تجربی بودن آن ناشی می‌شود. از این رو، نمی‌تواند برای همه انواع خاک‌ها استفاده شود (Bagarello et al., 2022; Corral-Pazos-de-Provens et al., 2023; Khormai et al., 2017; Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2016; A. Vaezi et al., 2010; A. Vaezi et al., 2008). استفاده مناسب از نمودار مستلزم رعایت چهار محدودیت است (Auerswald et al., 2016): ۱) سیلت به علاوه شن خیلی ریز بیش‌تر

1 Universal Soil Loss Equation (USLE)

2 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

از ۷۰ درصد، ۲) ماده آلی بیش‌تر از ۴ درصد، ۳) مقدار فرسایش‌پذیری خاک که نمی‌تواند کم‌تر از ۰/۰۲ تن در ساعت بر مگاژول در میلی‌متر باشد و ۴) درصد سنگریزه سطحی بیش از ۱/۵ درصد (حد اثرگذاری سنگریزه سطحی ۱/۵ درصد است که کم‌تر از آن تأثیری بر فرسایش‌پذیری خاک ندارد). محققین زیادی (Auerswald et al., 2016; Hussein et al., 2007; Khormai et al., 2017;) کردند که نمودار USLE دارای بیش‌برآوردی K_{est} نسبت به مقدار K_{obs} آن است. (Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2016; A. Vaezi et al., 2010; A. Vaezi et al., 2008; Zhang et al., 2016) مقدار K_{est} با استفاده از نمودار را دو برابر مقدار K_{obs} آن در خاک‌های آهکی واقع در اقلیم نیمه‌خشک جنوب ایران گزارش کردند. (2010) Vaezi et al. این بیش‌برآوردی نمودار را بین ۷/۴ تا ۹/۶ برابر در خاک‌های آهکی واقع در اقلیم نیمه‌خشک شمال غرب ایران گزارش کردند. همچنین Khormai et al. (2017) این بیش‌برآوردی را ۱۸۲ برابر در خاک‌های لسی و آهکی در اقلیم نیمه‌خشک واقع در شمال شرق ایران گزارش کردند. این محققین بر این باور هستند که نمودار USLE در خاک‌های تقریباً عاری از آهک مناطق نیمه‌مرطوب آمریکا توسعه یافته است کاربرد آن در خاک‌های آهکی ایران منجر به بیش‌برآوردی فاکتور K می‌شود (, Khormai et al., 2008 A. Vaezi et al., 2016; Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2017;)، زیرا آهک سبب بهبود ساختمان خاک که یکی از متغیرهای پنج‌گانه تعیین فاکتور K با استفاده از نمودار USLE است. (2017) Khormai et al. دلیل بیش‌برآوردی فاکتور K توسط نمودار را توسعه آن با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌ساز باران در شدت زیاد (بیش از ۶۳ میلی‌متر بر ساعت) ذکر کردند که چنین شدت‌هایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ندرت رخ می‌دهند. عرب‌خدری و همکاران (۱۳۹۹) مقدار بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار را در مقیاس آزمایشگاه در شدت‌های زیاد (۳۳، ۶۴ و ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت) گزارش کردند. (2007) Hussein et al. این بیش‌برآوردی را ۱۰ برابر در اقلیم نیمه‌خشک شمال عراق با شدت بارندگی کم‌تر از ۲۰ میلی‌متر بر ساعت گزارش کردند. (2016) Zhang et al. مقدار بیش‌برآوردی را دو تا سه برابر در چین گزارش کردند و بیان کردند که احتمالاً اقلیم عامل اصلی این تفاوت بوده است. Bagarello et al. (2022) این نسبت را ۵/۵ برابر در یک خاک رسی (۶۲ درصد رس) در جنوب ایتالیا گزارش کردند. اما (Cassol et al., 2018) همبستگی بالایی را بین K_{est} و K_{obs} با استفاده از نمودار USLE در مناطق مرطوب برزیل گزارش کردند.

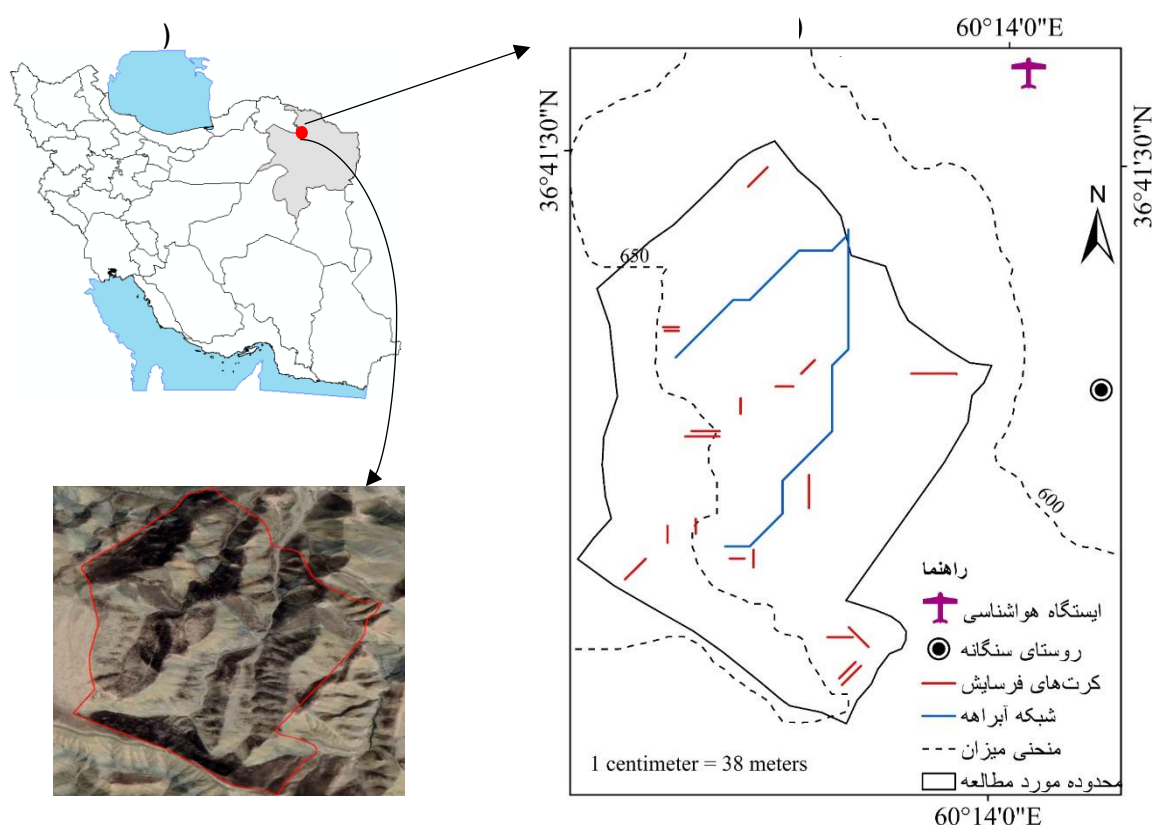
از آنجا که مدل USLE و معادله کلاسیک آن برای محاسبه K_{est} با استفاده از داده‌های دستگاه شبیه‌ساز باران با شدت بیش از ۶۳ میلی‌متر بر ساعت حاصل از ۵۵ خاک عمدتاً با بافت متوسط (۸۱ درصد)، آهک کم، پایداری خاکدانه ضعیف و اقلیم نیمه‌مرطوب در اراضی زراعی و مناطق مسکونی در میدوست آمریکا (ایالت‌های میانی) توسعه یافت (Renard et al., 1997)، یافته‌های پیشین تأکید می‌کنند ممکن است در دیگر مناطق، اقلیم‌ها و کاربری‌های با شرایط متفاوت قابل کاربرد نباشد (, Anache et al., 2015; Ostovari et al., 2016). به طور کلی K_{est} با استفاده از نمودار USLE با استفاده از K_{obs} حاصل از کورت استاندارد ارزیابی می‌شود و نتایج حاصله شده به دیگر کاربری‌ها از جمله اراضی مرتعی تعمیم داده می‌شود. حال آن که مراتع، کشت نشده و شخم نمی‌خورند (Erosion & Rangelands, 1982) و دارای ساختمان و نفوذپذیری خاک متفاوت از کورت شخم‌خورده هستند. در مطالعه حاضر، با فرض این که روش‌های تعیین دیگر فاکتورهای مدل USLE (R ، LS ، C و P) مناسب بوده و خطای اندکی دارند، کارایی نمودار USLE یا معادله کلاسیک حاصل از آن به عنوان بهترین ابزار پیش‌بینی موجود برای K_{est} مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اینکه حدود ۵۰ درصد مساحت کشور را مراتع تشکیل می‌دهند (Eftekhari et al., 2012). همچنین حدود ۸۵ درصد کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (Mansouri Daneshvar et al., 2019) و USLE به طور گسترده در اراضی مرتعی استفاده می‌شود، برآورد دقیق فاکتور K در این اراضی و اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین هدف از این تحقیق تعیین فاکتور K با استفاده از داده‌های تلفات خاک اندازه‌گیری شده از کورت‌های طبیعی با طول ۲۰ و ۲۵ متر، شیب بیش از ۹ درصد و شرایط مختلف واقع در مراتع خشک شمال شرق کشور و مقایسه آن با K برآوردی حاصل از نمودار USLE است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه با مساحت ۲۰ هکتار یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های ارزیابی فرسایش خاک در کشور است که به منظور بررسی فاکتورهای مؤثر بر فرسایش خاک در مراتع خشک شمال شرق کشور که به مراتع شکرکلات نادری معروف هستند توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی در سال ۱۳۷۵ در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق

مشهد تأسیس شد. طول و عرض جغرافیایی آن به ترتیب $۱۳^{\circ} ۶'$ شرقی و $۳۶^{\circ} ۴'$ شمالی می‌باشند (شکل ۱). شیب متوسط کل پایگاه برابر ۳۳ درصد می‌باشد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی بلندمدت آن، متوسط بارندگی و دمای سالانه آن به ترتیب ۱۹۸ میلی‌متر و $۱۴/۶$ درجه سلسیوس می‌باشند. پوشش گیاهی غالب آن درمنه است و از نظر توپوگرافی تپه‌ماهوری است به گونه‌ای که متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۶۴۰ متر می‌باشد. براساس مطالعات خاکشناسی دو رده خاک شامل انتی‌سول و اریدی‌سول در پایگاه شناسایی و جداسازی شدند (به نقل از عرب‌خدری و نور، ۱۴۰۰).



