

## Soil erosion estimation in a part of the Gheshlagh dam watershed using the Thornes model

Rawa Abdulqadir Mohammed<sup>1</sup>, Naser Khaleghpanah<sup>\*2</sup>, Masoud Davari<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: rawa.abdulqadir@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: n.khaleghpanah@uok.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.davari@uok.ac.ir

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 01.06.2023

Revised: 03.02.2024

Accepted: 02.19.2024

#### Keywords:

Geographic information system,  
Hybrid models,  
Remote sensing,  
Sediment delivery ratio

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Determining the amount of soil erosion and its spatial distribution can effectively provide appropriate management practices to reduce erosion problems. Direct measurement of soil erosion takes a lot of time and money, and the results are often regional and limited. This issue has led to the development of various models for estimating soil erosion and sediment production. Since most of the watersheds in Iran need more accurate information, models that require relatively few inputs make more sense than models with high inputs. Along with empirical and process-based models, a number of erosion estimation models are known as hybrid models. One of the hybrid models is the Thornes model, which requires relatively little input data, and there has been no research related to this model in Iran. Therefore, this study was conducted to determine spatial variation of the soil erosion rate and sediment yield in a part of the Sanandaj Gheshlagh Dam watershed using the Thornes model utilizing GIS and remote sensing (RS).

**Materials and Methods:** Two hundred soil samples were collected using a stratified random sampling method and the parameters of soil texture, particle size distribution, organic carbon, and soil CaCO<sub>3</sub> equivalent in the laboratory were measured by conventional methods. In order to determine the input parameters of the studied model, laboratory results, Landsat 8 satellite images over six years, and some monthly meteorological data, including precipitation, precipitation days number and potential evapotranspiration, were analyzed. Finally, using ArcMap, Saga GIS, and ENVI software, the required parameters and maps of the models were prepared, and the studied models were run. Sediment delivery ratios (SDRs) are assumed to be a function of the travel time of surface runoff from catchment cells to the nearest downstream channel.

**Results:** The results showed that the estimated average erosion of the Thornes model was 0.76 mm per year or 10.24 tons per hectare per year (assuming a bulk density of 1.4 gr/cm<sup>3</sup>), and according to the calculated SDR, the estimated sediment was calculated by the model as 4.34 tons per hectare per year. The results of the Thornes model showed that the sensitivity of this model to some parameters, including potential evapotranspiration and potential water storage capacity, was very high. Small changes in these parameters caused a significant difference in the results, which would reduce the efficiency of the model.

---

**Conclusion:** According to the field observations and the investigation of erosion and sedimentation situations in the studied watershed, as well as long-term information about sediment discharged from the hydrometric station (3.10 tons per hectare per year), it seems that the Thornes model has been a relatively reasonable estimate of erosion in many parts of the studied watershed. However, the type of model used to estimate the sediment delivery ratio and then the sediment yield can have a significant effect on the model's efficiency. Considering that this model requires relatively few data, it may be possible to use it to predict erosion in watersheds with no information or with poor information.

---

Cite this article: Abdulqadir Mohammed, Rawa, Khaleghpanah, Naser, Davari, Masoud. 2024. Soil erosion estimation in a part of the Gheshlagh dam watershed using the Thornes model. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14 (1), 51-71.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20910.2087

