

Evaluation of sediment delivery ratio estimation methods in Khamsan Representative-Paired Watershed

Nasrian Azami¹, Abdulvahed Khaleli Darvishan^{2*} and Leila Gholami³

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

² Associate professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

³ Associate professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 19 February 2024

Accepted: 11 May 2024

Extended abstract

Introduction

Today, soil erosion in particular and soil degradation in general as a result of human activities have been raised as a social problem, and the role of the human factor in the emergence and acceleration of the soil degradation process has been clarified in many fields. Obtaining accurate statistics and information about soil erosion and sediment yield in the watersheds is necessary for the implementation of soil conservation programs and methods for determining the resistance to soil erosion and reducing sediment yield. Due to the lack of data about soil erosion and sediment yield in many watersheds of Iran, the use of appropriate empirical methods is inevitable to erosion estimation, sediment yield and especially sediment delivery ratio.

Martial and methods

For this purpose, in the present study, empirical models for estimation of the sediment delivery ratio based on easy-to-measure variables and three models of SATEEC, InVEST and WaTEM/SEDEM were used in the Khamsan representative-paired watershed, western Iran. The WaTEM module of the WaTEM/SEDEM model is based on the RUSLE model for estimating soil erosion, and in the SEDEM module is based on the performance of effective physical factors in the sediment transport equation. In many sources, the ¹³⁷Cs method is mentioned as the only available and reliable method for measuring the components of the sediment budget, including total erosion, total sedimentation, net erosion (sediment yield) and sediment delivery ratio, especially at the hillslope and sub-watershed scales. To evaluation of the used models, the results of calculating the sediment delivery ratio using the ¹³⁷Cs method obtained from previous researches were used, which are 25.61% and 58.94% for the entire watershed and the average of 15 sub-watersheds, respectively, and its accuracy is based on the observed sediment data at the outlet of the watershed has been confirmed.

Results and discussion

Among the studied sediment delivery ratio models, Renfro and Waldo (1983), Williams and Brendt (1972), Roehl (1962) considering one hour excess precipitation, Walling (1983), Ferro (1995), Vanoni (1975) and USDA (1972) provided the closest estimates ($\pm 10\%$) to the ¹³⁷Cs method for the whole watershed scale and the Renfro (1975), USDA (1972), USDA-SCS (1979), SATEEC and Roehl (1962) considering one hour excess precipitation for the sub-watershed scale provided the closest estimates ($\pm 10\%$) to the ¹³⁷Cs method for the sub-watershed scale and were selected as suitable sediment delivery ratio models for Khamsan representative-paired watershed. Also, these models can be used to estimate the sediment delivery ratio in watersheds similar to Khamsan representative-paired watershed.

Conclusion

In the sub-watersheds scale, the equations estimations based on easy-to-measure variables except the Roehl (1962) method - excess rainfall of 1.0 h was significantly lower than the SATEEC model, on the other hand, the estimations of all the methods except the Roehl (1962) method - excess rainfall of 0.1 h was significantly higher than WaTEM/SEDEM and InVEST models. This issue emphasizes the importance of considering excess precipitation conditions to estimation of the sediment delivery ratio in the presented equations by Roehl. Also, at the scale of the whole watershed, the estimations of the equations based on easy-to-measure

* Corresponding author: a.khaleli@modares.ac.ir

variables, except for the Mutchler and Bowie (1975) method, were lower than the results of the SATEEC model. The great difference of the investigated methods performance in the two scales of the sub-watershed and the whole watershed is due to the undeniable effect of the middle plain of the Khamsan watershed in the drastic reduction of the sediment transportation from the sub-watersheds to the outlet of the watershed.

Keywords: ¹³⁷Cs, InVEST Model, RUSLE Model, SATEEC Model, Soil Erosion

Cite this article: Azami, N., Khaledi Darvishan, A., Gholami, L., 2024. Evaluation of sediment delivery ratio estimation methods in Khamsan Representative-Paired Watershed. *Watershed Engineering and Management* 16(3), 394-414.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان

نسرین اعظمی^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^{۲*} و لیلا غلامی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده مبسوط

مقدمه

فرسایش خاک، به‌طور خاص و تخریب خاک، به‌طور عام در نتیجه فعالیت انسان، امروزه به‌عنوان یک معضل اجتماعی مطرح بوده و نقش عامل انسانی در پیدایش و تسریع روند تخریب خاک در بسیاری از مناطق روشن شده است. دستیابی به آمار و اطلاعات دقیق در مورد میزان فرسایش خاک و رسوب در حوزه‌های آبخیز به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و تعیین روش‌های مبارزه با فرسایش خاک و کاهش تولید رسوب ضروری است. به‌دلیل کمبود آمار در زمینه فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور، به‌کارگیری روش‌های تجربی مناسب برای برآورد فرسایش، رسوب‌دهی و به‌ویژه نسبت تحویل رسوب اجتناب‌ناپذیر است.

مواد و روش

بدین منظور در پژوهش حاضر از مدل‌های برآورد نسبت تحویل رسوب شامل مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت و سه مدل SATEEC، InVEST و WaTEM/SEDEM در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در غرب ایران استفاده شد. مدل WaTEM/SEDEM در بخش WaTEM برای برآورد فرسایش خاک مبتنی بر مدل RUSLE و در بخش SEDEM مبتنی بر عملکرد عوامل فیزیکی مؤثر در رابطه انتقال رسوب است. در بسیاری از منابع از روش سزیم-۱۳۷ به‌عنوان تنها روش موجود و قابل‌اعتماد برای اندازه‌گیری اجزای بودجه رسوب شامل فرسایش کل، رسوب‌گذاری کل، فرسایش خالص (رسوب‌دهی) و نسبت تحویل رسوب به‌ویژه در مقیاس دامنه و زیرحوزه آبخیز یاد شده است. برای ارزیابی مدل‌های مورد استفاده، از نتایج محاسبه نسبت تحویل رسوب در روش سزیم-۱۳۷ حاصل پژوهش‌های قبلی استفاده شد که برای کل حوزه آبخیز و متوسط ۱۵ زیرحوزه آبخیز به‌ترتیب برابر ۲۵/۶۱ و ۵۸/۹۴ درصد است و صحت آن با استفاده از داده‌های رسوب مشاهداتی در خروجی حوزه آبخیز مورد تأیید قرار گرفته است.

نتایج و بحث

از بین مدل‌های بررسی شده برای برآورد نسبت تحویل رسوب، مدل‌های (Renfro and Waldo (1983) و (Williams and (Brendt (1962)، (Roehl (1962)، با بارش مازاد یک ساعت، (Walling (1983)، (Ferro (1995)، (Vanoni (1975) و (USDA

(1972)، در مقیاس کل حوزه آبخیز و مدل‌های (Renfro (1975)، USDA (1972)، USDA-SCS (1979)، SATEEC، (1962) and Roehl، با بارش مازاد یک ساعت در مقیاس زیرحوزه آبخیز نزدیک‌ترین برآوردها را به روش سزیم-۱۳۷ با در نظر گرفتن خطای ± 10 درصد داشتند و به‌عنوان مدل‌های مناسب برای برآورد نسبت تحویل رسوب در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان انتخاب شدند. همچنین، این مدل‌ها می‌توانند برای برآورد نسبت تحویل رسوب در حوزه‌های آبخیز مشابه با حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان نیز مورداستفاده قرار داده شوند.

نتیجه‌گیری

در مقیاس زیرحوزه آبخیزها برآوردهای معادلات مبتنی بر متغیرهای زودیافت جز روش (1962) Roehl-بارش مازاد ۰/۱ ساعت به‌طور معنی‌داری کمتر از مدل SATEEC بوده، از طرفی برآوردهای تمام روش‌های مذکور به‌جز روش Roehl (1962) بارش مازاد ۰/۱ ساعت به‌طور معنی‌داری بیشتر از مدل WaTEM/SEDEM و InVEST بود. این موضوع بر اهمیت در نظر گرفتن شرایط بارش مازاد برای برآورد نسبت تحویل رسوب در معادلات ارائه شده توسط Roehl تأکید دارد. همچنین، در مقیاس کل آبخیز نیز برآوردهای معادلات مبتنی بر متغیرهای زودیافت به‌جز روش (1975) Mutchler and Bowie، کمتر از نتایج مدل SATEEC بود. اختلاف زیاد عملکرد روش‌های مورد بررسی در دو مقیاس زیرحوزه آبخیز و کل حوزه آبخیز ناشی از اثر انکارناپذیر دشت میانی حوزه آبخیز خامسان در کاهش شدید انتقال رسوب زیرحوزه آبخیزها تا خروجی کل حوزه آبخیز بوده است.

واژه‌های کلیدی: سزیم-۱۳۷، فرسایش خاک، مدل RUSLE، مدل InVEST، مدل SATEEC

مقدمه

آشکار و پنهان محیط زیستی و اجتماعی، به سرطان زمین شهرت یافته و یکی از فرایندهای پیچیده و خطرناک محیطی است.

دستیابی به آمار و اطلاعات دقیق در مورد میزان فرسایش خاک و رسوب در حوزه‌های آبخیز به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و تعیین روش‌های مبارزه با فرسایش خاک و کاهش تولید رسوب ضروری است (Hagos, 2004).

به‌عبارت‌دیگر لازم است عوامل مؤثر در فرسایش و تولید رسوب شناسایی شوند تا در انتخاب راهکارهای مناسب جهت کنترل فرسایش و حفظ منابع طبیعی بتوان تصمیم مناسبی اتخاذ نمود. لذا، تحلیل و برآورد میزان فرسایش خاک و رسوب و ارائه راهکارهای مدیریتی با توجه به روند فزاینده فرسایش خاک، با استفاده از ابزار و مدل‌های موجود امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

عامل تجربی که در تبدیل فرسایش و رسوب به یکدیگر مورداستفاده قرار می‌گیرد، نسبت تحویل

فرسایش خاک، به‌طور خاص و تخریب خاک به‌طور عام، در نتیجه فعالیت انسان، امروزه به‌عنوان یک معضل اجتماعی مطرح بوده و نقش عامل انسانی در پیدایش و تسریع روند تخریب خاک در بسیاری از مناطق روشن شده است (Wilkinson and McElroy, 2007؛ Giguët-Covex et al., 2010؛ Dreibrodt et al., 2011). اثرات ناشی از این دخالت‌ها نه‌تنها در مکان وقوع بلکه در خارج از محل رویداد نیز به‌صورت انباشت رسوبات روی اراضی کشاورزی مرغوب، مراتع و کانال‌های آبیاری بیش از هر زمان دیگری مشهود و نمایان است (Lai et al., 1993؛ Hadley and Mizuyama, 1993؛ Javadi et al., 2017؛ al., 1998).