شکل ۱. موقعیت مکانی پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه در الف) استان خراسان رضوی، ب) محدوده پایگاه و ج) تصویر ماهواره‌ای پایگاه

نصب کرت‌ها

به منظور در نظر گرفتن شرایط مختلف از نظر درصد شیب، خاک، پوشش گیاهی، سنگریزه سطحی و عمق خاک، ۱۹ کرت با طول ۲۰ و ۲۵ متر (۱۵ کرت با طول ۲۰ متر و ۴ کرت با طول ۲۵ متر) در کل پایگاه نصب شدند (شکل ۱ و جدول ۱). عرض ثابت دو متر برای همه کرت‌ها در نظر گرفته شد. کرت‌ها با ورقه فلزی گالوانیزه با عرض $۲/۵$ سانتی‌متر، پنج سانتی‌متر در خاک و ۲۰ سانتی‌متر در سطح خاک، ساخته شدند. برخی کرت‌ها به دلیل سنگریزه‌دار بودن خاک و عدم امکان استفاده از ورقه فلزی با استفاده آجر ساخته شدند. تجهیزات لازم برای جمع‌آوری رواناب و رسوب شامل لوله PVC، ورقه فلزی گالوانیزه مثلثی شکل و مخزن ۲۲۰ لیتری ذخیره رواناب و رسوب در انتهای هر کرت نصب شد. بر خلاف کرت استاندارد، کرت‌ها فاقد هر گونه بهم‌خوردگی خاک و در شرایط طبیعی می‌باشند (عرب‌خدری و نور، ۱۴۰۰).

اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها

بعد از نصب کرت‌ها، مهم‌ترین خصوصیات خاک و مشخصات سطحی در هر دامنه شامل: پوشش گیاهی (Bonham, 2013)، توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و درصد سنگریزه سطحی (Gee & Or, 2002)، شاخص پایداری ساختمان^۱ (SSI) (Reynolds et al., 2009)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، pH، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم معادل (آهک) (Sparks et al., 2020) اندازه‌گیری شدند. خلاصه آماری برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پایگاه سنگانه در جدول ۲ ارائه شده است. خاک پایگاه دارای مقدار سیلت

1 Structural stability index (SSI)

زیادی است به گونه‌ای که کم‌ترین مقدار سیلت برابر ۴۰/۱ درصد، بیش‌ترین مقدار سیلت برابر ۶۶ درصد و میانگین آن ۵۵/۷ درصد می‌باشد. پایگاه از نظر مقدار کربن آلی خاک فقیر می‌باشد. دامنه مقدار کربن آلی بین ۰/۱۹-۱/۵ درصد و میانگین آن برابر ۰/۷۳ درصد می‌باشد. خاک پایگاه دارای ساختمان تخریب شده ($SSI \leq 5\%$)، غیرشور، آهکی و دارای بافت متوسط (دو کلاس لوم سیلتی و لوم رس سیلتی) می‌باشد. pH آن قلیایی و درصد کلسیم کربنات معادل آن در دامنه بین ۰/۱-۱۰ و میانگین آن برابر ۴/۷ درصد می‌باشد.

جدول ۱. برخی از مشخصات کرت‌های مورد بررسی (n=۱۹) (به نقل از عرب‌خدروی و نور، ۱۴۰۰)

شماره کرت	طول کرت (متر)	شیب کرت (درصد)	پوشش گیاهی (درصد)	سنگریزه سطحی (درصد)
۱	۲۰	۱۰	۷۶/۳	۰
۲	۲۰	۲۵	۷۱/۳	۰
۳	۲۵	۲۵	۷۳	۰
۴	۲۰	۳۰	۷۹/۵	۰
۵	۲۰	۳۰	۲۳/۵	۴۰
۶	۲۵	۳۰	۲۳/۳	۴۰
۷	۲۰	۳۰	۳۲/۳	۶۷/۷
۸	۲۰	۳۵	۵۱/۸	۲۷
۹	۲۰	۴۰	۷۸	۰
۱۰	۲۰	۵۰	۴۳/۳	۳/۳
۱۱	۲۰	۵۵	۷۰/۸	۰
۱۲	۲۰	۴۰	۴	۰
۱۳	۲۰	۴۰	۱۵	۰
۱۴	۲۵	۴۰	۱۵	۰
۱۵	۲۵	۶۰	۲	۰
۱۶	۲۰	۴۰	۸۱/۳	۰
۱۷	۲۰	۶۰	۱۱/۳	۰
۱۸	۲۰	۶۰	۱۵	۰
۱۹	۲۰	۶۵	۱۱/۵	۰

جدول ۲. خلاصه آماری برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متر خاک پایگاه در دامنه‌های مختلف (بهبود یافته به نقل از عرب‌خدروی و نور، ۱۴۰۰)

ویژگی خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
سنگریزه سطحی (درصد)	۰	۷۷/۷	۵/۶	۲۰
شن (درصد)	۶/۶	۳۶	۲۴/۱	۹/۵
شن خیلی ریز (درصد)	۵/۳	۱۸/۸	۱۴/۳	۴/۳
سیلت (درصد)	۴۰/۱	۶۶/۰	۵۵/۷	۴/۷
رس (درصد)	۹/۰	۳۵/۳	۲۰/۴	۷/۴
شاخص پایداری ساختمان خاک (درصد)	۰/۵	۳	۱/۷	۰/۹
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۶۰	۳/۳۰	۱/۴۶	۰/۹۹
pH	۷/۷۰	۸/۱۰	۷/۹۰	۰/۱
کربن آلی (درصد)	۰/۱۹	۱/۵۰	۰/۷۳	۰/۳۹
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۰/۱	۱۰	۴/۷	۳/۱
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم)	۷/۲۰	۱۴/۲۰	۱۰/۶۰	۱/۷۲
پوشش گیاهی (درصد)	۰	۸۶/۷	۴۳/۵	۲۷/۴

یک ایستگاه هواشناسی مجهز به باران‌سنج ثابت با دقت اندازه‌گیری ۰/۲ میلی‌متر حجمی برای جمع‌آوری مشخصات هر رخداد بارندگی در مجاورت پایگاه تاسیس شده است (شکل ۱) (برای انجام محاسبات مربوط به شاخص فرسایش باران، داده‌های هر رگبار به گام زمانی ۵ دقیقه‌ای تبدیل شد و سپس محاسبات مربوطه انجام شد). در طول هفت ساله تحقیق (۱۳۷۵-۱۳۷۹ و ۱۳۸۵-۱۳۸۸)، ۲۰ رخداد بارندگی-رواناب ثبت گردید. برای تعیین غلظت رسوب حاصل از هر رخداد بارندگی، بعد همزن زدن کامل رواناب و رسوب، یک

نمونه به حجم دو لیتر با استفاده از شیر کف مخزن برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. بعد از جمع‌آوری داده‌ها، مخازن کربن برای جمع‌آوری داده‌های رخدادهای بعدی تخلیه و مهیا شدند. نمونه‌های رسوب به آزمایشگاه منتقل شده و در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. غلظت هر نمونه بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شد و سرانجام با استفاده از حجم مخزن و ابعاد کربن به تن بر هکتار در سال تبدیل شد (عرب‌خدری و نور، ۱۴۰۰).

تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک مشاهده شده

فاکتور K مشاهده شده (K_{Obs}) با استفاده از مدل $R/USLE$ و رابطه ۱، با فرض درست بودن روش تعیین سایر فاکتورهای مدل (L, S, R, C و P)، با استفاده از داده‌های رخدادهای فرسایش (۲۰ رخداد)، بر اساس شروپ (Renard et al., 1997) (رخدادهای با بارندگی تجمعی بیش از ۱۲/۷ میلی‌متر، مگر اینکه شدت بارندگی بزرگ‌تر یا مساوی ۲۵/۴ میلی‌متر بر ساعت باشد) در سه حالت (۱) رخدادهای با بیش‌ترین سهم در هدر رفت خاک (رخدادهای با شدت زیاد)، (۲) سال با بیش‌ترین سهم از کل هدر رفت خاک و (۳) میانگین بلندمدت هدر رفت خاک در طول دوره تحقیق محاسبه شد (Renard et al., 1997):

$$K_{Obs} = \frac{A}{RLSCP} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، K_{Obs} : فاکتور فرسایش‌پذیری خاک مشاهده شده ($t \text{ ha } h \text{ MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}$)، A : متوسط سالانه هدر رفت خاک حاصل از فرسایش شیبی و بین‌شیاری (ورقه‌ای) ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)، R : فاکتور فرسایش‌پذیری باران-رواناب ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)، L : فاکتور طول شیب (بدون بعد)، S : فاکتور تندی شیب، C : فاکتور مدیریت پوشش (بدون بعد) و P : فاکتور عملیات حفاظت خاک (بدون بعد) می‌باشد. هر یک فاکتورهای مذکور به شرح زیر تعیین شدند (روابط ۹-۲):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، R متوسط فاکتور فرسایش‌پذیری باران-رواناب سالانه ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)، n : تعداد سال‌ها، m_j : تعداد رخدادهای فرسایش در یک سال j ، EI_{30} : شاخص فرسایش‌پذیری باران یک رخداد منفرد k است. EI_{30} ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) که حاصل ضرب کل انرژی جنبشی و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای هر رخداد فرسایش است، برای یک رخداد منفرد k به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۳):

$$EI_{30\text{-event}} = \left(\sum_{k=1}^m e_r v_r \right) I_{30} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، e_r : انرژی بارندگی واحد ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)، v_r : عمق بارندگی (mm) در طول دوره زمانی t I_{30} : حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بارندگی در طول یک رخداد (mm h^{-1}) است. e_r : برای هر گام زمانی با استفاده از رابطه ۴ زیر محاسبه شد (Brown & Foster, 1987):

$$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، i_r : شدت بارندگی در طول گام زمانی (در این پژوهش ۵ دقیقه) است (mm h^{-1}).

فاکتور LS با استفاده از روابط ۸-۵ برآورد شدند (McCool et al., 1997):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، L : فاکتور طول شیب، λ : طول معمول شیب، $22/13$ طول کرت استاندارد m : توان طول شیب که برابر است با نسبت فرسایش شیبی (β) به فرسایش بین‌شیاری ($1 + \beta$) و به صورت زیر محاسبه شد:

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{[3 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56]} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & s < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & s \geq 9\% \end{cases} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، θ : زاویه شیب بر حسب رادیان است.

فاکتور C با استفاده از رابطه ۹ زیر محاسبه شد (Wischmeier & Smith, 1978):

$$C = 0.5665 \exp(-0.049 \times c) \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن C : مجموع درصد پوشش آسمانه، پوشش در تماس با خاک و سنگریزه سطحی است. فاکتور P به دلیل عدم انجام عملیات حفاظت خاک، برابر یک در نظر گرفته شد.

تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری برآوردی

فاکتور K برآوردی (K_{est}) با استفاده معادله کلاسیک نمودار USLE (رابطه ۱۰) برآورد شد (Wischmeier & Smith, 1978):

$$K_{est} = [2.1 \times 10^{-4}(12 - OM)M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]/100 \times 0.1317 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن، K : فاکتور فرسایش‌پذیری خاک ($t \text{ ha h MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)، M : برابر حاصل ضرب مجموع سیلت + شن خیلی ریز ($0.002 - 0.1 \text{ mm}$) و ($100 - \text{clay}$) بر حسب درصد، OM : ماده آلی خاک بر حسب درصد، s : کلاس ساختمان خاک (برای بافت‌های لوم سیلتی و لوم رس سیلتی برابر ۳ است (Efthimiou, 2020)، p : کلاس نفوذپذیری خاک (که برای بافت‌های لوم سیلتی و لوم رس سیلتی به ترتیب برابر ۳ و ۵ می‌باشد (Römken et al., 1997))، و عدد 0.1317 برای تبدیل واحد از واحد امپریال به واحد متریک است. این رابطه برای خاک‌های با مقدار سیلت + شن خیلی ریز کم‌تر از ۷۰ درصد کاربرد دارد. با توجه به اینکه نمونه خاک تعداد زیادی از کرت‌ها این شرط را نقض کردند، برای رفع این مشکل در خاک‌های با بیش از ۷۰ درصد سیلت + شن خیلی ریز، قسمت اول معادله فوق (رابطه ۱۰) یعنی ($2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14}$) با رابطه ۱۱ جایگزین شد (Auerswald et al., 2016):

رابطه ۱۱)

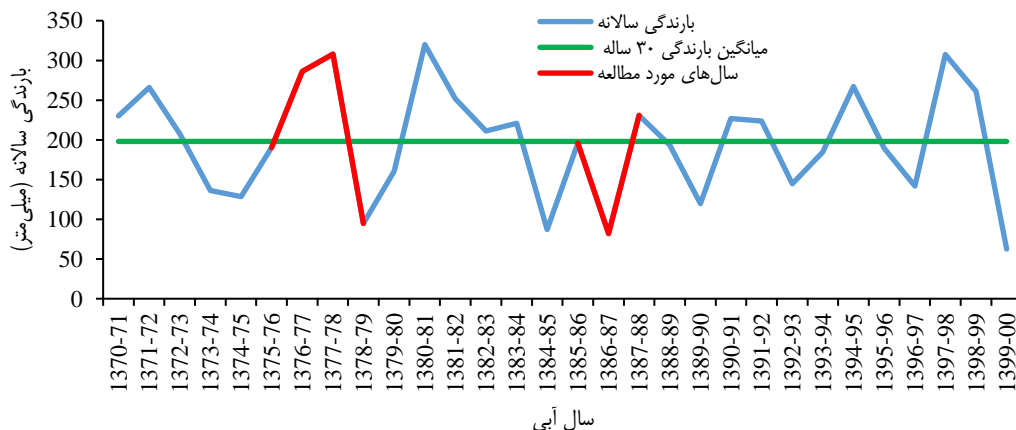
$$2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14} = 1.75 \times 10^{-4} \times (f_{Si+VFS} \times (100 - f_{Cl}))^{1.14} + 0.0024 \times f_{Si+VFS} + 0.16$$

که در آن، f_{Si+VFS} : درصد سیلت + شن خیلی ریز است و f_{Cl} : درصد رس است.

نتایج

مشخصات بارندگی سال‌های مورد مطالعه

مقادیر بارندگی سالانه دوره هفت ساله تحقیق در قالب سری زمانی مقدار بارندگی بلندمدت ۳۰ ساله ایستگاه باران‌سنج ساده در مجاورت پایگاه بر حسب سال آبی در شکل ۲ آمده است. میانگین بارندگی سالانه بلندمدت ۱۹۸ میلی‌متر می‌باشد. در حالی که کم‌ترین مقدار بارندگی سالانه ۶۲/۵ میلی‌متر مربوط به سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و بیش‌ترین مقدار آن ۳۲۰ میلی‌متر مربوط به سال آبی ۱۳۸۰-۸۱ بود. نیمی از سال‌ها (۱۵ سال) دارای بارندگی سالانه کم‌تر از متوسط بلندمدت (۱۹۸ میلی‌متر) و نیمی از سال‌ها دارای بارندگی سالانه بیش‌تر از متوسط بلندمدت بودند. میانگین بارندگی سالانه در طول دوره هفت ساله تحقیق برابر با میانگین بلندمدت ۳۰ ساله (۱۹۸ میلی‌متر) بود به گونه‌ای که سه سال (۱۳۷۶-۷۷، ۱۳۷۷-۷۸، ۱۳۸۷-۸۸) دارای بارندگی سالانه بیش‌تر از میانگین بلندمدت و چهار سال (۱۳۷۵-۷۶، ۱۳۷۸-۷۹، ۱۳۸۵-۸۶ و ۱۳۸۶-۸۷) دارای بارندگی سالانه کم‌تر از میانگین بلندمدت بودند (شکل ۲). در حالی که کم‌ترین مقدار بارندگی سالانه ۸۲ میلی‌متر مربوط به سال آبی ۱۳۸۶-۸۷ و بیش‌ترین مقدار آن ۳۰۸ میلی‌متر مربوط به سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ بود.



شکل ۲. سری زمانی ۳۰ ساله مقدار بارندگی سالانه ایستگاه هواشناسی پایگاه سنگانه

مشخصات رخدادهای بارندگی

برخی از مشخصات ۲۰ رخداد بارندگی منجر به تولید رواناب و رسوب در دوره هفت ساله تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است. کم‌ترین مقدار بارندگی، ۶/۴ میلی‌متر مربوط به رخداد ثبت شده در تاریخ ۱۳۸۷/۰۲/۱۵ و بیش‌ترین مقدار آن، ۵۴/۲ میلی‌متر مربوط به رخدادی در تاریخ ۱۳۷۶/۱۱/۱۹ بود. بیش‌ترین شدت متوسط و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای برابر با ۳۰/۹ میلی‌متر بر ساعت بود که مربوط به کم‌ترین مقدار بارندگی ثبت شده در تاریخ ۱۳۸۷/۰۲/۱۵ بود (جدول ۳). کم‌ترین شاخص فرسایش‌پذیری باران ۳/۱ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در ساعت مربوط به رخداد ثبت شده در تاریخ ۱۳۷۸/۱۱/۲۵ و بیش‌ترین مقدار آن ۷۴/۹ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در ساعت مربوط به رخداد در تاریخ ۱۳۷۷/۰۱/۱۶ بود.

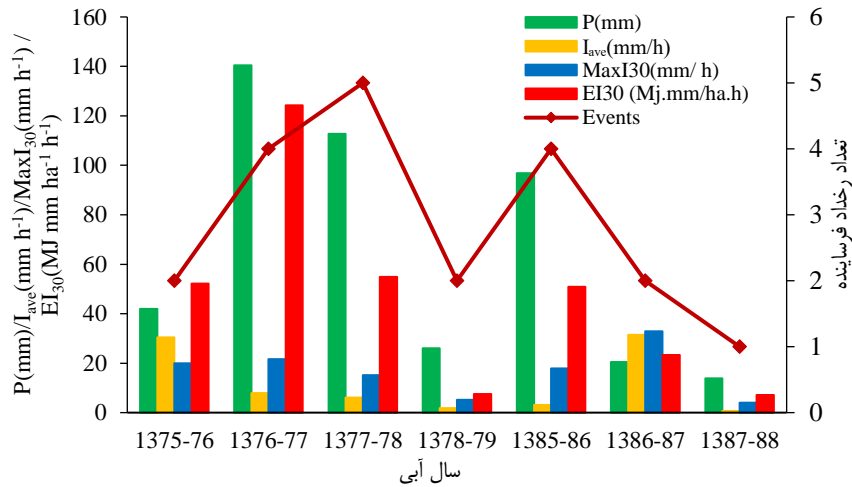
جدول ۳. برخی از مشخصات ۲۰ رخداد بارندگی در طول تحقیق

تاریخ	مقدار بارندگی (میلی‌متر)	شدت متوسط بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (میلی‌متر بر ساعت)	کل انرژی جنبشی (مگاژول بر هکتار)	شاخص فرسایش‌پذیری باران (مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در ساعت)
۱۳۷۶/۰۲/۱۵	۳۸/۸	۱/۶	۵/۶	۴/۸	۲۶/۷
۱۳۷۶/۰۳/۰۴	۷/۲	۲۸/۸	۱۴/۴	۱/۸	۲۵/۶
۱۳۷۶/۱۱/۱۹	۵۴/۲	۱/۵	۴/۴	۷/۳	۳۲
۱۳۷۶/۱۲/۰۸	۱۴/۶	۳/۲	۵/۲	۲/۴	۱۲/۴
۱۳۷۷/۰۱/۱۶	۵۳	۱/۸	۱۰	۷/۵	۷۴/۹
۱۳۷۷/۰۲/۰۴	۱۸/۶	۱/۴	۲	۲/۵	۴/۹
۱۳۷۷/۱۰/۲۱	۱۲/۶	۱	۱/۶	۱/۵	۲/۵
۱۳۷۷/۱۰/۲۸	۱۹/۸	۱/۳	۲/۴	۲/۶	۶/۱
۱۳۷۷/۱۱/۱۱	۳۸/۲	۱/۷	۶/۴	۵/۳	۳۴
۱۳۷۷/۱۲/۰۹	۲۴	۱	۲/۸	۲/۹	۸
۱۳۷۷/۱۲/۲۳	۱۸/۲	۱	۲	۲/۲	۴/۳
۱۳۷۸/۱۱/۲۵	۱۳	-/۵	۲/۶	۱/۲	۳/۱
۱۳۷۹/۰۱/۰۵	۱۳	۱/۳	۲/۶	۱/۷	۴/۴
۱۳۸۵/۱۰/۱۱	۱۶/۲	-/۸	۵/۶	۱/۸	۱۰/۱
۱۳۸۵/۱۱/۳۰	۱۲/۶	-/۴	۳/۶	۱/۲	۳/۷
۱۳۸۶/۰۱/۰۸	۵۱	۱/۱	۴/۷	۶/۳	۲۹/۵
۱۳۸۶/۰۱/۱۰	۱۷	-/۸	۴	۱/۹	۷/۶
۱۳۸۶/۰۹/۲۶	۱۴	-/۵	۲	۱/۴	۳/۸
۱۳۸۷/۰۲/۱۵	۶/۴	۳۰/۹	۳۰/۹	۱/۶	۱۹/۵
۱۳۸۷/۱۲/۱۵	۱۳/۸	-/۷	۴	۱/۵	۷/۲

رخدادهایی پررنگ شده، برای بررسی فرسایش‌پذیری مشاهده شده بر اساس رخداد مورد استفاده قرار گرفتند.