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---



## تخمین فرسایش خاک بخشی از حوضه آبخیز سد قشلاق با استفاده از مدل Thornes

ره‌وا عبدالقادر محمد<sup>۱</sup>، ناصر خالقی پناه<sup>۲\*</sup>، مسعود داوری<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: [rawa.abdulqadir@gmail.com](mailto:rawa.abdulqadir@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: [n.khaleghpanah@uok.ac.ir](mailto:n.khaleghpanah@uok.ac.ir)
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: [m.davari@uok.ac.ir](mailto:m.davari@uok.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله:</p> <p>مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰</p> <p>واژه‌های کلیدی:</p> <p>سامانه اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور، مدل‌های ترکیبی (هیبرید)، نسبت تحویل رسوب</p>	<p><b>سابقه و هدف:</b> تعیین مقدار فرسایش خاک و هم‌چنین توزیع مکانی آن، می‌تواند اعمال مدیریت مناسب جهت کاهش مسائل و مشکلات ناشی از فرسایش را به‌طور مؤثری مهیا سازد. تعیین مستقیم فرسایش خاک مستلزم وقت و هزینه زیادی بوده و نتایج حاصل از آن نیز اغلب منطقه‌ای و محدود می‌باشد. این موضوع سبب گردیده که مدل‌های مختلفی جهت برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب ارائه شود. به‌دلیل محدودبودن و کم‌بودن اطلاعات اکثر حوضه‌های آبخیز کشور، استفاده از مدل‌هایی که نیاز به ورودی‌های نسبتاً کمی دارند نسبت به مدل‌های با ورودی‌های زیاد، منطقی به نظر می‌رسد. در کنار مدل‌های تجربی و فرایندی، تعدادی از مدل‌های تخمین فرسایش باعنوان مدل‌های ترکیبی (هیبرید) شناخته شده‌اند. یکی از مدل‌های ترکیبی، مدل Thornes بوده که نیاز به داده‌های ورودی نسبتاً کمی داشته و در ارتباط با این مدل پژوهشی در ایران صورت نگرفته‌است. از این‌رو، این پژوهش با هدف پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و بار رسوب در بخشی از حوضه آبخیز سد قشلاق سنندج با استفاده از مدل Thornes به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) انجام شد.</p> <p><b>مواد و روش‌ها:</b> با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده، ۲۰۰ نمونه خاک، جمع‌آوری شده و پارامترهای بافت خاک، توزیع اندازه ذرات، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک در آزمایشگاه با روش‌های معمول اندازه‌گیری گردید. جهت تعیین پارامترهای ورودی مدل مورد بررسی از نتایج آزمایشگاهی، تصاویر ماهواره لندست ۸ در طول یک دوره ۶ ساله و برخی داده‌های هواشناسی شامل بارندگی منطقه، تبخیر و تعرق پتانسیل و فرکانس بارندگی</p>

---

استفاد شد. در نهایت به کمک نرم‌افزارهای ArcMap، Saga GIS و ENVI پارامترها و نقشه‌های مورد نیاز مدل تهیه گردیدند. نسبت تحویل رسوب (SDR) حوضه نیز با فرض این‌که نسبت تحویل رسوب (SDR)، تابعی از زمان حرکت رواناب سطحی از سلول‌های حوضه به نزدیک‌ترین کانال پایین دست است برآورد گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد میانگین سالیانه فرسایش برآوردی مدل Thornes، ۰/۷۶ میلی‌متر در سال یا ۱۰/۲۴ تن در هکتار در سال (با فرض جرم ویژه ظاهری ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بوده و باتوجه به SDR محاسبه‌ای برای کل حوضه، میزان رسوب برآوردی توسط مدل، ۴/۳۴ تن در هکتار در سال محاسبه گردید. نتایج مدل Thornes نشان داد که حساسیت این مدل به برخی پارامترها از جمله، تبخیر و تعرق پتانسیل و ظرفیت نگهداری آب بالقوه بسیار زیاد بوده و تغییرات کوچکی در این پارامترها سبب تغییر زیادی در نتایج شده که خود سبب کاهش کارایی مدل خواهد شد.