تخریب خاک در اراضی کشاورزی و مرتعی سبب کاهش حاصلخیزی خاک، کاهش تولید محصول و کمبود مواد غذایی می‌شود (Semgalawe and Folmer, 2000؛ Tenge et al., 2007) و با ادامه یافتن تخریب منجر به فرسایش فیزیکی و ظاهری خاک می‌شود. فرسایش خاک فرایندی است که طی آن خاک به‌وسیله آب یا باد از بستر اولیه خود جدا می‌شود (Rahman et al., 2009). این فرایند به‌دلیل داشتن اثرات چندجانبه

رسوب^۱ است. بررسی‌ها نشان داده که نسبت تحویل رسوب، یکی از معیارهای مهم مورد استفاده در تبدیل مقدار فرسایش خاک و تولید رسوب به یکدیگر بوده که در بسیاری از موارد زمینه‌ساز استفاده بهینه از منابع مختلف است (USDA-SCS, 1981). نسبت بار رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی به مقدار کل رسوب جدا شده از تمام سطح حوزه آبخیز (فرسایش کل یا ناخالص) در طی یک دوره مشابه زمانی نسبت تحویل رسوب اطلاق می‌شود. نسبت تحویل رسوب، یک عامل مقیاسی است که میزان فراهمی رسوب را در مقیاس مکانی بازگو می‌کند (Lu et al., 2006).

روش‌های قدیمی برآورد SDR اغلب به وجود داده‌های ثبت شده طولانی‌مدت از بار رسوبی و در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در آبراهه‌ها و همچنین، وجود یک اندازه‌گیری یا تخمین معقول از شدت فرسایش در دامنه وابسته هستند (Lu et al., 2006). برخی روش‌های نسبت تحویل رسوب را می‌توان برای یک رگبار (Ferro and Porto, 2000; Arnold et al., 1996; Minacapillia, 1995; Kinnell, 2006) به کار برد و برخی دیگر، مقدار متوسط از نسبت تحویل رسوب حوضه (Ferro and Porto, 2000; Gubin et al., 2005; Fernandez et al., 2003) را ارائه می‌دهند.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

روش‌های قدیمی برآورد SDR اغلب به وجود داده‌های ثبت شده طولانی‌مدت از بار رسوبی و در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در آبراهه‌ها و همچنین، وجود یک اندازه‌گیری یا تخمین معقول از شدت فرسایش در دامنه وابسته هستند (Lu et al., 2006). برخی روش‌های نسبت تحویل رسوب را می‌توان برای یک رگبار (Ferro and Porto, 2000; Arnold et al., 1996; Minacapillia, 1995; Kinnell, 2006) به کار برد و برخی دیگر، مقدار متوسط از نسبت تحویل رسوب حوضه (Ferro and Porto, 2000; Gubin et al., 2005; Fernandez et al., 2003) را ارائه می‌دهند.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه عوامل مؤثر و برآورد نسبت تحویل رسوب صورت گرفته است که نهایتاً منجر به ارائه مدل‌های جدیدی برای برآورد این عامل شده است. Glymph (1954) برای اولین بار از اصطلاح "شدت تحویل رسوب" برای بیان نسبت بین بار رسوب سالانه حوضه به فرسایش ناخالص سالانه آن استفاده نمود.

¹ Sediment Delivery Ratio (SDR)

² Sediment Delivery Distributed Model (SEDD)

تحويل رسوب با استفاده از یک مدل به‌تنهایی و یا مدل‌های مبتنی بر یک عامل، در مقیاس حوزه آبخیز میسر نیست. هرچند تاکنون مدل‌های متعددی بر اساس عواملی مانند شیب، مساحت و داده‌های هیدرولوژیک برای برآورد نسبت تحويل رسوب ابداع شده است، اما چنین مدل‌هایی نیز معایب و محاسن خاص خود را دارند (Lu et al., 2004).

بنابراین، در هر حوزه آبخیز ضروری است که روش مناسب برآورد نسبت تحويل رسوب انتخاب شود. به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز معرف-زوجی که هم معرف بخش وسیعی از کشور هستند و هم با هدف مطالعه دقیق فرایندهای هیدرولوژیک از جمله فرسایش و رسوب و سپس تعمیم آن به سطح بزرگ‌تری از کشور طراحی و تجهیز شده‌اند، انجام این پژوهش و تعیین نسبت تحويل رسوب با خطای کمتر در این آبخیزها ضروری است. بنابراین، انجام پژوهشی برای برآورد نسبت تحويل رسوب با روش‌های مختلف و مقایسه آنها و در نهایت ارزیابی نتایج با روش سزیم-۱۳۷ به‌ویژه در یک حوزه آبخیز معرف برای امکان استفاده نتایج در بخش وسیع‌تری از کشور از ضروریات است، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با توجه به موارد مطرح شده، برای دستیابی به هدف ارزیابی مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت و مدل شاخص نسبت تحويل رسوب سرویس جنگل امریکا، مدل‌های SATEEC و InVEST برآورد نسبت تحويل رسوب در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان برنامه‌ریزی شد.

جمع‌بندی بررسی پژوهش‌ها نشان داد، روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در بسیاری از حوزه‌های آبخیز مطالعاتی در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و کارایی برخی از این روش‌ها نیز مورد تأیید قرار گرفته است. از آنجایی که بسیاری از روش‌های مذکور ساده بوده و از متغیرهای زودیافت استفاده می‌کنند، بنابراین، ارزیابی کارایی این روش‌ها در حوزه‌های آبخیز معرف-زوجی کشور که معرف بخش وسیعی از کشور هستند، بسیار ضروری و هدف اصلی پژوهش حاضر است.

نسبت بین فرسایش رگبار برآوردی مدل USLE و مقادیر مشاهده‌ای فرسایش طی پژوهش مذکور بررسی شد. از طرفی، مقایسه‌ای لازم بین مقادیر مشاهده‌ای فرسایش خاک در کرت‌ها با تخمین‌های حاصل از مدل USLE در شرایط بسیار مشابه پوشش گیاهی و فرسایش‌پذیری با شرایط حاکم بر رگبارهای مورد مطالعه نیز برای دستیابی به مقدار صحیح فرسایش خاک در بالادست حوضه با استفاده از مدل USLE توسط ایشان انجام گرفت. روش غیرمستقیم نیز از نسبت رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی به فرسایش برآورد شده در سطح (روش نیمه محاسباتی) به‌دست می‌آید.

در همین راستا و به‌منظور برآورد مقدار نسبت تحويل رسوب در مناطق مختلف ایران و جهان مطالعات گسترده‌ای با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت (Ferro and Haan et al., 1994; Glymph, 1954) Kinsey-Fernandez et al., 2003; Porto, 2000; Mutua Lu et al., 2003; Henderson et al., 2003; Lu et al., 2006; Gubin et al., 2006; Ramos-Scharron and Kinnell, 2006; Vigiak; Sadeghi et al., 2008; MacDonald, 2007; Nasri et al., 2012; Asadi Nalivan et al., 2013; Sánchez et al., Wu et al., 2018; and Najafi, 2015; Aneseyee et al.; Cislighi and Bischetti, 2019; 2018; al., 2020; Kaffas et al., 2021; Batista et al., 2021) مدل^۱ InVEST (Hamel et al., 2015, 2016) و مدل^۲ SATEEC (Park et al., 2010; Lim et al., 2005) (Damian et al., 2014) صورت گرفته است.

به‌دلیل کمبود نتایج برآورد یا اندازه‌گیری دقیق نسبت تحويل رسوب در بسیاری از حوزه‌های آبخیز در اغلب کشورها، مشاهده می‌شود که به‌دلیل پیچیده بودن میزان تحويل رسوب، روش‌های تعیین نسبت تحويل رسوب، مبتنی بر داده‌های محدود قابل اندازه‌گیری، پایه‌گذاری شده‌اند. به‌طوری‌که با استفاده از چنین مدل‌هایی نیز اغلب برآورد دقیق و قابل اطمینان از نسبت

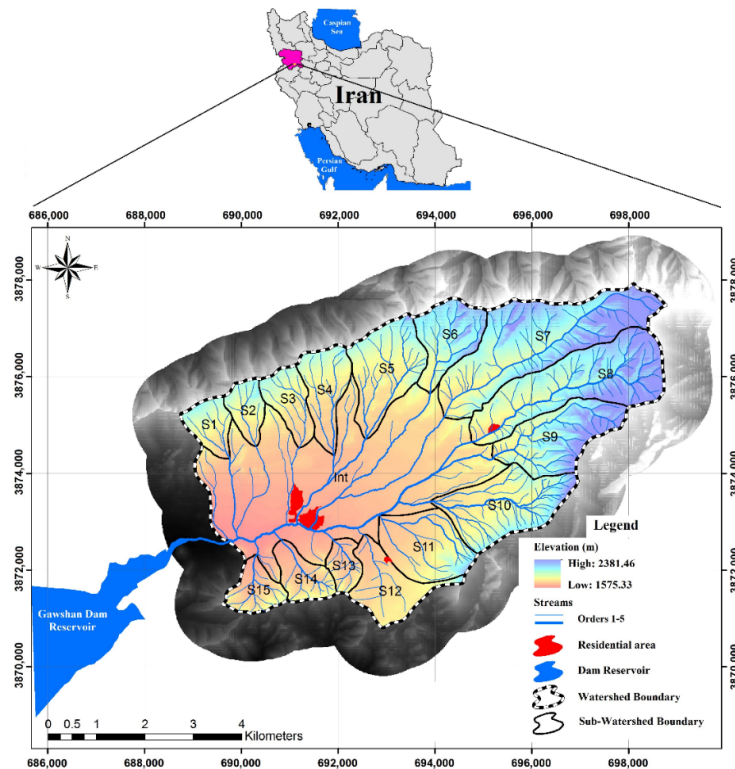
¹ Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff

² Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در استان کردستان، یکی از زیرحوزه‌های آبخیز رودخانه گاورود است که در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی کامیاران واقع شده است (شکل ۱). مساحت این حوزه

آبخیز ۴۳۳۶/۲۲ هکتار، محیط ۲۹/۰۷۸ کیلومتر و تراکم زهکشی ۳/۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع است و حداکثر و حداقل ارتفاع در آن به ترتیب ۲۳۸۵ و ۱۵۷۶ متر از سطح دریا است (Sedighi et al., 2020).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در استان کردستان و ایران (Sedighi et al., 2022)

Fig. 1. Geographic location of Khamsan representative-paired watershed in Kurdistan Province and Iran

روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب: به‌منظور ارزیابی روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب، از مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت و مدل شاخص نسبت تحویل رسوب سرویس جنگل امریکا، مدل‌های SATEEC و InVEST استفاده شد. برای محاسبه نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت به مقادیر بار رسوبی تولید شده از یک حوزه آبخیز نیاز است. از آنجایی که اندازه‌گیری نسبت تحویل رسوب امکان‌پذیر نیست، بنابراین در عمل از مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت مانند مساحت (A) به کیلومتر مربع و مایل مربع، نسبت اختلاف ارتفاع (R) به طول آبراهه اصلی (L)، شیب آبراهه اصلی (SLP)، شماره منحنی (CN) استفاده می‌شود.