شکل ۳ برخی از مشخصات ۲۰ رخداد را بر اساس سال آبی نشان می‌دهد. بارندگی سالانه رخدادهای فرسایش‌پذیر در دامنه ۱۳/۸ (سال آبی ۸۸-۱۳۸۷) تا ۱۴۰/۴ میلی‌متر (سال آبی ۷۷-۷۶) بود. متوسط بارندگی سالانه رخدادهای فرسایش‌پذیر در طول دوره هفت ساله ۶۴/۶ میلی‌متر بود. از لحاظ شدت متوسط بارندگی، سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۸-۱۳۸۷ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین شدت متوسط و برابر ۳۱/۴ و ۰/۷ میلی‌متر بر ساعت بودند. شدت متوسط کل رخدادها (۲۰ رخداد) در طول دوره هفت ساله، برابر با ۱۱/۶ میلی‌متر بر ساعت بود. همانند شدت متوسط، سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۸-۱۳۸۷ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای ($MaxI_{30}$) و برابر با ۳۲/۹ و ۴ میلی‌متر بر ساعت بودند. در طول دوره هفت ساله تحقیق میانگین حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای ۱۶/۷ میلی‌متر بر ساعت بود. میانگین شاخص فرسایش‌پذیری باران سالانه (EI_{30})، ۴۵/۸ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در سال در طول دوره تحقیق بود. در حالی که کم‌ترین مقدار آن ۷/۲ مربوط به سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ با یک رخداد فرسایش‌پذیر و بیش‌ترین مقدار آن ۱۲۴/۲ مربوط به سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ با چهار رخداد فرسایش‌پذیر بود (شکل ۳). در طول دوره تحقیق، سال آبی ۷۷-۷۷ با مقدار بارندگی سالانه ۳۰۸ میلی‌متر، دارای بیش‌ترین مقدار بارندگی سالانه بود (شکل ۲). به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت لزوماً سال آبی با بیش‌ترین مقدار بارندگی سالانه دارای بیش‌ترین تعداد رخداد فرسایش‌پذیر و بیش‌ترین EI_{30} سالانه نیست (شکل ۳). همچنین می‌توان نتیجه گرفت که سال آبی با بیش‌ترین EI_{30} (سال آبی ۷۶-۷۷) دارای بیش‌ترین شدت متوسط و $MaxI_{30}$ نیست (شکل ۳). از سوی دیگر، در برخی سال‌ها همچون سال ۸۸-۱۳۸۷،

نیز ممکن است تقریباً باران فرساینده رخ ندهد.



شکل ۳. برخی از مشخصات ۲۰ رخداد فرساینده بر اساس سال (P: مقدار بارندگی، I_{ave}: شدت متوسط بارندگی، MaxI₃₀: حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای، EI₃₀: شاخص فرساینده باران، Events: تعداد رخدادهای فرساینده)

هدر رفت خاک حاصل از رخداد‌های فرساینده

مقدار هدر رفت خاک بر حسب کیلوگرم بر هکتار در سال و سهم آن بر حسب درصد در هر سال در دوره هفت ساله تحقیق در جدول ۴ ارائه شده است. به طور کلی، میانگین هدررفت سالانه خاک در کل پایگاه حدود ۲۲/۳ کیلوگرم بر هکتار در سال بود. در حالی که برای دوره آماری مورد مطالعه حداقل میانگین هدررفت سالانه خاک ۰/۱۱ (کرت شماره ۴)، و حداکثر آن حدود ۲۱۳/۷ کیلوگرم بر هکتار در سال (کرت شماره ۱۵) اندازه‌گیری شد. از جمله دلایل ناچیز بودن هدر رفت خاک در کرت شماره ۴، پوشش گیاهی حدود ۸۰ درصد بود (جدول ۱). در مقابل از جمله دلایل زیاد بودن نسبی هدر رفت خاک در کرت شماره ۱۵، پوشش گیاهی کم (جدول ۱) و مارنی بودن خاک آن بود. در کرت‌هایی که تنها هدر رفت خاک در چهار سال اول تحقیق (۷۹-۱۳۷۵) در آنها اندازه‌گیری شد، سهم نسبی هدر رفت خاک در سال ۷۷-۱۳۷۶ از کل هدر رفت خاک در مقایسه با دیگر سال‌ها در اکثر کرت‌ها (به جز کرت‌های شماره ۴ و ۹) بیش‌تر بود (جدول ۴)، زیرا از یک سو، دارای رخداد با بیش‌ترین EI₃₀ (در تاریخ ۱۶/۰۱/۱۳۷۷) (جدول ۳)، و MaxI₃₀ و EI₃₀ بیش‌تر نسبت به دیگر سال‌ها بود (شکل ۳). از سوی دیگر، قبل از آن یک دوره خشکسالی سه ساله وجود داشت (شکل ۲). در کرت‌هایی که هدر رفت خاک در سه سال دوم تحقیق (۸۸-۱۳۸۵) در آنها اندازه‌گیری شد، در سال ۸۷-۱۳۸۶ سهم نسبی هدر رفت خاک از کل هدر رفت خاک، در مقایسه با دیگر سال‌ها در همه کرت‌ها بیش‌تر بود (جدول ۴). زیرا علیرغم اینکه مقدار بارندگی، EI₃₀ و تعداد رخداد فرساینده کم‌تری نسبت به سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ داشت، اما دارای شدت متوسط و MaxI₃₀ بیش‌تر نسبت به دیگر سال‌ها بود (شکل ۳). از سوی دیگر، سال آبی ۸۷-۱۳۸۶، خشک‌ترین سال (با بارندگی سالانه ۸۲ میلی‌متر) در طول دوره هفت ساله تحقیق بود (شکل ۲). همچنین قبل از آن یک دوره خشکسالی دو ساله رخ داده است (شکل ۲). در کرت‌هایی که هدر رفت خاک در طول دوره هفت ساله تحقیق در آنها اندازه‌گیری شد، سهم نسبی هدر رفت خاک در سال‌های مختلف از کل هدر رفت خاک در کرت‌های مختلف، متفاوت بود (جدول ۴). یکی از دلایل احتمالی این تغییرات، شیب زیاد (۴۰، ۶۰ و ۶۵ درصد) این کرت‌ها بود (جدول ۱).

مقایسه بین فرسایش‌پذیری خاک مشاهده شده و برآوردی

شکل ۴ پراکنش مقادیر فرسایش‌پذیری سالانه مشاهده شده بلندمدت (سه تا هفت ساله) (K_{Obs}) را در مقابل مقادیر برآوردی (K_{Est}) ارائه می‌دهد. به طور کلی، هیچ گونه رابطه‌ای ($R^2 = 0.0142$) بین K_{Obs} و K_{Est} مشاهده نشد (شکل ۴). بر اساس میانگین سالانه هدر رفت خاک در طول دوره اندازه‌گیری شده (جدول ۴)، مقادیر K_{Obs} در دامنه ۰/۰۰۰۰۴ (کرت شماره ۴) تا ۰/۰۰۲۹۳ (کرت شماره ۱) تن در هکتار در ساعت بر مگازول در هکتار در میلی‌متر متغیر بود. در حالی که مقادیر K_{Est} در دامنه ۰/۰۵۶ (کرت‌های شماره ۱۸ و ۱۹) تا ۰/۰۷۷ (کرت‌های شماره ۵ و ۶) تن در هکتار در ساعت بر مگازول در هکتار در میلی‌متر بود (جدول ۵). به طوری که K_{Est} به ترتیب حداقل و حداکثر حدود ۲۴ و ۱۳۵۳ برابر K_{Obs} بود. در حالی که میانه و میانگین آن به ترتیب حدود ۲۰۴ و ۳۳۷ برابر K_{Obs} در کل پایگاه

بود (جدول ۵). در مقابل ضریب تغییرات K_{Obs} در کل پایگاه، ۱۴ برابر K_{Est} بود که بیانگر عدم قطعیت‌های بسیار زیاد اندازه‌گیری هدر رفت خاک از یک سو، و برآورد دقیق فاکتورهای مدل RUSLE (P و C , LS , R) از سوی دیگر است. از جمله دلایل کم بودن اختلاف بین K_{Obs} و K_{Est} در کرت شماره ۱، نزدیک بودن شیب آن به شیب کرت استاندارد (شیب ۹ درصد) بود. در مقابل از جمله دلایل زیاد بودن اختلاف بین K_{Obs} و K_{Est} در کرت شماره ۴، شیب زیاد (۳۰ درصد) و پوشش گیاهی (حدود ۸۰ درصد) بود (جدول ۱).

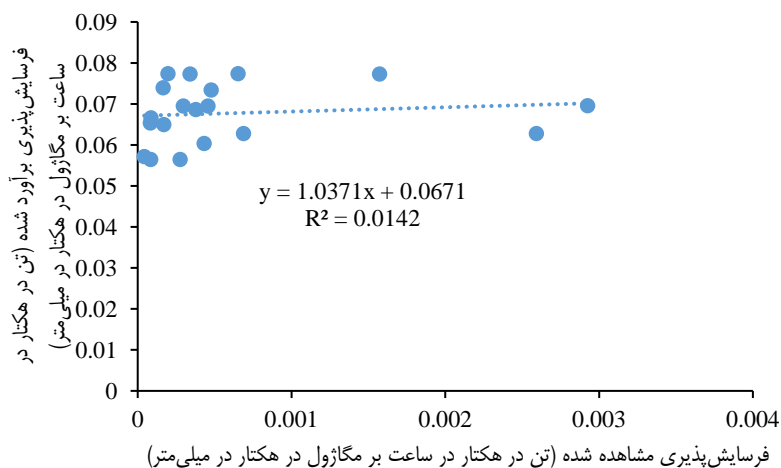
جدول ۴. مقدار هدر رفت خاک (کیلوگرم بر هکتار در سال) و سهم آن (درصد) در طول دوره هفت ساله تحقیق