**نتیجه‌گیری:** باتوجه به مطالعات عرصه‌ای و مشاهده وضعیت فرسایش و رسوب و همچنین بر طبق آمار بلندمدت رسوب خارج‌شده از حوضه (۳/۱ تن در هکتار در سال)، به نظر می‌رسد مدل Thornes برآورد نسبتاً قابل‌قبولی از وضعیت فرسایش در بخش‌های زیادی از حوضه مورد مطالعه داشته است. هرچند نوع مدل انتخابی جهت تخمین نسبت تحویل رسوب و نهایتاً بار رسوب می‌تواند در تعیین کارایی مدل تأثیرگذار باشد. باتوجه به این‌که این مدل به داده‌های نسبتاً کمی نیاز داشته، ممکن است بتوان از آن برای پیش‌بینی فرسایش در حوضه‌های فاقد اطلاعات یا با اطلاعات ضعیف استفاده کرد.

---

استناد: عبدالقادر محمد، ره‌وا، خالق‌پناه، ناصر، داوری، مسعود (۱۴۰۳). تخمین فرسایش خاک بخشی از حوضه آبخیز سد قشلاق با استفاده از مدل Thornes. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۴ (۱)، ۷۱-۵۱.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20910.2087



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

در طول قرن گذشته به موازات افزایش تصاعدی جمعیت و توسعه روزافزون نیازهای بشر، فشار مضاعفی بر منابع محدود آب و خاک موجود در روی کره زمین وارد شده است. به طوری که امروزه از دست رفتن منابع خاک و آب به یک مشکل فراگیر تبدیل شده و تبعات منفی ناشی از آن بر قابلیت تولید زیست‌بوم‌های طبیعی مانند اراضی کشاورزی، جنگل‌ها و مراتع به وضوح قابل مشاهده است. در این بین، فرسایش خاک به عنوان مهم‌ترین عامل از بین رفتن منابع آب و خاک، تولید محصولات کشاورزی را به خطر انداخته و سبب افزایش خطر سیل و تغییرات اقلیمی می‌شود. سالانه ۷۵ میلیارد تن خاک از زمین‌های قابل کشت در سراسر جهان فرسایش می‌یابد و هزینه از دست رفتن این مقدار خاک در حدود ۴۰۰ میلیارد دلار در سال یا بیش از ۷۰ دلار به‌ازای هر نفر در سال است (۱). در حال حاضر، حدود ۳۶ درصد از کل زمین‌ها و ۶۰ درصد از خاک‌های کشاورزی در ایران در معرض فرسایش است، به گونه‌ای که میزان فرسایش خاک در ایران بیش‌تر از سایر نقاط جهان برآورد شده است (۲). اگر مقدار و توزیع مکانی فرسایش خاک مشخص شود، اعمال مدیریت مناسب جهت کاهش مسائل و مشکلات ناشی از فرسایش می‌تواند به‌طور مؤثری انجام پذیرد (۳). ارزیابی و پایش فرآیندهای فرسایش و فاکتورهای مؤثر بر این فرآیندها معمولاً به‌دوروش انجام می‌گیرد که در روش اول، فرسایش خاک به‌طور مستقیم با استفاده از روش‌های صحرایی یا آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، ولی در روش دوم با بهره‌گیری از مدل‌های مختلف برآورد فرسایش خاک، خطر فرسایش در منطقه موردنظر به‌طور غیرمستقیم ارزیابی می‌گردد (۴). به‌طورکلی مشکل روش‌های اندازه‌گیری فرسایش در حوضه‌های آبخیز، نیاز به اطلاعات زیاد بوده و با توجه به این‌که تعیین مستقیم