پوشش گیاهی مراتع منطقه، به‌صورت پراکنده و بعضاً متراکم گونه‌های گیاهی از خانواده گرامینه، گون، کنگر، شقایق و غیره به چشم می‌خورد. همچنین، درختانی مثل زردآلو، بادام، هلو، مو، گلابی، زالک، گردو، سیب نیز علاوه بر کشت در کاربری باغ، به‌صورت پراکنده در بخش‌های کم‌ارتفاع منطقه موجود است. اراضی زراعی دیم نیز از نظر وسعت دومین کاربری اراضی بعد از مراتع است. تنوع واحدهای ژئومورفولوژی حوزه آبخیز خامسان کم و محدود است. رخساره‌هایی از قبیل دامنه منظم، برون‌زدگی سنگی و دامنه پوشیده از واریزه به چشم می‌خورد. واحد مخروط‌افکنه دارای شیب متوسط ۶/۶ درصد و در حد فاصل تپه‌ماهور و نقاط کم ارتفاع واقع شده است.

دیگر افزونه‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی برای کار با مدل ندارد (Damian et al., 2014). این مدل تولید رسوب را که از حوزه آبخیز به سمت خروجی حوزه آبخیز حرکت می‌کند، تخمین می‌زند که مقدار آن معمولاً بین صفر و یک است (Park et al., 2010). مدل تحویل رسوب InVEST، هدررفت خاک را با استفاده از مدل RUSLE برای هر پیکسل محاسبه می‌کند.
مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت:
 مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت در جدول (۱) ارائه شده است.

ابزار موجود برای برآورد نسبت تحویل رسوب در روش‌های ترسیمی نمودارهای ترسیم شده حاصل از پژوهش‌ها و مطالعات گسترده پژوهشگران بسیاری بوده که نتایج خود را در قالب نمودارهایی ارائه نموده و با استفاده از آنها می‌توان میزان نسبت تحویل رسوب را برآورد نمود. در بیشتر این نمودارها عامل سطح حوزه آبخیز به‌عنوان متغیر موردنیاز برای محاسبه نسبت تحویل رسوب به‌کار گرفته شده است. SATEEC نیز یکی دیگر از مدل‌هایی است که به‌منظور برآورد SDR و رسوب‌دهی در نقاط مختلف شبکه زهکشی یک حوزه آبخیز طراحی شده و به‌عنوان یک افزونه در نرم‌افزار ArcView قابل نصب و استفاده است. تمام مراحل به‌طور خودکار صورت می‌گیرد و نیازی به استفاده از

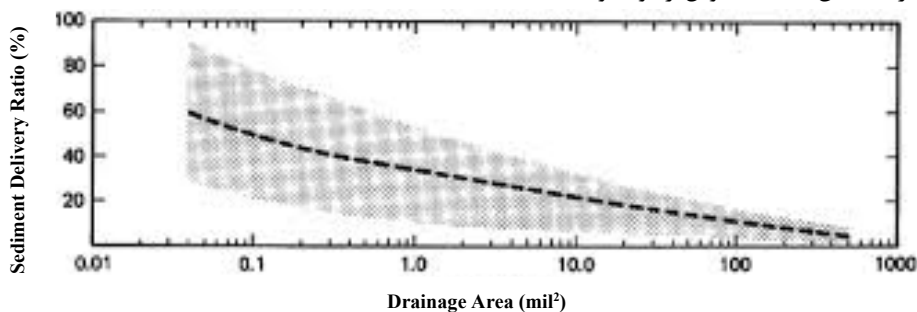
جدول ۱- مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت برای برآورد نسبت تحویل رسوب

Table 1. Empirical models based on easy-to-measure sediment delivery ration

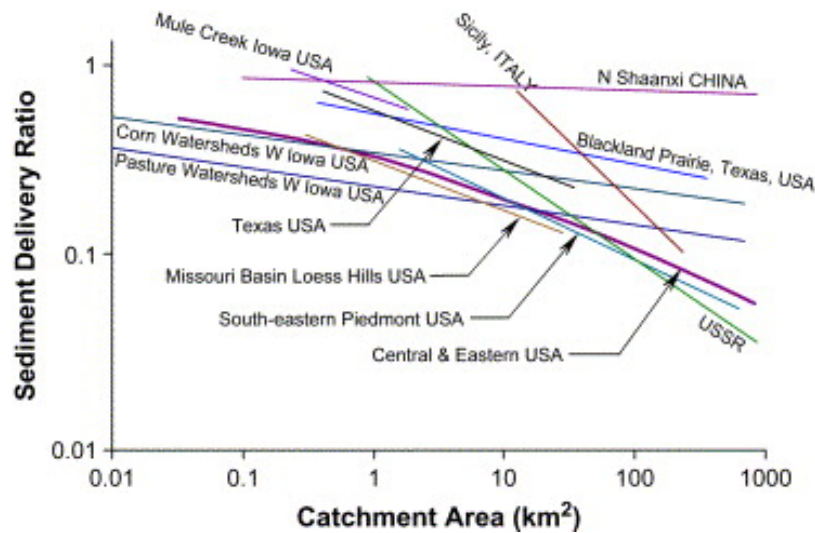
Researcher	Equation	Description
Maner (1958)	$\text{Log}(\text{SDR}) = 1.8768 - 0.41191 \text{Log}(10A)$	A: Watershed area (mil ²)
Williams and Brendt (1972)	$\text{SDR} = 0.0627 \text{SLP}^{0.403}$	SLP: Main stream slope (%)
USDA (1979)	$\text{SDR} = 0.5656 \text{AREA}^{-0.11}$	A: Watershed area (km ²)
Renfro (1975)	$\text{Log}(\text{SDR}) = 1/7935 - 0/41191 \log A$	A: Watershed area (km ²)
Renfro and Waldo (1983)	$\text{Log}(\text{SDR}) = 0.294259 + 0.82363 \text{Log R/L}$	R/L: Relief/length of main stream (m/m)
Vanoni (1975)	$\text{SDR} = 0/42 A^{-0/125}$	A: Watershed area (mil ²)
Boyce-A (1975)	$\text{SDR} = 0.41 A_T^{-0.3}$	A: Watershed area (km ²)
Boyce-B (1975)	$\text{SDR} = 0.375 A^{-0.238}$	A: Watershed area (km ²)
Mutchler and Bowie (1975)	$\text{SDR} = 0.488 - 0.006A + 0.01RO$	A: Watershed area (mil ²) Ro: Average annual runoff (in)
Williams and Berndt (1977)	$\text{SDR} = 1.366 * 10^{-12} (A)^{0.0998} (R/L)^{0.3629} (CN)^{5.444}$	A: Watershed area (mil ²) R/L: Relief/length of main stream (mil/mil) CN: Curve number
USDA-SCS (1971)	$\text{SDR} = 0.332A^{-0.2236}$	A: Watershed area (km ²)

ارائه شده است که در پژوهش برای برآورد نسبت تحویل رسوب در حوزه آبخیز خامسان از این منحنی‌ها نیز استفاده شد (شکل‌های ۲ تا ۴).

علاوه بر روابط ارائه شده در جدول (۱)، برای محاسبه نسبت تحویل رسوب با توجه به ویژگی‌های حوزه آبخیز، تعدادی منحنی نیز توسط پژوهشگران برای بیان رابطه بین نسبت تحویل رسوب و مساحت

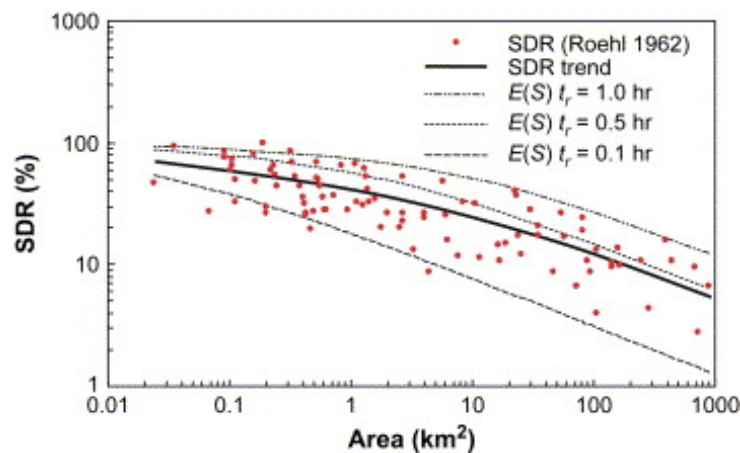


شکل ۲- رابطه بین مساحت حوزه آبخیز و نسبت تحویل رسوب در امریکا (USDA-SCS, 1981)
 Fig. 2. Relationship between watershed area and sediment delivery ratio (USDA-SCS, 198)



شکل ۳- رابطه بین نسبت تحویل رسوب و مساحت حوزه آبخیز بر حسب کیلومتر مربع در بخش‌هایی از ایالات متحده آمریکا، اروپا و آسیا (Ferro and Minacapilli, 1995؛ Walling, 1983)

Fig. 3. Relationship between sediment delivery ratio and watershed area (km^2) in sections of USA, European and Asia (Walling, 1983; Ferro and Minacapilli, 1995)



شکل ۴- تلفیق اثرات مساحت و مدت زمان بارندگی مازاد بر نسبت تحویل رسوب (Roehl, 1962)

Fig. 4. Effects incorporation area and rainfall duration on sediment delivery ratio (Roehl, 1962)

تطابق با مدل رقومی ارتفاع در نظر گرفته شد. سپس، نقشه‌ها در محیط Arcview طبق رابطه مدل در یکدیگر ضرب، نقشه شدت فرسایش محاسبه و با استفاده از زیرمدلی به نام نسبت تحویل رسوب/رسوب‌دهی اقدام به تهیه نقشه نسبت تحویل رسوب و ضرب آن در نقشه فرسایش برای به‌دست آوردن نقشه رسوب‌دهی حوزه و زیرحوزه‌های آبخیز شد (Lim et al., 2005). برای این منظور، نقاط خروجی زیرحوزه‌های آبخیز به صورت یک لایه نقطه‌ای برای انجام محاسبات به نرم‌افزار معرفی شد و سپس، میزان رسوب‌دهی در نقاط مذکور برآورد شد.