شماره کرت/ سال	۷۶-۱۳۷۵	۷۷-۱۳۷۶	۷۸-۱۳۷۷	۷۹-۱۳۷۸	۸۰-۱۳۷۹	۸۱-۱۳۸۰	۸۲-۱۳۸۱	۸۳-۱۳۸۲	۸۴-۱۳۸۳	۸۵-۱۳۸۴	۸۶-۱۳۸۵	۸۷-۱۳۸۶	۸۸-۱۳۸۷	میانگین سالانه
۱	(۲۴/۸) ۳/۴۶	(۷۳/۳) ۱۰/۲۶	(۱/۹) ۰/۲۷	(۰) ۰										۳/۵۰
۲	(۳۷) ۲/۴۳	(۴۰/۹) ۲/۷۰	(۲۲/۱) ۱/۴۶	(۰) ۰										۱/۶۵
۳	(۳۵/۵) ۱/۷۶	(۳۹/۲) ۱/۹۴	(۲۵/۳) ۱/۲۵	(۰) ۰										۱/۲۴
۴	(۶۶/۶۵) ۰/۳۰	(۳۳/۴) ۰/۱۵	(۰) ۰	(۰) ۰										۰/۱۱
۵	(۱۰/۷۵) ۰/۶۲	(۶۷/۴) ۳/۸۸	(۲۰/۳) ۱/۱۷	(۱/۶) ۰/۰۹										۱/۴۴
۶	(۳۶/۲) ۷/۹۳	(۵۵/۲) ۱۲/۱۰	(۷/۸) ۱/۷۱	(۰/۹) ۰/۱۹										۵/۴۸
۷	(۱۵/۹) ۰/۸۱	(۷۲/۳) ۳/۶۸	(۱۱/۷) ۰/۵۹	(۰) ۰										۱/۲۷
۸	(۲۲/۹) ۲/۱۰	(۵۹/۶) ۵/۴۵	(۱۵) ۱/۳۷	(۲/۵) ۰/۲۲										۲/۲۸
۹	(۴۶/۵) ۶/۴۴	(۳۷) ۵/۱۳	(۱۲/۵) ۱/۷۳	(۴) ۰/۵۶										۳/۴۷
۱۰	(۲۶) ۱/۴۴	(۶۶/۵) ۴/۱۹	(۳) ۰/۱۹	(۴/۵) ۰/۲۹										۱/۵۸
۱۱	(۸/۷) ۰/۷۰	(۵۹/۹) ۴/۸۲	(۲۷/۲) ۲/۱۹	(۴/۲) ۰/۳۴										۲/۰۱
#۱۲				(۲۲/۵) ۳۳/۰۹	(۷۶/۸) ۱۱۲/۸۶	(۰/۷) ۱/۰۲								۴۸/۹۹
۱۳				(۹/۱) ۲/۸۸	(۹۰/۹) ۲۸/۷۳	(۰) ۰								۱۰/۵۴
۱۴				(۰) ۰	(۱۰۰) ۱۶۹/۹۶	(۰) ۰								۵۶/۶۵
#۱۵				(۴/۶) ۲۹/۴۵	(۹۵/۱) ۶۰۹/۸۹	(۰/۳) ۱/۷۳								۲۱۳/۶۹
۱۶*	(۷۱/۷) ۱۰/۶۹	(۵/۳) ۰/۷۹	(۶/۱) ۰/۹۱	(۱/۶) ۰/۲۴	(۱۴/۲) ۲/۱۸	(۰/۷) ۰/۱۱								۲/۱۳
۱۷*	(۹/۷) ۵/۵۸	(۶۱/۵) ۳۵/۳۰	(۹/۸) ۵/۶۵	(۴) ۲/۳۲	(۱۰/۳) ۵/۸۹	(۰/۶) ۰/۳۴								۸/۲۱
۱۸*	(۱۸/۱) ۱۶/۶۷	(۱۹/۸) ۱۷/۹۴	(۴۵/۱) ۴۱/۵۷	(۱/۵) ۱/۳۶	(۱۳/۴) ۱۲/۲۹	(۱/۲) ۱/۰۷								۱۳/۱۵
۱۹*	(۱۳/۳) ۴۲/۶۲	(۲۵/۸) ۸۲/۸۵	(۲۶/۴) ۸۴/۸۶	(۱/۱) ۳/۴۳	(۳/۱) ۹/۸۸	(۳۰/۱) ۹۶/۷۴								۴۵/۸۸

(): اعداد داخل پرانتز سهم هر سال بر حسب درصد از کل هدر رفت خاک اندازه‌گیری شده در کرت مورد مطالعه در دوره اندازه‌گیری شده است.

*: در این کرت‌ها هدر رفت خاک در طول هفت سال اندازه‌گیری شده است در سایر کرت‌ها هدر رفت خاک در طول سه و چهار سال اندازه‌گیری شده است.

#: این کرت‌ها دارای خاک ماری می‌باشند.



شکل ۴. رابطه بین فرسایش‌پذیری خاک مشاهده شده بلندمدت سالانه (K_{Obs}) و برآوردی (K_{Est}) برای ۲۰ رخداده در کل پایگاه ($n=19$)



جدول ۵. فرسایش پذیری مشاهده شده (بر اساس رخداد، سال با بیشترین سهم در هدر رفت خاک و میانگین بلندمدت هدر رفت خاک) و برآوردی (تن در هکتار در ساعت بر مگاژول در هکتار در میلی‌متر) در کل پایگاه (n=۱۹)

شماره کرت	تعداد سال	فرسایش پذیری خاک مشاهده شده بلندمدت	سال با بیشترین سهم			فرسایش پذیری خاک برآوردی
			۷۶/۰۳/۰۴	۷۷/۰۱/۱۶	۸۷/۰۲/۱۵	
۱	۴	۰/۰۰۲۹۳	۰/۰۰۳۱۱	۰/۰۰۳۵۹	۰/۰۰۷۰	
۲	۴	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۵۵	-	۰/۰۰۷۰	
۳	۴	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۰۷۰	
۴	۴	۰/۰۰۰۰۴	-	-	۰/۰۰۵۷	
۵	۴	۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۷۷	
۶	۴	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۱۳۲	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۷۷	
۷	۴	۰/۰۰۰۴۸	-	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۷۳	
۸	۴	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۰۷۴	
۹	۴	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۶۰	
۱۰	۴	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۶۵	
۱۱	۴	۰/۰۰۰۱۷	-	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۶۵	
۱۲	۳	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۰۱۸۴	۰/۰۰۲۰۹	۰/۰۰۶۳	
۱۳	۳	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۱۰۸	۰/۰۰۱۲۹	۰/۰۰۷۷	
۱۴	۳	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۵۴۹	۰/۰۰۶۵۶	۰/۰۰۷۷	
۱۵	۳	۰/۰۰۲۵۹	۰/۰۰۸۶۰	۰/۰۱۰۰۰	۰/۰۰۶۳	
۱۶	۷	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۱۶۶	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۶۹	
۱۷	۷	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۶۷	
۱۸	۷	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲۲	-	۰/۰۰۵۶	
۱۹	۷	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۱۱۴	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۵۶	
حداقل		۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۵۶	
حداکثر		۰/۰۰۲۹۳	۰/۰۰۸۶۰	۰/۰۰۳۵۹	۰/۰۰۷۷	
میانه		۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۱۳۶	۰/۰۰۶۹	
میانگین		۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۱۴۷	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۰۶۸	
انحراف معیار		۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۲۱۸	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۷	
ضریب تغییرات (%)		۱۲۸/۴	۱۴۷/۹	۱۱۹/۵	۱۱۱/۷	

بر اساس سال آبی با بیشترین سهم از کل هدر رفت خاک (اعداد داخل پرانتز در جدول ۴)، مقادیر K_{obs} در دامنه ۰/۰۰۰۱۱ (کرت شماره ۱۰) تا ۰/۰۰۸۶۰ (کرت شماره ۱۵) تن در هکتار در ساعت بر مگاژول در هکتار در میلی‌متر متغیر بود. به طوری که K_{est} به ترتیب حداقل و حداکثر حدود ۷ و ۶۲۰ برابر K_{obs} بود. در حالی که میانه و میانگین آن به ترتیب حدود ۱۱۲ و ۲۰۲ برابر K_{obs} در کل پایگاه بود (جدول ۵).

مقادیر K_{obs} بر مبنای رخداد اتفاق افتاده در تاریخ ۷۶/۰۳/۰۴، در دامنه ۰/۰۰۰۰۴ (کرت شماره ۱۷) تا ۰/۰۰۳۴۰ (کرت شماره ۱۶) تن در هکتار در ساعت بر مگاژول در هکتار در میلی‌متر متغیر بود، K_{est} به ترتیب حداقل و حداکثر حدود ۲۰ و ۱۶۹۶ برابر K_{obs} بود. در حالی که میانه و میانگین آن به ترتیب حدود ۱۳۲ و ۳۳۹ برابر K_{obs} در کل پایگاه بود (جدول ۵). بر مبنای رخداد اتفاق افتاده در تاریخ ۷۷/۰۱/۱۶، مقادیر K_{obs} در دامنه ۰/۰۰۰۰۴ (کرت شماره ۱۸) تا حدود ۰/۰۰۳۵۹ (کرت شماره ۱) تن در هکتار در ساعت بر مگاژول در هکتار در میلی‌متر متغیر بود، به گونه‌ای که K_{est} به ترتیب حداقل و حداکثر حدود ۱۹ و ۱۶۰۵ برابر K_{obs} بود. در حالی که میانه و میانگین آن به ترتیب حدود ۳۵۷ و ۴۸۸ برابر K_{obs} در کل پایگاه بود (جدول ۵). بر مبنای رخداد اتفاق افتاده در تاریخ ۸۷/۰۲/۱۵، مقادیر K_{obs} در دامنه ۰/۰۰۰۰۳ (کرت شماره ۱۷) تا حدود ۰/۰۱۰۰۰ (کرت شماره ۱۵) تن در هکتار در ساعت بر مگاژول در میلی‌متر متغیر بود، به گونه‌ای که K_{est} به ترتیب حداقل و حداکثر حدود ۶ و ۲۴۸۸ برابر K_{obs} بود. در حالی که میانه و میانگین آن به ترتیب حدود ۴۲ و ۳۹۸ برابر K_{obs} در کل پایگاه بود (جدول ۵).

همبستگی پیرسون بین خصوصیات خاک با K_{obs} بلندمدت و K_{est} در جدول ۶ آمده است. بر خلاف انتظار، هیچ‌گونه همبستگی

معنی‌داری بین K_{Obs} و خصوصیات خاک از جمله درصد سیلت، شن خیلی‌ریز، کربن آلی و آهک مشاهده نمی‌شود. K_{Est} با خصوصیات سنگریزه سطحی، شن، شن خیلی‌ریز و آهک همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد، اما با رس و EC همبستگی منفی و معنی‌دار دارد.

جدول ۶. ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با K_{Obs} بلندمدت سالانه و K_{Est} (n=۱۹)

K_{Obs}	K_{Est}	آهک کل	کربن آلی	pH	EC	SSI	رس	سیلت	شن خیلی‌ریز	شن	سنگریزه سطحی
											سنگریزه سطحی
										۱	۰/۶۰*
									۱	۰/۳۴ ^{ns}	۰/۳۴ ^{ns}
								۱	-۰/۱۴ ^{ns}	-۰/۷۳ ^{***}	-۰/۴۷ ^{ns}
							۱	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۹۳ ^{***}	-۰/۸۲ ^{***}	-۰/۴۵ ^{ns}
						۱	-۰/۵۲*	۰/۳۷ ^{ns}	۰/۴۱ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۵۴*
					۱	-۰/۳۱ ^{ns}	-۰/۵۷*	-۰/۰۶ ^{ns}	-۰/۰۶*	-۰/۳۷ ^{ns}	-۰/۳۴ ^{ns}
				۱	-۰/۴۸ ^{ns}	۰/۲۰ ^{ns}	-۰/۴۵ ^{ns}	-۰/۳۱ ^{ns}	۰/۴۱ ^{ns}	۰/۴۹ ^{ns}	۰/۴۵ ^{ns}
			۱	۰/۱۳ ^{ns}	-۰/۳۰ ^{ns}	۰/۹۸ ^{**}	-۰/۱۹ ^{ns}	۰/۵۱*	۰/۳۳ ^{ns}	-۰/۱۷ ^{ns}	-۰/۵۹*
		۱	۰/۵۰*	۰/۴۰ ^{ns}	-۰/۵۱*	۰/۵۱*	-۰/۷۰ ^{**}	۰/۲۱ ^{ns}	۰/۶۵ ^{**}	۰/۳۶ ^{ns}	۰/۲۲ ^{ns}
	۱	۰/۶۱ ^{**}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۲۱ ^{ns}	-۰/۵۲*	۰/۰۳ ^{ns}	-۰/۷۸ ^{**}	۰/۲۰ ^{ns}	۰/۷۳ ^{**}	۰/۴۳ ^{ns}	۰/۵۲*
۱	-۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	-۰/۱۸ ^{ns}	۰/۵۷*	-۰/۱۱ ^{ns}	-۰/۲۳ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	۰/۲۱ ^{ns}	۰/۳۲ ^{ns}	-۰/۱۲ ^{ns}

SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، K_{Est} : فرسایش‌پذیری خاک برآورده شده،

K_{Obs} : فرسایش‌پذیری خاک مشاهده شده، ^{ns}، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد

بحث

بر اساس میانگین بلندمدت هدر رفت خاک، سال با بیش‌ترین سهم از کل هدر رفت خاک و سه رخداد با بیش‌ترین سهم از کل هدر رفت خاک (ثبت شده در تاریخ‌های ۷۶/۰۳/۰۴، ۷۷/۰۱/۱۶ و ۸۷/۰۲/۱۵)، K_{Est} دارای بیش‌برآوردی زیادی است و به ترتیب حداقل ۲۴، ۷ و ۶ برابر مقدار K_{Obs} بود (جدول ۵). از جمله مهم‌ترین دلایل احتمالی این بیش‌برآوردی، اقلیم خشک منطقه (با میانگین بارندگی سالانه ۱۹۸ میلی‌متر) و متغیر بودن دوره خشکسالی و ترسالی (شکل ۲)، شدت و قدرت فرسایش‌پذیری بسیار کم رخدادهای منجر به ایجاد رواناب است (جدول ۳). زیرا از یک سو، تنها ۱۵ درصد از کل رخدادها (سه رخداد) دارای شدت متوسط و $MaxI_{30}$ به ترتیب بیش از دو و ۱۰ میلی‌متر بر ساعت بودند (جدول ۳). همچنین ۴۵ درصد از رخدادها (نه رخداد) دارای EI_{30} بیش از ۱۰ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در ساعت بودند (جدول ۳). از سوی دیگر، حداکثر شدت متوسط و $MaxI_{30}$ سالانه نیز حدوداً نصف (به ترتیب ۳۱/۴ و ۳۲/۹ میلی‌متر بر ساعت مربوط به سال آبی ۸۷-۱۳۸۶) شدت مورد استفاده (۶۳ میلی‌متر بر ساعت) در توسعه نمودار USLE بود (شکل ۳). چنین شدت‌هایی برای ایجاد فرسایش شیاری و بین‌شیاری قابل توجه در مراتع کافی نیستند که بیانگر عدم قطعیت‌های بسیار زیاد در اندازه‌گیری هدر رفت خاک و همچنین برآورد دقیق دیگر فاکتورهای مدل (R)USLE (R، LS، C و P) است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تعیین K_{Obs} ، دوره خشکسالی و ترسالی است. به گونه‌ای که اگر رخدادها با شدت متوسط و $MaxI_{30}$ زیاد در یک دوره ترسالی (سال آبی ۷۶-۱۳۷۵ و ۷۷-۱۳۷۶) بعد از یک دوره خشکسالی (شکل ۲) رخ دهند، سهم بیش از ۵۰ درصدی از هدر رفت خاک در طول یک دوره هفت ساله خواهند داشت. این سهم بیش از ۵۰ درصدی خود گویای چند نکته مهم است: (۱) تعیین K_{Obs} در یک دوره هفت ساله امری تصادفی است، زیرا ممکن در طول این دوره رخدادها با شدت متوسط و $MaxI_{30}$ زیاد رخ نداده باشند و عمدتاً رخدادها با شدت کم رخ داده باشد که منجر به هدر رفت اندک خاک می‌شوند. این مقدار اندک هدر رفت خاک باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت زیاد در تعیین K_{Obs} در کرت‌های رواناب طبیعی می‌شوند، (۲) تعیین K_{Obs} در یک دوره آماری ۱ تا ۳ ساله (سال آبی ۸۸-۱۳۸۵) در مناطق خشک بی‌معنی است (شکل ۳)، زیرا همان‌گونه که در کرت‌های شماره ۱۹-۱۶ با دوره آماری هفت ساله مشاهده می‌شود، تنها بخش ناچیزی از کل هدر رفت خاک مربوط به رخدادها فرساینده در سه ساله دوم دوره آماری تحقیق است (جدول ۴). در مورد رخداد ۸۷/۰۲/۱۵، یکی از دلایل احتمالی کم بودن بیش‌برآوردی K_{Est} در این رخداد نسبت به دو رخداد دیگر، شدت متوسط و $MaxI_{30}$ بیش‌تر (۳۰/۹ میلی‌متر بر ساعت) آن بود (جدول ۳). به طوری که شدت متوسط و $MaxI_{30}$ آن حدوداً نصف شدت استفاده شده (۶۳ میلی‌متر بر

ساعت) برای توسعه نمودار USLE بود.

محققان دیگر (Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2016; Vaezi et al., 2008) نیز در داخل کشور بیان کردند نمودار USLE دارای بیش‌برآوردی K_{est} نسبت به K_{obs} در اقلیم نیمه‌خشک است. البته آنها این بیش‌برآوردی را در اراضی زراعی و با استفاده از کرت استاندارد گزارش کردند. از سوی دیگر، مقادیر بسیار زیاد برآورد خطر فرسایش و رسوبدهی توسط مدل‌های خانواده USLE در سطح حوضه‌های آبخیز کشور (Asadi et al., 2017; Fallah et al., 2023; Vaezi & Noghan, 2021) در مقایسه با مقادیر میانگین برآوردی با داده‌های رسوب‌سنجی و پلات (عرب‌خدری، ۱۴۰۰) نیز با احتمال زیاد متاثر از مقادیر K است. در مطالعه واعظی و همکاران (۱۳۸۹) که در طی دو سال اندازه‌گیری در هشترود واقع در شمال‌غرب ایران انجام شد، K_{est} حدود ۸/۵ برابر K_{obs} بود. شدت متوسط ۴۱ رخداد بارندگی منجر به تولید رواناب و رسوب (۴/۸۴ میلی‌متر بر ساعت)، ۱۳ برابر کم‌تر از شدت مورد استفاده برای توسعه نمودار USLE (۶۳ میلی‌متر بر ساعت) بود. البته آنها دلایل دیگری از جمله آهکی (۱۲/۶۶ درصد) و سنگریزه‌دار (۹/۸۹ درصد) بودن کرت‌ها را نیز برای این بیش‌برآوردی ذکر کردند. خرمایی و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار USLE (۱۸۲ برابر) را در خاک‌های لسی و آهکی حوضه معرف و زوجی کچیک (شرق استان گلستان) واقع در اقلیم نیمه‌خشک با شدت متوسط بارندگی ۸/۱ میلی‌متر بر ساعت بیان کردند. در تطابق با مطالعات دیگر (Sanchis et al., 2008; A. Vaezi et al., 2012; Zhang et al., 2016) است که بیان کردند فاکتور K اگرچه به ویژگی‌های ذاتی هر نوع خاک بستگی دارد، اما تحت تأثیر عوامل تعیین‌کننده خارجی مانند اقلیم، توپوگرافی، کاربری اراضی / پوشش اراضی، مواد مادری و فعالیت‌های کشاورزی تشدید می‌شود (Efthimiou, 2020). خصوصیات که فرسایش‌پذیری خاک را تعیین می‌کنند، مانند خاکدانه‌سازی و مقاومت برشی، به شدت تحت تأثیر عوامل اقلیمی مانند توزیع بارندگی قرار می‌گیرند و تغییرات فصلی سیستماتیک را نشان می‌دهند (Bryan, 2000). برخی محققین دیگر (Hussein et al., 2007; Kinnell, 2015; W. H. Wischmeier et al., 1971) معتقدند مقادیر K_{obs} حاصل از کرت‌های رواناب طبیعی برای یک خاک خاص به طور قابل ملاحظه‌ای بر اساس رخداد بارندگی، توزیع بارندگی، فصل و سال به دلیل تغییرات در بارندگی و رطوبت پیشین خاک تغییر می‌کنند که نشان‌دهنده اهمیت اندازه‌گیری‌های طولانی‌مدت حاصل از کرت‌های رواناب طبیعی برای به‌دست آوردن یک مقدار معرف برای K_{obs} است.

بر خلاف برخی از تحقیقات (Auerswald et al., 2016; Corral-Pazos-de-Provens et al., 2023) که بیان کردند بیش‌برآوردی فاکتور K توسط نمودار USLE مربوط به خطاهای ساختاری آن است، به نظر می‌رسد عامل اصلی بیش‌برآوردی آن توسط نمودار USLE عامل اقلیمی به ویژه شدت بارندگی در مناطق خشک است که بسیار متفاوت از شدت مورد استفاده برای توسعه آن است. ابزارهای پیش‌بینی موجود مانند نمودار USLE برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک اغلب فاکتورهای بیرونی را نادیده می‌گیرند و فاکتور K را تنها به خصوصیات ذاتی خاک مرتبط می‌کنند (Zhang et al., 2016). با این حال، عوامل خارجی مانند شدت بارندگی می‌توانند بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک مانند مقدار رطوبت پیشین خاک تأثیرگذار باشند (Zhang et al., 2016). این ویژگی‌ها اثرات مهمی بر فرسایش‌پذیری خاک و مقدار فرسایش خاک دارند. Sanchis et al. (2008) همچنین نشان دادند که خاک‌هایی که در اقلیم مرطوب‌تر و خنک‌تر هستند نسبت به خاک‌های در اقلیم گرم‌تر با مقادیر فرسایش‌پذیری خاک بیش‌تر مشخص می‌شوند. رطوبت پیشین خاک نقشی کلیدی در رابطه بارندگی - رواناب و هدر رفت خاک ایفا می‌کند (Kinnell, 2015). شرایط اولیه مرطوب‌تر منجر به مقادیر بیش‌تر رواناب و در نتیجه هدر رفت بیش‌تر خاک می‌شود (Zhang et al., 2016).

از دلایل احتمالی بیش‌برآوردی فاکتور K_{est} توسط نمودار، کم بودن مقادیر فاکتور فرسایش‌پذیری باران - رواناب (R) (شکل ۳) و هدر رفت خاک (جدول ۴) است. مقدار فاکتور R سالانه ۴۵/۸ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال بود (شکل ۳). چنین فرسایش‌پذیری قادر به ایجاد فرسایش قابل توجه (حداکثر هدر رفت خاک حدود ۰/۲ تن بر هکتار در سال می‌باشد) در دامنه‌های مرتعی نیست (جدول ۳). زیرا از یک سو، کم بودن مقادیر هدر رفت خاک ممکن است باعث شود که خطای اندازه‌گیری از مقدار اندازه‌گیری شده بیش‌تر باشد. از سوی دیگر، به دلیل غیراستاندارد بودن کرت‌ها، ممکن است خطا حاصل از سایر پارامترهای مدل (P و C ، L ، S) وارد شود و باعث بیش‌برآوردی K_{est} شود.