فرسایش، مستلزم وقت و هزینه زیاد بوده و نتایج حاصل از آن اغلب منطقه‌ای و محدود می‌باشد، از مدل‌های فرسایش استفاده می‌گردد. مناسب‌ترین مدل، به کاربرد موردنظر و ویژگی‌های حوضه آبخیزی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، بستگی دارد (۵). عوامل دیگری که در انتخاب یک مدل مؤثر هستند شامل: ۱- داده‌های مورد نیاز مدل، ۲- دقت و اعتبار مدل، ۳- اجزاء مدل، ۴- اهداف کاربرد مدل و ۵- نیازمندی‌های سخت‌افزاری مدل، می‌باشند (۵). مدل‌ها به‌طورکلی به سه دسته فیزیکی، آنالوگ و عددی (ریاضی) تقسیم می‌شوند. مدل‌های عددی (ریاضی) خود به سه دسته تجربی، احتمالاتی و فرآیندی (با مبنای نظری) تقسیم می‌شوند. مدل‌های تجربی شبیه‌سازی فرآیندهای طبیعی بوده که بیش‌تر براساس مشاهدات آماری انجام می‌شوند و به روابط رگرسیونی توسعه‌یافته متکی هستند. فرآیندهای محاسباتی مدل‌های تجربی ساده بوده و اطلاعات مورد نیاز آن‌ها کم‌تر از مدل‌های مفهومی و بر پایه و اساس فیزیکی است. مشکل استفاده از مدل‌های تجربی، عدم توانایی استفاده دقیق این مدل‌ها در منطقه جغرافیایی خارج از محل اولیه استفاده شده این روابط می‌باشد (۶). مدل‌های فرآیندی مثل EUROSEM و WEPP براساس معادلات ریاضی جهت توضیح فرآیندهای مورد استفاده در مدل با به‌کاربردن قوانین بقای جرم و انرژی استوار هستند. یکی از مهم‌ترین معایب این مدل‌ها نیاز به داده‌های زیاد است، به طوری که در یک حوضه، اغلب چنین اطلاعاتی وجود نداشته و مدل‌های فرآیندی نیاز به مشاهدات زیادی جهت واسنجی و اعتبارسنجی اجزای رواناب و فرسایش دارند.

در کنار مدل‌های تجربی و فرآیندی، تعدادی از مدل‌های تخمین فرسایش و رسوب با عنوان مدل‌های ترکیبی (هیبرید) شناخته شده‌اند. واژه هیبرید بسته به محل کاربرد، می‌تواند معانی مختلفی داشته باشد،

از جمله: مخلوط، دو رگه، گیاه پیوندی، جانور دورگه و پیوندی. در مدل‌سازی فرسایش خاک هم، واژه هیبرید می‌تواند در جاهای مختلف استفاده شود، مثلاً هالقوم و همکاران (۲۰۲۱) ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک منطق فازی را با عنوان مدل هیبرید تخمین فرسایش خاک بیان نموده‌اند (۷).

حاجی‌قلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) مدل‌های هیبرید را ترکیبی از تکنیک‌های پویا و تجربی ارزیابی فرسایش خاک می‌دانند. مدل‌های ترکیبی یا هیبرید، در واقع ترکیبی از تکنیک‌های دینامیک و تجربی ارزیابی فرسایش خاک هستند که ساختار مرکزی این مدل‌ها معمولاً فیزیکی یا مفهومی است، در حالی که پیکربندی مدل در مقیاس‌های مکانی و زمانی براساس مشاهدات آماری بوده و به روابط رگرسیون توسعه‌یافته متکی است. مدل‌های ترکیبی که به عنوان سیستم‌های مدل‌سازی فرسایش خاک و رسوب توسعه پیدا کرده‌اند می‌توانند برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری به فرسایش آبی، کاهش باروری خاک در دامنه‌ها، حوضه‌های آبخیز و مزارع استفاده شوند و هم‌چنین می‌توانند استراتژی‌های مدیریت بهینه برای عملیات حفاظتی (از خاک و آب) را ارزیابی کنند (۶).