مدل SATEEC: مدل SATEEC، از مدل RUSLE برای برآورد میزان هدررفت خاک در واحد سطح استفاده می‌کند. مجموعه داده‌های ورودی این مدل شامل مدل رقومی ارتفاع و نقشه‌های عوامل مورد استفاده در رابطه جهانی هدررفت خاک است. هر یک از نقشه‌های فوق در قالب رستر به صورت لایه‌های جداگانه به محیط نرم‌افزار Arcview فراخوانده شدند. در نهایت، بررسی و محاسبه نقشه عامل LS نیز توسط مدل و با استفاده از روش پیشنهادی Moore and Burch (1986) انجام گرفت. ابعاد سلولی هر یک از نقشه‌های مربوطه یعنی R، K، C و P برابر ۱۰ متر و در

عملکرد عوامل فیزیکی مؤثر در رابطه انتقال رسوب است (Behzadfar et al., 2017). در این مدل، داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل WaTEM/SEDEM از جمله نقشه‌های عامل فرساینده‌گی باران^۵، عامل فرسایش پذیری خاک^۶، عامل توپوگرافی^۷، عامل مدیریت زراعی^۸، عامل مدیریت اراضی^۹ و مدل رقومی ارتفاع^{۱۰} از پژوهش‌های انجام شده پیشین (Faraji, 2018؛ Khaledi Darvishan et al., 2021) در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان تهیه شد.

روش سزیم-۱۳۷: در بسیاری از منابع، از روش سزیم-۱۳۷ به‌عنوان تنها روش موجود و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری اجزای بودجه رسوب شامل فرسایش کل، رسوب‌گذاری کل، فرسایش خالص (رسوب‌دهی) و نسبت تحویل رسوب به‌ویژه در مقیاس دامنه و زیرحوزه آبخیز یاد شده است (به‌عنوان مثال، Porto and Sedighi et al., 2012؛ Walling, 2013؛ Gasper et al., 2013). همچنین، در پژوهش‌های قبلی به‌منظور ارزیابی روش سزیم-۱۳۷ از داده‌های رسوب خروجی حوزه آبخیز خامسان استفاده شده و صحت این روش در حوزه آبخیز خامسان مورد تأیید قرار گرفته است.

بنابراین، نتایج محاسبه نسبت تحویل رسوب برای کل حوزه آبخیز خامسان به روش سزیم-۱۳۷ حاصل پژوهش (Sedighi et al., 2022) برای مقایسه روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب در پژوهش حاضر استفاده شد. به عبارت دیگر، نتایج برآوردهای نسبت تحویل رسوب حاصل از مدل‌های تجربی در تمامی داده‌های تعداد ۱۵ زیرحوزه‌های آبخیز با متوسط نسبت تحویل رسوب حاصل از روش سزیم-۱۳۷ در زیرحوزه‌های آبخیز مقایسه شد و مدل‌هایی که نزدیک‌ترین برآوردها را با نتایج سزیم-۱۳۷ داشتند، به‌عنوان مدل‌های برتر

مدل InVEST: یکی از نرم‌افزارهای با قابلیت برآورد خدمات بوم‌سازگان، نرم‌افزار ارزش‌گذاری یکپارچه مبادلات و خدمات محیط زیستی است. نرم‌افزار InVEST شامل مجموعه‌ای از مدل‌های مجزا است که هر یک از مدل‌ها به بررسی الگوی مکانی خدمات بوم‌سازگان^۱ و تغییرات آنها با توجه به تغییر کاربری اراضی می‌پردازد. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار InVEST برای محاسبه نسبت تحویل رسوب نیز استفاده شد. مدل InVEST با استفاده از رابطه جهانی هدررفت خاک اصلاح شده و ادغام اطلاعات در نقشه‌های LULC^۲، خصوصیات خاک، مدل رقومی ارتفاع، داده‌های بارندگی و آب و هوا هرکدام در مقیاس پیکسل می‌تواند به شناسایی پتانسیل هدررفت خاک و انتقال رسوب در هر بخش از زمین بپردازد. درنهایت، شاخص نگهداشت رسوب^۳ (که نشان‌دهنده جلوگیری از هدررفت خاک کاربری اراضی مورد بررسی در مقیاسه با خاک لخت توسط عامل نسبت تحویل رسوب است) را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌کند (Karthikeyet al., 2018).

$$SDR_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i (1 - C_i P_i) \quad (1) \text{ رسوب نگهداشت شاخص}$$

که در آن، R ، K ، LS ، C و P عوامل مدل رابطه جهانی هدررفت خاک اصلاح شده^۴ هستند و نسبت تحویل رسوب درصدی از مواد فرسایش‌یافته است که به‌صورت رسوب از حوزه آبخیز خارج می‌شود. این شاخص چون نگهداری مقدار رسوب بالادست را در نظر نمی‌گیرد، نگهداشت رسوب را کم تخمین می‌زند و بیشتر به‌صورت کیفی تفسیر می‌شود (Karthikeyet al., 2018).

مدل WaTEM/SEDEM: مدل WaTEM/SEDEM در بخش WaTEM برای برآورد فرسایش خاک مبتنی بر مدل RUSLE و در بخش SEDEM مبتنی بر

¹ Ecosystem Services

² Land Use/Land Cover (LULC)

³ Sediment Retention Index

⁴ Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

⁵ Rainfall Erosivity Factor (R)

⁶ Soil Erodibility Factor (K)

³ Length Slope Factor (LS)

⁴ Land Cover Factor (C)

⁵ Management Factor (P)

⁶ Digital Elevation Model (DEM)

نتایج و بحث

نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت و مدل‌های SATEEC، InVEST و WaTEM/SEDEM: برآوردهای نسبت تحویل رسوب حاصل مدل‌های مبتنی بر متغیرهای زودیافت در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین، نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب در مدل‌های SATEEC، InVEST و WaTEM/SEDEM در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در جدول (۳) آورده شده است.

نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از روش سزیم-۱۳۷: همان‌طور که گفته شد، نتایج نسبت تحویل رسوب با استفاده از روش سزیم-۱۳۷ (Sedighi et al., 2022) که در پژوهش‌های قبلی در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان انجام شده بود (جدول ۴)، به‌منظور ارزیابی برآوردهای مدل‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

بیشتر سطح زیرحوزه آبخیز شماره ۱۰، شامل اراضی دیم است و به‌دلیل کم بودن رواناب سطحی ناشی از شیب کم زیرحوزه آبخیز و شخم گسترده اراضی، تنها بخش ناچیزی از فرسایش به خروجی زیرحوزه آبخیز انتقال می‌یابد. از طرف دیگر، یک نوار باریک برونزد سنگی پرشیب موجب ریزش ذرات خرده سنگ و خاک به پای دامنه با کاربری مرتع شده و نتایج روش سزیم-۱۳۷ در نقاط نمونه‌برداری شده در این بخش عمدتاً نشان‌دهنده رسوب‌گذاری با شدت کم بوده است. بنابراین، در مجموع مقدار رسوب‌گذاری در این زیرحوزه آبخیز به مقدار ناچیزی بیشتر از مقدار فرسایش برآورد شده و در عمل نسبت تحویل رسوب برابر صفر در نظر گرفته شده است.

معرفی شدند. دلیل استفاده از روش میانگین این است که مهم‌ترین پارامتر مؤثر در برآورد نسبت تحویل رسوب در مدل‌های تجربی، مساحت زیرحوزه آبخیز است و بنابراین، می‌بایست متوسط برآوردهای مدل‌ها در زیرحوزه آبخیزهای مورد بررسی با مساحت‌های مختلف برای مقایسه با نتایج سزیم-۱۳۷ استفاده می‌شد.

این در حالی است که مهم‌ترین پارامتر مؤثر در اندازه‌گیری نسبت تحویل رسوب در روش سزیم-۱۳۷ در حوزه آبخیز مورد مطالعه، کاربری اراضی است (Sedighi et al., 2021, 2022) و بنابراین، در برخی زیرحوزه‌های آبخیز به‌دلیل بالا بودن درصد کاربری دیم، نسبت تحویل رسوب حاصل از روش سزیم-۱۳۷ بسیار زیاد و در برخی دیگر که بیشتر پوشیده از اراضی مرتعی بودند، نسبت تحویل رسوب حاصل از روش سزیم-۱۳۷ بسیار کم بود. دامنه بسیار زیاد تا بسیار کم به‌دلیل تغییرات زیاد درصد اراضی زراعی دیم در زیرحوزه‌های آبخیز بوده است.

به‌عبارت دیگر، در بیشتر زیرحوزه‌های آبخیزی که اراضی دیم در آنها غالب است، نسبت تحویل رسوب بالاتر بوده است. در نهایت، همان‌طور که قبلاً گفته شد، ارزیابی صحت نتایج روش سزیم-۱۳۷ با استفاده از داده‌های رسوب مشاهداتی مورد تأیید قرار گرفته و به‌همین دلیل به‌عنوان روش مرجع برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی نسبت تحویل رسوب در نظر گرفته شد.