آهک یکی از خصوصیات ذاتی بسیار مهم خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران است. در تحقیق حاضر، آهک خاک با K_{obs} هیچ‌گونه همبستگی معنی‌دار نشان نداد، اما با K_{est} دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد بود (جدول ۶). یکی از دلایل احتمالی برای اینکه K_{obs} با آهک همبستگی ندارد این است که بهبود ساختمان خاک توسط آهک اغلب در pH کم‌تر از ۷/۵ و در خاک‌هایی با محتوای رس و CEC زیاد صورت می‌گیرد (Getahun et al., 2021). تغییرات دقیق در خصوصیات فیزیکی خاک به

دلیل آهک به نوع خاک بستگی دارد (Chan & Heenan, 1999). بر خلاف این تحقیق که یک همبستگی مثبت و معنی‌دار (جدول ۶) بین آهک و K_{est} وجود دارد، برخی از محققین (Ostovari et al., 2018; Ostovari et al., 2016; Vaezi et al., 2008) یک همبستگی منفی بین آهک و K_{obs} در مناطق نیمه‌خشک گزارش کردند. آنها معتقدند یکی از دلایل بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار USLE توسعه آن در خاک‌های تقریباً عاری از آهک آمریکا بود.

احتمالاً طول ۲۲/۱۳ متر برای ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در مراتع خشک مناسب نیست، دلایل احتمالی این امر عبارتند از: (۱) کم بودن هدر رفت خاک (جدول ۴) است که باعث رسوبگذاری در طول شیب (طول شیب واقعی کم‌تر) و کم‌برآوردی هدر رفت خاک و در نتیجه فرسایش‌پذیری خاک می‌شود، به بیان دیگر، خطای بیش‌برآوردی توسط نمودار افزایش می‌یابد و (۲) شدت بارندگی (جدول ۳ و شکل ۳) برای ایجاد پیوستگی جریان در شیب‌های طولانی کافی نیست (Yair & Raz-Yassif, 2004). ناپیوستگی جریان منجر به رسوبگذاری در طول شیب و کوتاه‌تر شدن طول شیب واقعی می‌شود. این رسوبگذاری دلایل احتمالی اصلی بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار در کرت‌های با طول بیش‌تر است. بنابراین بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار USLE در مناطق با اقلیم و کاربری متفاوت منطقی به نظر می‌رسد.

یکی از محدودیت‌های مربوط به این تحقیق، عدم اندازه‌گیری پوشش گیاهی بعد از هر رخداد بارندگی بود. یکی از دلایل احتمالی بیش‌برآوردی زیاد نمودار USLE در مراتع وجود پوشش گیاهی است. در کرت‌های با پوشش اندک (کم‌تر از ۲۰ درصد) و شیب تند (شیب ۴۰، ۶۰ و ۶۵ درصد) (کرت‌های شماره ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در جدول ۵) انتظار می‌رفت این بیش‌برآورد کم‌تر باشد (جدول ۵)، زیرا از یک سو، به دلیل شیب زیاد کرت‌ها، احتمال رسوبگذاری در طول شیب کم است. از سوی دیگر به دلیل پوشش گیاهی اندک و عدم وجود سنگریزه سطحی، احتمال فرسایش خاک زیاد است. اما در این کرت‌ها نیز میانه و میانگین بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار USLE، به ترتیب حدود ۱۹۳ و ۲۷۶ برابر مقدار K_{obs} بلندمدت سالانه بود. در حالی حداقل مقدار آن حدود ۲۴ برابر (کرت شماره ۱۵ در جدول ۵) و حداکثر مقدار آن حدود ۷۶۱ برابر (کرت‌های شماره ۱۷ در جدول ۵) مقدار K_{obs} بلندمدت سالانه بود.

از دیگر دلایل احتمالی بیش‌برآوردی K_{est} توسط نمودار USLE در مراتع، عدم خاکورزی و وجود ریشه‌های گیاه است. نمودار USLE بر مبنای کرت استاندارد که یک کرت شخم‌خورده در جهت شیب زمین است، توسعه پیدا کرده است. کرت آیش شخم‌خورده به دو دلیل باعث افزایش هدر رفت خاک می‌شود: (۱) هرگونه بهم‌خوردگی باعث افزایش هدر رفت خاک می‌شود (Wilcox et al., 2003) و (۲) خاکورزی در جهت شیب زمین هدر رفت خاک را تشدید می‌کند (Ferreira et al., 2015; Zhang et al., 2016). از سوی دیگر، ریشه‌های گیاه (زنده و مرده) با افزایش پایداری ساختمان خاک و مقاومت برشی باعث کاهش هدر رفت خاک و نتیجه فرسایش‌پذیری خاک می‌شوند (De Baets et al., 2006; Ghidry & E. Alberts, 1997; Katuwal et al., 2013; Mamo & D. Bubenzer, 2001; Ola et al., 2015).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با فرض اینکه نمودار USLE بهترین روش موجود برای برآورد K_{est} در اقلیم و کاربری‌های مختلف از جمله مراتع خشک است، اجرا شد. هدررفت خاک حاصل از ۲۰ رخداد فرسایش‌دهنده در طول هفت سال (۱۳۸۵-۱۳۸۸ و ۱۳۷۵-۱۳۷۹) در ۱۹ کرت مرتعی با طول ۲۰ و ۲۵ متر، عرض ثابت دو متر و با شرایط مختلف (از نظر خاک، شیب، پوشش گیاهی و سنگریزه سطحی) در ناحیه خشک واقع در شمال‌شرق ایران اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که شدت متوسط (I_{ave}) و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای ($MaxI_{30}$) نسبت به شاخص فرسایش‌دهندگی باران (EI_{30}) تأثیر بیش‌تری بر هدررفت خاک دارند. نتایج حاصل از ارزیابی نمودار نشان داد نه تنها این نمودار مناسب مراتع نیست، بلکه دارای بیش‌برآوردی زیادی است که منجر به عدم تأیید فرض پژوهش شد. البته عدم تأیید فرضیه پژوهش مشروط بر این فرض است که روش‌ها و معادلات برآورد دیگر فاکتورهای مدل USLE (R, LS, C, P) در مراتع خشک از صحت لازم برخوردار هستند. بر مبنای میانگین بلندمدت هدر رفت خاک، سال با بیش‌ترین سهم از کل هدر رفت خاک و هدر رفت خاک حاصل از شدیدترین رخداد (رخداد ثبت شده در تاریخ ۸۷/۰۲/۱۵ با $I_{ave} = MaxI_{30} = 30.9 \text{ mm h}^{-1}$) توسط نمودار USLE به ترتیب حداقل ۲۴، ۷ و ۶ برابر مقدار K_{obs} است. از جمله دلایل اصلی این بیش‌برآوردی شدت کم رخدادها و فرسایش‌دهنده و در نتیجه عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری هدر رفت خاک و محاسبه دیگر فاکتورهای مدل USLE (R, LS, C, P) در مراتع خشک است. شدت باران‌های استفاده شده برای توسعه نمودار USLE، ۶۳ میلی‌متر بر ساعت بود که چنین شدت‌های در مناطق خشک نادر هستند. علاوه بر این، به



دلیل اینکه دوره‌های خشکسالی و ترسالی در مناطق خشک بسیار متغیر است، طول دوره آماری ۱ تا ۳ سال برای اندازه‌گیری K_{obs} کافی نیست و حتی وقوع رخداد‌های با شدت زیاد در طول دوره هفت ساله نیز احتمالی است. بنابراین تحقیقات بیش‌تر و فراتر از محدودیت‌های ذاتی به ویژه با طول دوره آماری بیش‌تر برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک مانند آنچه توسط USLE استفاده می‌شود، مورد نیاز است. به علاوه، تعریف روشنی از شرایط مرجع برای مقایسه رفتار خاک و فرسایش‌پذیری باران در مراتع خشک مورد نیاز است. به منظور ارزیابی فاکتور K مدل USLE شرایط مرجع یعنی کرت استاندارد تعریف شده است. کرت استاندارد یک کرت آیش شخم‌خورده در جهت شیب زمین با شیب ۹ درصد و طول ۲۲/۱۳ متر می‌باشد و بر مبنای تشکیل فرسایش بین‌شیاری و شیاری است. حال آنکه بیش‌تر مراتع کشت نمی‌شوند و اگر کشت شوند، شدت بهم‌خوردگی نسبت به خاکورزی اولیه و ثانویه خاک‌های کشاورزی کم‌تر است. بنابراین، آیش شخم‌خورده وضعیت معمول مرتع را نشان نمی‌دهد، اما اگر قرار باشد اطلاعات مربوط به فاکتور K حاصل از کرت‌های شخم‌خورده به مراتع منتقل شود، ممکن است یک مرجع موردنیاز باشد. طول ۲۲/۱۳ متر نمی‌تواند بیانگر وضعیت توپوگرافی مراتع خشک و نیمه‌خشک باشد، زیرا به دلیل کم بودن شدت بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، طول ۲۲/۱۳ متر ممکن است تضمین‌کننده تشکیل شیاری نباشد. از سوی دیگر، رسوبگذاری در طول شیب در چنین کرت‌هایی در مراتع مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز محتمل است. در هر دو حالت، کم‌برآوردی K_{obs} رخ می‌دهد. بر اساس تعریف، طول شیب برابر با فاصله نقطه شروع رواناب تا جایی است که رسوبگذاری شروع می‌شود، بنابراین احتمالاً طول شیب واقعی در کرت‌های ایجاد شده در مراتع کوتاه‌تر از طول ظاهری کرت خواهد بود. براساس نتایج این مطالعه، نمودار USLE برای مراتع خشک دارای بیش‌برآوردی زیادی است و قابل توصیه نیست. با توجه به اینکه حدود ۵۰ درصد کشور را مراتع در بر می‌گیرند، تحقیقات بیش‌تری برای تعیین فاکتور K در مراتع خشک با توجه به متغیر بودن دوره خشکسالی و ترسالی و شدت بارندگی، مورد نیاز است. برای ارزیابی دقیق‌تر نمودار در مراتع خشک و نیمه‌خشک کشور به تحقیقات بیش‌تر در مراتع بدون پوشش (پوشش گیاهی و سنگریزه سطحی)، بدون اثرات ریشه و با شیب یکسان و یکنواخت در یک دوره طولانی‌مدت یا با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران با شدت استفاده شده (۶۳ میلی‌متر بر ساعت) برای توسعه نمودار USLE در شرایط میدانی در دیگر مناطق کشور نیاز است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- اسدی، حسین (۱۴۰۱). واکاوی تاریخچه فعالیت دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و سازمان‌های اجرایی مرتبط با فرسایش و حفاظت خاک در ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۲): ۴۱۱-۴۳۳.
- خالق‌پناه، ناصر، اسدی، حسین، شرفا، مهدی، گرجی، منوچهر، و داوری، مسعود (۱۳۹۶). کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و هدررفت خاک در مراتع سنگریزه‌ای حوضه خامسان کردستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۵): ۱۰۳۱-۱۰۴۲.
- خرمایی، حنیفه؛ کیانی، فرشاد و خرمالی، فرهاد (۱۳۹۵). بررسی شاخص فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی حوزه آبخیز کچیک استان گلستان. مجله آب و خاک، ۳۰(۶): ۲۰۸۶-۲۰۷۸.
- عرب‌خدری، محمود (۱۴۰۰). وضعیت فرسایش آبی و رسوبدهی ایران، واکاوی آماری و مقایسه‌ای. مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۲(۲): ۱۳۹-۱۵۶.
- عرب‌خدری، محمود و نور حمزه (۱۴۰۰). پژوهش‌های تجربی فرسایش و رسوب (در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه) فرصت‌های تحقیقاتی، آموزشی و ترویجی. چاپ اول. تهران: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- عرب‌خدری، محمود؛ گرامی، زهرا؛ شادفر، صمد؛ بیات، رضا؛ پرویزی، یحیی و نبی‌پی لشکریان، سعید (۱۳۹۹). مقایسه کارایی چند معادله برآورد شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE در شرایط آزمایشگاهی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۷): ۱۷۳۶-۱۷۲۵.
- واعظی، علیرضا؛ بهرامی، حسینعلی، صادقی، سیدحمیدرضا؛ و مهدیان، محمدحسین (۱۳۸۹). برآورد عامل فرسایش‌پذیری (K) با استفاده از مدل RUSLE در بخشی از خاک‌های ناحیه نیمه‌خشک در شمال غربی ایران. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷(۳): ۱۲۴-۱۰۵.
- واعظی علیرضا، و نوقان، مزگان (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی مدل‌های USLE، USLE-M، RUSLE و AUSLE در برآورد هدررفت خاک در ابعاد کرت در منطقه‌ی نیمه‌خشک. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۴(۵۰): ۱-۱۰.