برای انجام تحلیل‌های آماری، ابتدا با توجه به تعداد کم داده‌ها نرمال بودن با استفاده از آزمون شاپیروویلیک (Razali and Wash, 2011) بررسی شد. داده‌هایی که دارای پراکنش غیرنرمال بودند، تلاش لازم برای نرمال کردن از طریق تغییر داده‌ها به‌صورت‌های معمول (الگاریتم، جذر و غیره) انجام شد.

سپس، برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف برآورد نسبت تحویل رسوب با روش سزیم-۱۳۷ برای داده‌های نرمال با استفاده از آزمون t زوجی و برای داده‌هایی که دارای پراکنش نرمال نبودند، از آزمون غیرپارامتریک ویلکاکسون در نسخه ۲۰ نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

جدول ۲- نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب سالانه در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان با استفاده از روش‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت

Table 2. Estimation results of SDR in Khamsan representative-paired watershed using empirical methods based on easy-to-measure variables

Sub watershed	Roehl (1962)			Mutchler and Bowie (1975)	Boyce-B (1975)	Boyce-A (1975)	USDA-SCS (1971)	USDA (1979)	Maner (1958)	Williams and Brendt (1972)	Williams and Berndt (1977)	Vanoni (1975)	Renfro (1975)	Renfro and Waldo (1983)	Walling (1983) , Ferro and Minacapalli (1995)	USDA-SCS (1981)
	Excess rainfall for 1.0 hours	Excess rainfall for 0.5 hours	Excess rainfall for 0.1 hours													
S ₁	73.0	57.0	18.0	48.7	39.0	43.0	34.4	57.6	46.1	35.4	2.4	48.3	66.4	60.5	37.5	41.0
S ₂	78.0	60.0	19.0	48.7	39.9	44.3	35.2	58.3	48.0	33.5	2.7	57.9	69.2	51.3	37.3	42.0
S ₃	65.0	50.0	16.0	48.7	36.8	40.0	32.6	53.1	41.2	29.9	2.0	46.8	60.1	49.7	36.1	40.0
S ₄	67.0	49.0	14.0	48.6	34.1	36.3	30.3	54.2	36.5	28.8	1.7	45.0	52.6	46.4	35.1	40.0
S ₅	68.0	49.0	13.0	48.4	30.3	31.4	37.2	51.3	29.9	28.7	1.7	52.3	43.1	36.2	33.1	40.0
S ₆	71.0	51.0	16.0	48.5	32.9	34.8	29.4	53.3	34.5	30.0	2.1	44.2	49.6	37.4	33.9	40.0
S ₇	50.0	39.0	10.0	47.7	25.1	24.8	22.8	47.1	21.6	25.8	1.7	38.4	31.1	30.0	30.3	30.0
S ₈	60.0	40.0	10.0	47.9	26.1	26.3	23.8	48.1	23.4	26.0	1.6	39.3	33.7	29.6	31.0	32.0
S ₉	68.0	49.0	13.0	48.3	29.9	30.8	26.8	51.0	29.1	28.9	1.9	42.0	42.0	38.4	33.0	34.0
S ₁₀	65.0	48.0	12.0	48.7	29.0	29.7	26.1	50.3	27.7	28.3	1.6	41.4	39.9	29.0	32.0	35.0
S ₁₁	69.0	50.0	14.0	48.4	31.0	32.2	27.8	51.9	31.0	27.9	1.2	42.8	44.7	12.6	33.3	31.0
S ₁₂	71.0	51.0	16.0	48.5	33.0	34.9	29.4	53.4	34.6	17.9	0.7	44.2	49.8	24.7	34.7	37.0
S ₁₃	79.0	61.0	22.0	48.8	42.1	47.5	37.0	59.8	52.8	26.8	1.4	50.3	76.1	34.2	36.9	43.0
S ₁₄	73.0	59.0	18.0	48.7	37.6	41.1	33.3	56.7	43.3	24.8	1.3	47.4	62.4	30.8	37.1	40.0
S ₁₅	74.0	59.0	19.0	48.7	38.4	42.3	34.0	57.3	45.0	27.5	1.4	47.9	64.8	36.1	36.7	42.0
Total	22.0	18.0	4.1	38.9	15.3	13.2	14.3	37.4	9.1	20.8	0.8	29.5	13.2	20.7	25.3	20.0

جدول ۳- نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب سالانه با استفاده از مدل‌های WaTEM/SEDEM, InVEST, SATEEC

Table 3. Estimation results of annual SDR using SATEEC, InVEST and WaTEM/SEDEM

Sub watershed	WaTEM/SEDEM	InVEST	SATEEC
S ₁	21.3	18.6	57.8
S ₂	21.2	18.3	63.2
S ₃	19.9	18.1	36.9
S ₄	19.3	17.5	63.1
S ₅	19.9	17.3	57.3
S ₆	21.2	18.3	53.2
S ₇	21.8	19.0	47.1
S ₈	21.6	18.5	48.1
S ₉	21.2	19.0	48.1
S ₁₀	19.9	18.3	55.3
S ₁₁	19.0	16.7	60.4
S ₁₂	18.6	12.3	63.1
S ₁₃	18.6	15.5	63.4
S ₁₄	20.7	15.4	59.3
S ₁₅	19.9	15.6	58.2
Total	19.4	17.8	38.3

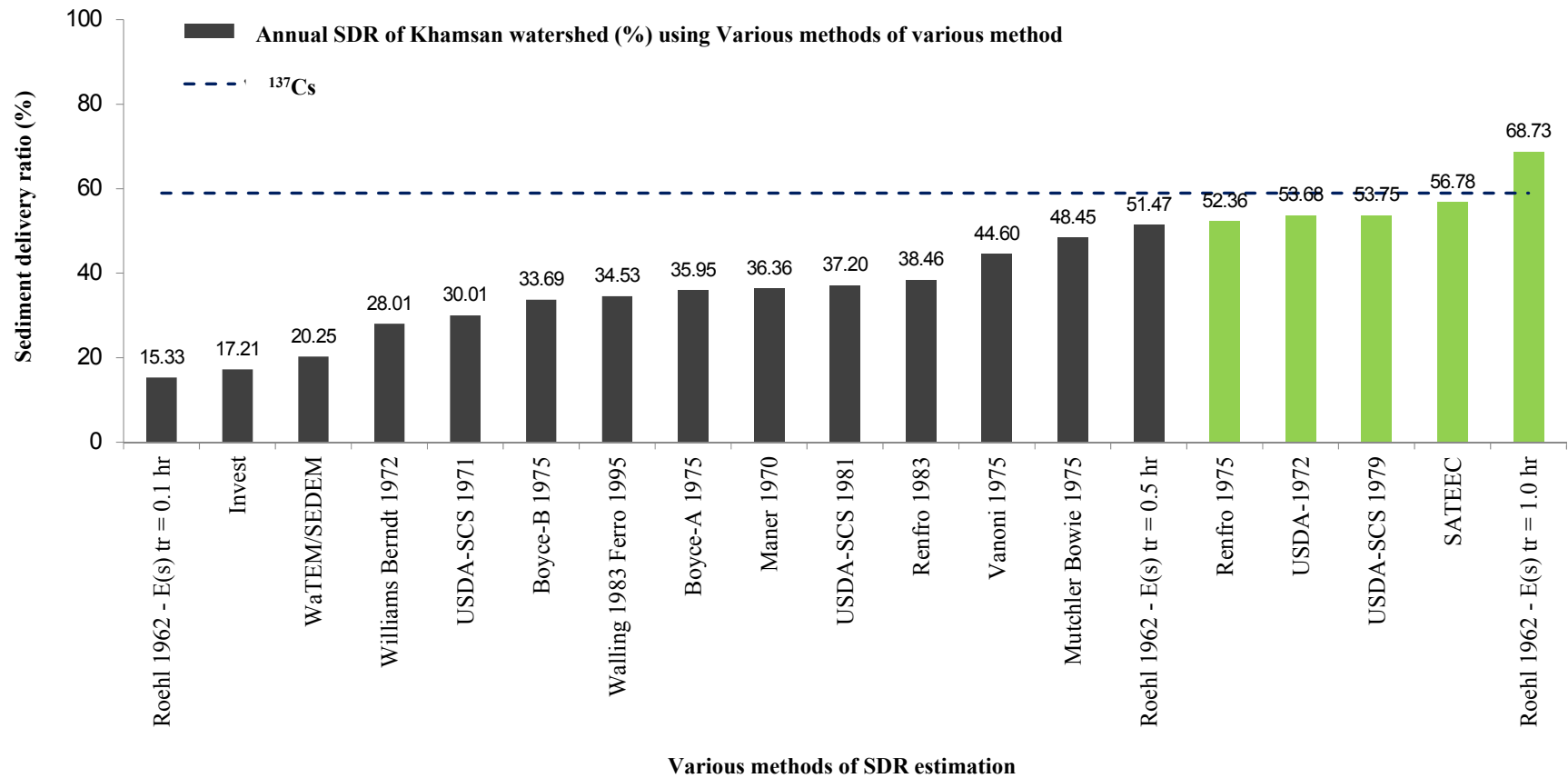
جدول ۴- نتایج محاسبه نسبت تحویل رسوب (درصد) با استفاده از روش سزیم-۱۳۷ در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان (Sedighi et al., 2022)

Table 4. Estimation results of SDR (%) using ¹³⁷Cs in Khamsan representative-paired watershed (sadeghi et al., 2022)

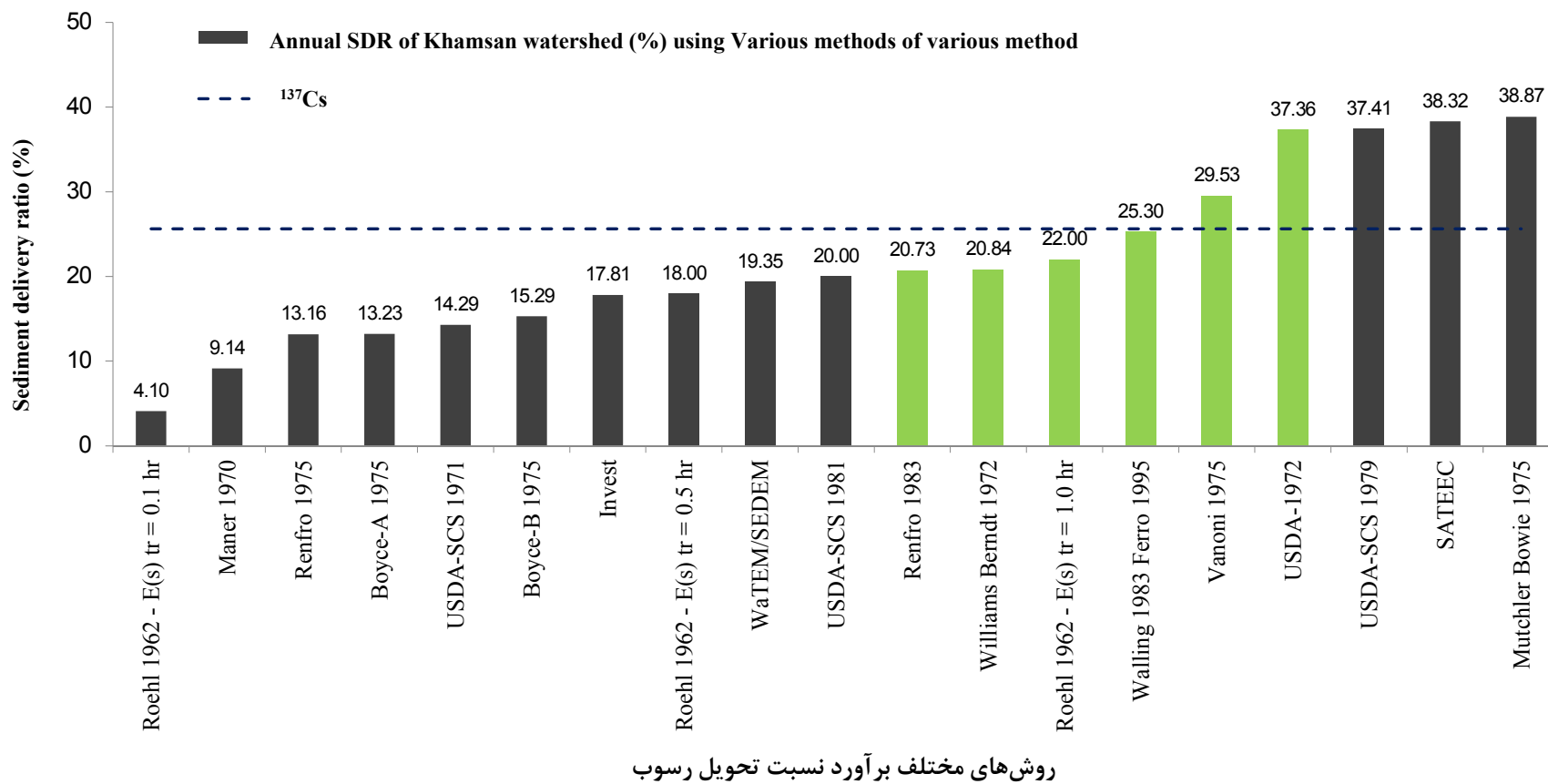
Sub watershed	SDR (%)	Sub watershed	SDR (%)
S ₁	29.9	S ₉	60.2
S ₂	00.0	S ₁₀	74.1
S ₃	53.4	S ₁₁	62.4
S ₄	68.6	S ₁₂	72.4
S ₅	91.5	S ₁₃	92.1
S ₆	29.4	S ₁₄	58.1
S ₇	81.2	S ₁₅	40.2
S ₈	25.6	Total	70.7

همچنین، مقایسه نتایج نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی و روش سزیم-۱۳۷ در حوزه آبخیز معرف خامسان در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به نرمال نبودن و عدم امکان نرمال کردن داده‌های مربوط به برخی مدل‌ها، برای بررسی اختلاف نتایج مدل‌های مختلف با روش سزیم-۱۳۷ از آزمون ویلکاکسون استفاده شد.

مقایسه روش‌های تخمین نسبت تحویل رسوب با نتایج روش سزیم-۱۳۷: شکل (۵)، مقایسه تمام روش‌های استفاده شده برای برآورد نسبت تحویل رسوب با روش سزیم-۱۳۷ را در مقیاس زیرحوزه آبخیزها و شکل (۶) نیز، این مقایسه را در مقیاس کل حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب با روش سزیم-۱۳۷ در مقیاس زیرحوزه آبخیز حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان
 Fig. 5. Comparison of estimation methods of SDR with ¹³⁷Cs method in sub-watershed scale of Khamsan representative-paired watershed



شکل ۶- مقایسه روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب با روش سزیم-۱۳۷ در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان
Fig. 6. Comparison of estimation methods of SDR with ¹³⁷Cs method in Khamsan representative-paired watershed

جدول ۵- مقایسه نتایج نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی و روش سزیم-۱۳۷ در حوزه آبخیز معرف خامسان

Table 5. Results comparison of SDR using empirical methods and ¹³⁷Cs method in sub-watershed scale of Khamsan representative-paired watershed

	P-Value	Z-Value	Data pair examined
¹³⁷ Cs method	0.687	-0.402	USDA-SCS (1981)
	0.981	-0.024	Ferro and Walling (1983) Minacapalli (1995)
	0.001*	-3.290	Excess rainfall for -Roehl (1962) 1.0 hours
	0.001*	-3.314	Excess rainfall for -Roehl (1962) 0.5 hours
	0.246	-1.160	Excess rainfall for -Roehl (1962) 0.1 hours
	0.523	-0.639	Renfro (1983)
	0.044*	-2.012	Renfro (1975)
	0.084	-1.728	Vonani (1975)
	0.009*	-2.627	Brendet and Williams (1977)
	0.554	-0.592	Brendet and Williams (1972)
	0.981	-0.024	Maner (1958)
	0.015*	-2.438	USDA (1979)
	0.635	-0.450	USDA-SCS (1971)
	0.981	-0.024	Boyce-A (1975)
	0.795	0.26	Boyce-B (1975)
	0.000*	-3.621	Mutchler and Bowie (1975)
	0.015*	-2.431	SATEEC
	0.001*	-3.206	InVEST
	0.352	-0.931	WaTEM/SEDEM

نسبت تحویل رسوب از بارندگی و رواناب بیشتر از ویژگی‌های توپوگرافی بوده و به همین دلیل، نتایج آن نیز با روش‌های مذکور اختلاف معنی‌داری نداشته است. نتایج نشان داد، تمام روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب مبتنی بر متغیرهای زودیاقت با مدل WaTEM/SEDEM به میزان قابل‌توجهی تفاوت دارند و حتی روش‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیاقت عملکرد بهتری دارند. ذکر این نکته الزامی است که اجرای مدل WaTEM/SEDEM مستلزم تهیه ورودی‌های بسیار بیشتر و به مراتب سخت‌تر است.

این نتایج با بخشی از نتایج Asghari Srasknrod et al., (2013) و نتایج Bayat and Moradi (2014) مبنی بر موفقیت نسبتاً خوب روش Renfro (1962) نسبت به سایر روش‌ها همخوانی دارد. همچنین، با نتایج Sadeghi et al., (2008)، مبنی بر برآورد مناسب روش Kheirkhah and USDA-SCS (1981) و Nazarnezhad (2013) مبنی بر انتخاب روش Renfro (1983) به‌عنوان بهترین روش تجربی مغایرت دارد.

به‌منظور، جستجوی دلایل احتمالی متناقض بودن نتایج مدل‌های برآوردها نسبت تحویل رسوب، نقشه شیب متوسط زیرحوزه آبخیزها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که شیب رابطه مثبت با نسبت تحویل

نتایج آزمون ویلکاکسون نشان داد، نتایج روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب مبتنی بر متغیرهای زودیاقت جزء روش‌های Roehl (1962) بارندگی مازاد ۰/۱ و ۰/۵ ساعت، Williams and Renfro (1975)؛ Mutchler and USDA (1979)؛ Brendet (1977)؛ Bowie (1975). با نتایج روش سزیم-۱۳۷ تفاوت معنی‌دار ندارد. همچنین، نتایج آزمون ویلکاکسون نشان داد که برآوردهای مدل‌های InVEST و SATEEC با نتایج روش سزیم-۱۳۷ به‌ترتیب در سطوح اعتماد ۹۹ و ۹۵ درصد تفاوت معنی‌دار دارند، ولی بین نتایج مدل WaTEM/SEDEM و نتایج مدل سزیم-۱۳۷ تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

تحلیل برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌های InVEST، SATEEC و WaTEM/SEDEM در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان: مقایسه نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب زیرحوزه‌های آبخیز با روش‌های مختلف نشان داد که روش‌های Roehl (1962) که مبتنی بر بارندگی مازاد هستند و همچنین، روش Mutchler and Bowie (1975) که در آن از ارتفاع رواناب سالانه استفاده شده است، تطابق خوبی با نتایج مدل InVEST دارند. در حقیقت، اثرپذیری نتایج مدل InVEST برای تخمین

SATEEC و روش (Roehl (1962) با بارش مازاد یک ساعت نزدیک‌ترین برآوردها را به روش سزیم-۱۳۷ داشتند (شکل ۵).

شرایط توپوگرافی خاص زیرحوزه‌آبخیزها در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان شاید یکی از دلایل کم‌تخمین بودن بیشتر مدل‌های برآورد نسبت تحویل رسوب در مقایسه با روش سزیم-۱۳۷ باشد. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، زیرحوزه‌های آبخیز مورد بررسی عموماً پرشیب بوده و در نزدیکی نقطه خروجی به یک‌باره وارد یک دشت میانی کم شیب می‌شوند و بخش زیادی از بار رسوب خروجی از زیرحوزه آبخیزها در ابتدای ورود به دشت ترسیب می‌شود و در نتیجه اختلاف نسبت تحویل رسوب در زیرحوزه‌های آبخیز و کل حوزه آبخیز زیاد و بیش از ۳۰ درصد است.

حال آنکه همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است نسبت تحویل رسوب قابل قبول برای حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان با توجه نتایج روش سزیم-۱۳۷ بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. بنابراین، تمام روش‌هایی که مقادیر بیشتر یا کمتر از این دامنه را برآورد کرده‌اند، برای این آبخیز مناسب نیستند. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان گفت در مقیاس کل حوزه آبخیز، از بین روش‌های بررسی شده برای برآورد نسبت تحویل رسوب، روش‌های Renfro and Waldo (1983)؛ Williams and Brendt (1972)؛ Roehl (1962) با بارش مازاد یک ساعت، Walling (1983)؛ Ferro (1995)؛ Vanoni (1975)؛ USDA (1972) نزدیک‌ترین برآوردها را به روش سزیم-۱۳۷ داشتند (شکل ۶).