REFERENCES

- Anache, J. A. A., Bacchi, C. G. V., Panachuki, E., & Sobrinho, T. A. (2015). Assessment of methods for predicting soil erodibility in soil loss modeling. *Geosciences= Geociências*, 34(1), 32-40.

- Arabkhedri, M. (2021). Water Erosion and Sediment Production Status in Iran: Statistical and Comparative Analyses. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 6(2), 139-156 (In Persian). doi:10.22047/srjasnr.2021.140574 (In Persian)
- Arabkhedri, M., Gerami, Z., Shadfar, S., Bayat, R., Parvizi, Y., & Nabipay Lashkarian, S. (2020). Comparing the Performance of Several Erodibility Indices' Equations of USLE Model at Laboratory Condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7), 1725-1736. doi:10.22059/ijswr.2020.299356.668539. (In Persian)
- Arabkhedri, M., & Noor, H. (2021). Experimental Erosion and Sediment Research (At Sanganeh Soil Conservation Research Site); Research, Education and Extension Opportunities. First edition. Tehran. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (In Persian).
- Asadi, H. (2022). A Critical Report on Several Decades' Activities in the Universities, Research Institutes and Executive Organizations in the Field of Soil Erosion and Conservation in Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 411-433. doi:10.22059/ijswr.2022.337663.669190 (In Persian)
- Asadi, H., Honarmand, M., Vazifedoust, M., & Moussavi, A. (2017). Assessment of changes in soil erosion risk using RUSLE in Navrood Watershed, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(1), 231-244.
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2016). Corrigendum to "Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling"[Catena 118 (2014) 220–225]. *Catena*, 100(139), 271.
- Bagarello, V., Ferro, V., & Pampalone, V. (2022). *Measuring the USLE soil erodibility factor in the unit plots of Sparacia (southern Italy) experimental area*. Paper presented at the 2022 IEEE Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor).
- Bonham, C. D. (2013). *Measurements for terrestrial vegetation*: John Wiley & Sons.
- Brown, L., & Foster, G. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE*, 30(2), 379-0386.
- Bryan, R. B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3-4), 385-415.
- Cassol, E. A., Silva, T. S. d., Eltz, F. L. F., & Levien, R. (2018). Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, e0170262.
- Chan, K., & Heenan, D. (1999). Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1841-1844.
- Corral-Pazos-de-Provens, E., Rapp-Arrarás, Í., & Domingo-Santos, J. M. (2023). The USLE soil erodibility nomograph revisited. *International soil and water conservation research*, 11(1), 1-13.
- De Baets, S., Poesen, J., Gyssels, G., & Knapen, A. (2006). Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76(1-2), 54-67.
- Eftekhari, A., Arzani, H., Mehrabi, A., Jafari, M., Bihamta, M. R., & Zandi Esfahan, E. (2012). Investigation on effects of range management plans, property size and pastoralist population on rangeland characteristics (case study: Zarandyeh rangelands). *World Applied Sciences Journal*, 18(10), 1381-1388.
- Efthimiou, N. (2020). The new assessment of soil erodibility in Greece. *Soil and Tillage Research*, 204, 104720.
- Erosion, W. o. E., & Rangelands, S. Y. o. (1982). Proceedings of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands: Tucson, Arizona, March 7-9, 1981. In: ARS.
- Fallah, M., Bahrami, H., & Asadi, H. (2023). Assessment of soil erosion risk using RUSLE model, SATEEC system, remote sensing, and GIS techniques: a case study of Navroud watershed. *Environmental Earth Sciences*, 82(17), 398.
- Ferreira, V., Panagopoulos, T., Andrade, R., Guerrero, C., & Loures, L. (2015). Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed. *Solid Earth*, 6(2), 383-392.
- Foster, G. R. (2005). Draft: Science Documentation. Revised Universal Soil Loss Equation version 2 (RUSLE2)USDA-Agricultural Research Service, Washington, D.C.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part*, 4(598), 255-293.
- Getahun, G. T., Etana, A., Munkholm, L. J., & Kirchmann, H. (2021). Liming with CaCO₃ or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil. *Soil and Tillage Research*, 214, 105162.
- Ghidey, F., & E. Alberts, E. (1997). PLANT ROOT EFFECTS ON SOIL ERODIBILITY, SPLASH DETACHMENT, SOIL STRENGTH, AND AGGREGATE STABILITY. *Transactions of the ASAE*, 40(1), 129-135. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.21257>



- Hussein, M. H., Kariem, T. H., & Othman, A. K. (2007). Predicting soil erodibility in northern Iraq using natural runoff plot data. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 220-228.
- Katuwal, S., Vermang, J., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Moldrup, P., & de Jonge, L. W. (2013). Effect of Root Density on Erosion and Erodibility of a Loamy Soil Under Simulated Rain. *Soil Science*, 178(1), 29-36. doi:10.1097/SS.0b013e318285b052
- Khaleghpanah, N., Asadi, H., Shorafa, M., Gorji, M., & Davari, M. (2018). WEPP model efficiency in estimation of runoff and soil loss in stony rangelands of Khamesan watershed, Kurdistan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 1031-1042. doi:10.22059/ijswr.2017.212045.667504 (In Persian)
- Khaleghpanah, N., Shorafa, M., Asadi, H., Gorji, M., & Davari, M. (2016). Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan watershed, Iran. *Catena*, 147, 773-788.
- Khormai, H., Kiani, F., & Khormali, F. (2017). Evaluation of Soil Erodibility Factor (k) for Loess Derived Landforms of Kechik Watershed in Golestan Province. *Water and Soil*, 30(6), 2078-2086. doi:10.22067/jsw.v30i6.57027
- Kinnell, P. (2015). Accounting for the influence of runoff on event soil erodibilities associated with the EI30 index in RUSLE2. *Hydrological processes*, 29(6), 1397-1405.
- Mamo, M., & D. Bubenzer, G. (2001). DETACHMENT RATE, SOIL ERODIBILITY, AND SOIL STRENGTH AS INFLUENCED BY LIVING PLANT ROOTS PART I: LABORATORY STUDY. *Transactions of the ASAE*, 44(5), 1167. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.6445>
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10.
- McCool, D., Foster, G., & Weesies, G. (1997). Chapter 4. Slope length and steepness factors (LS). KG Renard, GR Foster, GA Weesies, DK McCool and DC Yoder (compilers), Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook(703), 101-141.
- Ola, A., Dodd, I. C., & Quinton, J. N. (2015). Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *SOIL*, 1(2), 603-612. doi:10.5194/soil-1-603-2015
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H.-A., Abbasi, M., Dematte, J. A. M., Arthur, E., & Panagos, P. (2018). Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 314, 102-112.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H.-A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., & Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385-395.
- Raj, R., Saharia, M., & Chakma, S. (2023). Mapping soil erodibility over India. *Catena*, 230, 107271.
- 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)*: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook No. 703, 404 pp.
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C., & Yang, X. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Römken, M., Young, R., Poesen, J., McCool, D., El-Swaify, S., & Bradford, J. (1997). Soil erodibility factor (K). Compilers) In: Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC, editors. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, DC, USA: Agric. HB(703), 65-99.
- Sanchis, M. S., Torri, D., Borselli, L., & Poesen, J. (2008). Climate effects on soil erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(7), 1082-1097.
- Sharpley, A., & Williams, J. (1990). EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin. No. 1768, 235 pp.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (Vol. 14): John Wiley & Sons.
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L. (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena*, 31(1-2), 1-22.
- Vaezi, A., Bahrami, H., Sadeghi, S., & Mahdian, M. (2010). Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(2), 241-252.
- Vaezi, A., Sadeghi, S., Bahrami, H., & Mahdian, M. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3-4), 414-423.
- Vaezi, A., Sadeghi, S., Bahrami, H., & Mahdian, M. (2012). Estimation of erodibility factor (K) using the

- RUSLE model in some soils of the semi-arid regions in northwest of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(3), 105-124 (In Persian).
- Vaezi, A. R., & Noghan, M. (2021). Evaluating the Efficiency of the USLE, RUSLE, USLE-M and AUSLE Models in Estimation of Soil Loss at Plot Scale in a Semi-Arid Region. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(50), 1-10 (In Persian).
- Wilcox, B. P., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2003). Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. *Ecological monographs*, 73(2), 223-239.
- Williams, J., Renard, K., & Dyke, P. (1983). EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of soil and water conservation*, 38(5), 381-383.
- Wischmeier, & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*: Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C., & Cross, B. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.
- Yair, A., & Raz-Yassif, N. (2004). Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length. *Geomorphology*, 61(1-2), 155-169.
- Zhang, K., Lian, L., & Zhang, Z. (2016). Reliability of soil erodibility estimation in areas outside the US: a comparison of erodibility for main agricultural soils in the US and China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-10.
- Zhao, W., Wei, H., Jia, L., Daryanto, S., Zhang, X., & Liu, Y. (2018). Soil erodibility and its influencing factors on the Loess Plateau of China: a case study in the Ansai watershed. *Solid Earth*, 9(6), 1507-1516.