یافته‌های پژوهش حاضر همچنین، با نتایج Sadeghi et al., (2008) مبنی بر برآورد مناسب روش USDA-SCS (1981) و Roehl (1962)-بارش مازاد ۱/۰ ساعت، Asadi Nalivan et al., (2013) مبنی بر عملکرد مناسب روش Renfro and Waldo (1983) در برآورد نسبت تحویل رسوب مطابقت و با نتایج Hamel et al., (2015, 2016) مبنی عملکرد مناسب مدل InVEST در برآورد نسبت تحویل رسوب مغایرت دارد. نتایج این پژوهش با نتایج Lim et al., (2005)؛ Park et al., (2010)؛ et al., (2014)؛ Damian et al., مبنی بر برآورد قابل قبول نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل

رسوب حاصل از مدل SATEEC ندارد. بنابراین، احتمالاً عامل اصلی بیشتر بودن نسبت تحویل رسوب در زیرحوزه آبخیز S₃ کوتاه بودن دامنه در این زیرحوزه آبخیز نسبت به زیرحوزه‌های آبخیز با شیب بیشتر (S₉)، S₇ و S₈) و اما با کشیدگی بیشتر است. همچنین، مدل SATEEC امکان برآورد نسبت تحویل رسوب در دشت میانی به دلیل دارا نبودن آبراهه مستقل را نداشت. نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل InVEST نشان داد که برای کل آبخیز ۱۸/۸۱ درصد، بالاترین مقدار برای زیرحوزه آبخیز S₉ با مقدار ۱۸/۹۸ درصد و پایین‌ترین مقدار برای زیرحوزه آبخیز S₁₂ با مقدار ۱۲/۲۸ درصد بود. برای بررسی دلایل احتمالی این نتایج، مجدداً نقشه شیب متوسط زیرحوزه‌های آبخیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که شیب رابطه مثبت با نسبت تحویل رسوب حاصل از مدل InVEST دارد، چراکه بیشترین شیب متوسط زیرحوزه‌های آبخیز نیز مربوط به زیرحوزه آبخیز S₉ (۴۱/۰۳ درصد) است. می‌توان این‌گونه استنباط نمود که در تخمین نسبت تحویل رسوب، شیب متوسط دامنه‌ها در مدل InVEST نقش مهم‌تری نسبت به مدل SATEEC ایفا نموده است.

تحلیل مقایسه روش‌های مورد استفاده با روش سزیم-۱۳۷: همان‌طور که قبلاً گفته شد، روش سزیم-۱۳۷ نیز با توجه به اینکه به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری فرسایش و رسوب از آن نام برده می‌شود و تعداد قابل توجهی از پژوهشگران در کشورهای مختلف (Gaspar et al., 2013؛ Dercon et al., 2012؛ Porto and Walling, 2013) کارایی این روش را برای محاسبه اجزای بودجه رسوب تایید کرده‌اند. بنابراین، اقدام به مقایسه تمام روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب استفاده شده در این پژوهش با نسبت تحویل رسوب حاصل از روش مذکور شد.

نتایج برآورد نسبت تحویل رسوب برای زیرحوزه آبخیزها و همچنین، کل حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان با استفاده از مدل‌های مبتنی بر متغیرهای زود یافت نشان داد که از میان مدل‌های مورد بررسی، در مقیاس زیرحوزه آبخیز تقریباً همه مدل‌های مورد بررسی کم تخمین بودند و تنها روش‌های (Roehl (1962)؛ Renfro (1975)؛ USDA-SCS (1979)؛ USDA

رسوب به روش سزیم-۱۳۷ در پژوهش‌های قبلی در حوزه آبخیز خامسان، نسبت تحویل رسوب برای کل حوزه آبخیز و برای متوسط ۱۵ زیرحوزه آبخیز به ترتیب ۲۵/۶۱ و ۵۸/۹۴ درصد محاسبه شده که به‌عنوان مبنای ارزیابی مدل‌های تجربی در دو مقیاس حوزه آبخیز و متوسط زیرحوزه‌های آبخیز استفاده شد.

در مقیاس زیرحوزه‌های آبخیز برآوردهای معادلات مبتنی بر متغیرهای زودیافت جزء روش Roehl (1962) - بارش مازاد ۰/۱ ساعت به‌طور معنی‌داری کمتر از مدل SATEEC بوده است. از طرفی، برآوردهای تمام روش‌های مذکور به‌جز روش Roehl (1962) - بارش مازاد ۰/۱ ساعت به‌طور معنی‌داری بیشتر از مدل InVEST و WaTEM/SEDEM بود.

این موضوع بر اهمیت در نظر گرفتن شرایط بارش مازاد برای برآورد نسبت تحویل رسوب در معادلات ارائه شده توسط Roehl تأکید دارد. همچنین، در مقیاس کل آبخیز نیز برآوردهای معادلات مبتنی بر متغیرهای زودیافت به‌جز روش Mutchler and Bowie (1975) کمتر از نتایج مدل SATEEC بود. اختلاف زیاد عملکرد روش‌های مورد بررسی در دو مقیاس زیرحوزه آبخیز و کل حوزه آبخیز ناشی از اثر انکارناپذیر دشت میانی حوزه آبخیز خامسان در کاهش شدید انتقال رسوب زیرحوزه‌های آبخیز تا خروجی کل حوزه آبخیز بوده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات خانم‌ها الهه فتحی دره‌نیچه و بیتا محمودی در جمع‌آوری داده‌های موجود و بازدید صحرائی از حوزه آبخیز خامسان قدردانی نمایند. همچنین، بدین‌وسیله از زحمات داوران گرامی در راستای ارتقای کیفیت مقاله تقدیر می‌شود.

SATEEC نیز البته در مقیاس کل حوزه آبخیز معیار است و همان‌طور که گفته شد شرایط خاص توپوگرافی و موقعیت دشت میانی حوزه آبخیز خامسان منجر به کاهش شدید تحویل رسوب در خروجی کل آبخیز شده و یکی از دلایل اصلی عدم کارایی مناسب و بیش تخمین بودن مدل SATEEC در مقیاس کل حوزه آبخیز بوده است.

نکته بسیار مهم دیگری که می‌بایست در تحلیل مقایسه برآورد مدل‌های تجربی با نتایج سزیم-۱۳۷ مورد توجه قرار داده شود، این است که مدل‌های تجربی مطابق تعریف نسبت تحویل رسوب، کل رسوب (مجموع بار معلق و بستر) را در نظر دارند، در حالی که روش سزیم-۱۳۷ به ویژه به‌صورتی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته، بیشتر بار ریزدانه و معلق حاصل از فرسایش سطحی را مد نظر قرار می‌دهد.

بنابراین، باید گفت بخشی از اختلاف نتایج و به‌ویژه بیش‌تخمینی مدل‌های تجربی با متغیرهای زودیافت برای برآورد نسبت تحویل رسوب با نتایج روش سزیم-۱۳۷ به دلیل اختلاف در فرایندهای مورد بررسی در این روش‌ها است. با این حال خوشبختانه در حوزه آبخیز خامسان رخساره‌های فرسایش شیاری و آبکندی مشخصی قابل مشاهده نیست و فرسایش سطحی در این حوزه آبخیز غالب است. بنابراین، روش سزیم-۱۳۷ برای ارزیابی برآوردهای نسبت تحویل رسوب در مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت مورد استفاده قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نتایج تعدادی از روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب شامل مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای زودیافت و مدل‌های SATEEC، InVEST و WaTEM/SEDEM همراه با روش سزیم-۱۳۷ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج بودجه‌بندی

منابع مورداستفاده

- Aneseyee, A.B., Elias, E., Soromessa, T., Feyisa, G.L., 2020. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Sci. Total Environ.* 728, 138776.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivaasan, R., King, K.W., 1996. The soil and water assessment tool (SWAT) user? Manual. Temple, TX, PP. 560-572.

- 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. *Irriga. Water Engineer.* 3(2), 19-28 (in Persian).
- Asghari Srasknrod, S., FizolahPour, M., Mohammadnezhad Arvegh, V., 2013. Study of sediment delivery ratio (SDR) in Jajroad River Watershed. *Quantita. Geomorpho. Res.* 4(1), 67-78 (in Persian).
- Batista, P.V., Lacey, J.P., Davies, J., Carvalho, T.S., Tassinari, D., Silva, M.L., Curi, N., Quinton, J.N., 2021. A framework for testing large-scale distributed soil erosion and sediment delivery models: Dealing with uncertainty in models and the observational data. *Environ. Modell. Soft.* 137, 104961.
- Bayat, R., Moradi, Sh., 2014. A review of research on sediment delivery ratio. *Watershed Manage. Soci. Iran* 2(5), 27-36 (in Persian).
- Behzadfar, A., Khaledi Darvishan, A., Gharagozlu, A., 2017. Increasing the accuracy of predicting sediment yield in watem/sedem model using image fusion algorithm, case study: Darkesh Watershed. *J. Water Soil Resour. Conserv.* 7(1), 99-112 (in Persian).
- Boyce, R.C., 1975. Sediment routing with sediment delivery ratios. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources.* US Dept. Agric. Publ. ARS-S-40, 61-65.
- Cislaghi, A., Bischetti, G.B., 2019. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. *Sci. Total Environ.* 652, 1168-1186.
- Damian, G., Năsu, D., Damian, F., Ciurte, D.L., 2014. Erosion assessment modeling using the SATEEC GIS model on the Prislop catchment. *Present Environ. Sustain. Develop.* 1, 217-224.
- Dercon, G., Mabit, L., Hancock, G., Nguyen, M.L., Dornhofer, P., Bacchi, O.O.S., Benmansour, M., Bernard, C., Froehlich, W., Golosov, V.N., Hacıyakupoglu, S., Hai, P.S., Klik, A., Li, Y., Lobb, D.A., Onda, Y., Popa, N., Rafiq, M., Ritchie, J.C., Schuller, P., Shakhshiro, A., Wallbrink, P., Walling, D.E., Zapata, F., Zhang, X., 2012. Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *Environ. Radioacti.* 107, 78-85.
- Dreibrodt, S., Lubos, C., Terhorst, B., Damm, B., Bork, H.R., 2010. Historical soil erosion by water in Germany: Scales and archives, chronology, research perspectives. *Quarter. Interna.* 222(1-2), 80-95.
- Faraji, J., 2018. Estimating spatial variations of sediment delivery ratio in Khamsan Representative Watershed using WaTEM/SEDEM. MSc Thesis, 68 pages.
- Fernandez, C., Wu, J.Q., McCool D.K., Stockle, C.O., 2003. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE and SEDD. *J. Soil Water Conserv.* 58, 128-136.
- Ferro, V., Minacapilla, M., 1995. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrol. Sci. J.* 40(6), 703-718.
- Ferro, V., Porto, P., 2000. Sediment Delivery Distributed (SEDD) model. *J. Hydrol. Engineer.* 5(4), 633-647.
- Fu, G., Chen, S., McCool, D.K., 2006. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil Till. Res.* 85(1-2), 38-49.
- Gaspar, L., Navas, A., Walling, D.E., Machin, J., Arozamena, J.G., 2013. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena* 102, 46-54.
- Giguët-Covex, C., Arnaud, F., Poulenard, J., Disnar, J.R., Delhon, C., Francus, P., David, F., Enters, D., Rey, P.J., Delannoy, J.J., 2011. Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l., NW French Alps): The role of climate and human activities. *The Holocene* 21(4), 651-665.
- Glymph, L.M., 1954. Study of sediment yields from watersheds. In: *Assemblée Générale de Rome 1954 Tome I, IAHS. Publ. No. 36*, 173-191.
- Gubin, F., Shulin, C., Donald, K.M., 2005. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil Till. Res.* 85(1-2), 36-49.
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C., 1994. *Design hydrology and sedimentology for small catchments.* Academic Press, INC., 588 pages.
- Hadley, R.F., Mizuyama, T., 1993. *Sediment problems: Strategies for monitoring, prediction and control.* Wallingford, Oxfordshire, UK, IAHS Publ. 217, 231-240.
- Hagos, D.B., 2004. A distributed sediment delivery ratio concept for sediment yield modelling. PhD Thesis, 133 pages.
- Hamel, P., Falinski, K., Sharp, R., Auerbach, D.A., Sánchez-Canale, M., Denny-Frank, P.J., 2017. Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions. *Sci. Total Environ.* 580, 1381-1388.
- Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., Mueller, C., 2015. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): case study of the Cape Fear Catchment, North Carolina, USA. *Sci. Total Environ.* 524, 166-177.

- Javadi, M., Rahmati, S., Rangavar, A., 2017. Assessment of efficiency and accuracy of USLE and its versions for estimating event base sediment in the semi-arid rangelands, case study: Sanganeh Soil Conservation Research Institute of Mashhad. *Watershed Manage. Rese. J.* 30(1), 45-53.
- Kaffas, K., Pisinaras, V., Al Sayah, M.J., Santopietro, S., Righetti, M., 2021. A USLE-based model with modified LS-factor combined with sediment delivery module for Alpine basins. *Catena* 207, 105655.
- Karthikeya, M., Kumar, S.S., Reddy, S.B., 2018. Geospatial assessment of soil conservation impacts in musli project. *Int. J. Res.Technol.* 5(2), 83-87.
- Khaledi Darvishan, A., Faraji, J., Gholami, L., Khorsand, M., 2021. Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE. *Watershed Engin, Manage.* 13(3), 534-547 (in Persian).
- Kheirkhah, A., Nazarnezhad, H., 2013. Determination of Sediment Delivery Ratio (SDR) based on area-based models (case study: Gojar Watershed). *Agricul. Edu. Promo. Res. Organiz. Period 1* (in Persian).
- Kinnell, P.I.A., 2006. Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. *Soil Sci. Soci. Ameri. J.* 69(3), 674-680.
- Kinsey-Henderson, A., Prosser, I., Post, D., 2003. SubNet—predicting sources of sediment at sub-catchment scale using SedNet. In: *MODSIM Conference, Townsville*, 590-595.
- Lai, R., Bium, W.H., Valentie, C., Stewart, B.A., 1998. Methods for assessment of soil degradation. *Advance. Soil Sci.* 558 pages.
- Lim, K.J., Sagong, M., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K.S., 2005. GIS-based sediment assessment tool. *Catena* 64, 61-80.
- Lu, H., Moran, C.J., Prosser, I.P., 2006. Modeling sediment delivery ratio over the murray darling basin. *Environ. Modell. Soft.* 21, 1297-1308.
- Lu, H., Moran, C.J., Prosser, I.P., Sivapalan, M., 2004. Modeling sediment delivery ratio based on physical principles. In Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A.E., Jakeman, A.J., (eds) *Complexity and Integrated Resources Management*, vol 3. *Trans. Second Bienn. Meeti. Internat. Environ. Model. Soft. Soci. Manno*, 1117-1122.
- Lu, H., Raupach, M.R., McVicar, T.R., Barrett, D.J., 2003. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. *Remote Sens. Environ.* 86(1), 1-18.
- Maner, S.B., 1958. Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Eos, Trans. Ameri. Geophys. Union* 39(4), 669-675.
- Moore, I.D., Burch, G.J., 1986. Modeling erosion and deposition. *Topographic Effects. Trans. Americ. Soci. Agricul. Enginee.* 29, 1624-1630.
- Mutchler, A., Bowie, J., 1975. *National engineering hand book*, Section 3, Sedimentation.
- Mutua, B., Klik, A., 2004. Development of a physically based model for estimation of spatial sediment delivery ratio for large remote catchments. *J. Spatial Hydrol.* 5(1), 1-15.
- Nasri, M., Najafi, A., 2015. Determining mathematical relationship between sediment delivery ratio and Watershed Factors'. *Nat. Ecosys. Iran* 6(2), 1-12 (in Persian).
- Park, Y.S., Kim, J., Kim, N.W., Kim, S.J., Jeon, J.H., Engel, B.A.E., Jang, W., Lim, K.J., 2010. Development of new R, C and SDR modules for the SATEEC GIS system. *Comput. Geosci.* 36(6), 726-734.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117-1123.
- Porto, P., Walling, D.E., 2012. Validating the use of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex measurements to estimate rates of soil loss from cultivated land in southern Italy. *Environ. Radioacti.* 106, 47-57.
- Rahman, M.R., Shi, Z.H., Chongfa, C., 2009. Soil erosion hazard evaluation-an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecologi, Modell.* 220(13), 1724-1734.
- Ramos-Scharron, C.E., MacDonald, L.H., 2007. Development and application of a GIS-based sediment budget model. *J. Environ. Manage.* 84, 157-172.
- Razali, N.M., Wah, Y.B., 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *J. Statisti. Model. Analyt.* 2, 21-33.
- Renfro, G.W., 1975. User of erosion equation and sediment delivery ratio for predicting sediment yield. In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. *Agricul. Resour. Servic. ARS*, 33-45.
- Renfro, R., Waldo, P., 1983. Validations of sediment delivery ratio prediction techniques. Fort Worth TX: US Soil Conservation Service, Southern Reg. Tech. Ctr., 95 pages.
- Roehl, J.W., 1962. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *Inter. Associa. Sci. Hydrol. Commis. Land Erosion*.

- Sadeghi, H.R., Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., 2008. Comparison of sediment delivery ratio estimation methods in Chehelgazi Watershed of Gheshlagh Dam. *Water Soil*. 22(1), 141-150 (in Persian).
- Sánchez, Y., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., Yenes, M., 2018. Influence of the sediment delivery ratio index on the analysis of silting and break risk in the Plasencia reservoir, central system, Spain. *Nat. Hazard*. 91(3), 1407-1421.
- Sedighi, F., Khaledi Darvishan, A., Zare, M., 2020. Assessment of the slop gradient on the estimated erosion and sediment delivery ratio by using ^{137}Cs in the Khamsan Representative Watershed. *Watershed Manage. Res. J.* 33(3), 2-19 (in Persian).
- Sedighi, F., Khaledi Darvishan, A., Golosov, V., Zare, M.R., Spalevic, V., 2022. Influence of land use on changes of sediment budget components: western Iran case study. *Turkish J. Agricul. Forest*. 46(6), 838-851.
- Sedighi, F., Khaledi Darvishan, A., Zare, M.R., 2021. Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution. *Geomorphol.* 375, 107559.
- Shahoei, S., Abdoulmalki, P., Najmedin, N., Shahoei, S., Tomarian, N., 1992. The relationship between erosion rate and factors during event. 3th Soil Sci. Conference Tehran, 41-56 (in Persian).
- Semgalawe, Z.M., Folmer, H., 2000. Household adoption behaviour of improved soil conservation: the case of the North Pare and West Usambara Mountains of Tanzania. *Land Use Policy* 17, 321-336.
- Tenge, A.J., Okoba, B.O., Sterk, G., 2007. Participatory soil and water conservation planning using a financial analysis tool in the West Usambara highlands of Tanzania. *Land Degrad. Develop.* 18(3), 321-337.
- USDA-SCS., 1979. Sediment sources, yields, and delivery ratios. National Engineering Handbook, Section 3, Sedimentation.
- USDA-SCS., 1981. Soil conservation service engineering handbook, Section 3, Sedimentation.
- Vanoni, V.A., 1975. Sedimentation engineering. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54. American Society of Civil Engineers, New York.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics of define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphol.* 138(1), 74-88.
- Walling, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.* 65(1-3), 209-237.
- Wilkinson, B.H., McElroy, B.J., 2007. The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Geo. Soci. America Bull.* 119(1-2), 140-156.
- Williams, J.R., Brendt, A.D., 1972. Sediment yield computed with the universal equation. *American Soci. Civil Engineer.* 98(HY12), 2087-2098.
- Williams, J.R., Berndt, H.D., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE*, 20(6), 1100-1104.
- Wu, L., Yao, W., Ma, X., 2018. Using the comprehensive governance degree to calibrate a piecewise sediment delivery ratio algorithm for dynamic sediment predictions: a case study in an ecological restoration watershed of northwest China. *J. Hydrol.* 564, 888-899.