از مدل‌های مفهومی - تجربی (هیبرید) که نیاز به داده‌های ورودی زیادی ندارد می‌توان به مدل Thornes اشاره کرد (۸ و ۹). از آن‌جاکه مدل‌های فرسایش باید انرژی (جریان سطحی و شیب زمین)، مقاومت (فرسایش‌پذیری خاک) و حفاظت (پوشش گیاهی) را به صورت فیزیکی و ساده با هم لحاظ نمایند، Thornes پس از بررسی رقابت بین رشد پوشش گیاهی و قابلیت فرسایش خاک، مدلی مفهومی از ترکیب حمل و نقل رسوب و پوشش خاک ارائه داد. این مدل شامل اجزای هیدرولوژیکی بر اساس مقایسه نوع ذخیره‌سازی رواناب، مؤلفه‌های جابجایی رسوب و رشد گیاه می‌باشد. مدل فرسایش Thornes نیاز به برآورد میزان تولید رواناب سطحی و زیر مدل

هیدرولوژیکی دارد. این مدل مبتنی بر سلول‌های مربعی شکل بوده و با این فرض شروع می‌شود که بارندگی روزانه را می‌توان با توزیع فراوانی نمایی در یک دوره زمانی مشخص تقریب زد و ظرفیت ذخیره آب خاک تحت تأثیر رطوبت اولیه خاک قرار می‌گیرد. از مزایای این مدل، نشان دادن میزان ارتباط بین پوشش گیاهی و فرسایش می‌باشد. این روش مدل‌سازی، در مقیاس‌های مختلف هیدرولوژیکی در چندین منطقه جغرافیایی استفاده شده است (۸ و ۹). ژانگ و همکاران (۲۰۰۲) از این مدل برای پیش‌بینی نرخ فرسایش جهانی استفاده کردند (۱۰).

ساودرا و مانائیرتز (۲۰۰۵) به بررسی تخمین فرسایش در یک حوضه آبخیز کوهستانی نیمه خشک با ترکیب تصاویر ماهواره‌ای با وضوح زیاد و کم پرداختند و بدین‌منظور از پنج مدل فرسایشی که نیاز به داده‌های ورودی کمی داشته (Thrones, USPED, RUSLE, SPL و MMMF) استفاده کردند. اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که هیچ یک از پنج مدل به‌طور دقیق فرسایش خاک در حوضه آبخیز را پیش‌بینی نکرده و بنابراین نتیجه گرفتند که اگرچه الگوهای مکانی فرسایش پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف، قابل اعتماد به نظر می‌رسند، اما پیش‌بینی‌ها باید با کمی احتیاط تفسیر شوند. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد از نظر توزیع مکانی، مدل MMMF برای شناسایی منابع رسوب در مقیاس حوضه آبخیز مناسب‌تر است و به دلیل داده‌های ورودی کم‌تر، پیش‌بینی‌های مدل‌های RUSLE و Thornes در جایی که اطلاعات دقیق حوضه به راحتی در دسترس نباشد، به اندازه کافی قابل اعتماد می‌باشند (۱۱).

سیمئوناکیس و همکاران (۲۰۰۷) نرخ فرسایش را با استفاده از مدل Thornes برای دو حوضه کوچک (۳۰۲ کیلومتر مربع) در اسپانیا پیش‌بینی کردند. ساختار مدل Thornes به‌گونه‌ای است که برای

در حوضه آبخیز سد قشلاق موجب کاهش کیفیت آب، از دست رفتن خاک حاصلخیز و کم شدن ظرفیت مخزن سد در اثر رسوب‌گذاری مواد فرسایش یافته می‌شود؛ نیاز به جمع‌آوری اطلاعات در زمینه فرسایش خاک در این منطقه بیش از پیش احساس می‌شود و استفاده از مدل‌ها به دلیل کاهش هزینه و زمان، می‌تواند کمک به‌سزایی به مدیران و تصمیم‌گیران نماید. از این‌رو، این پژوهش با هدف مدل‌سازی میزان فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل هیبرید Thornes (که نیاز به ورودی‌های نسبتاً کمی دارد) به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) در بخشی از حوضه آبخیز سد قشلاق سنندج انجام گردید تا مناطقی که تحت تأثیر فرسایش خاک و رسوب‌گذاری هستند؛ شناسایی شده و بتوان برای اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک در این منطقه اقدام نمود.

### مواد و روش‌ها

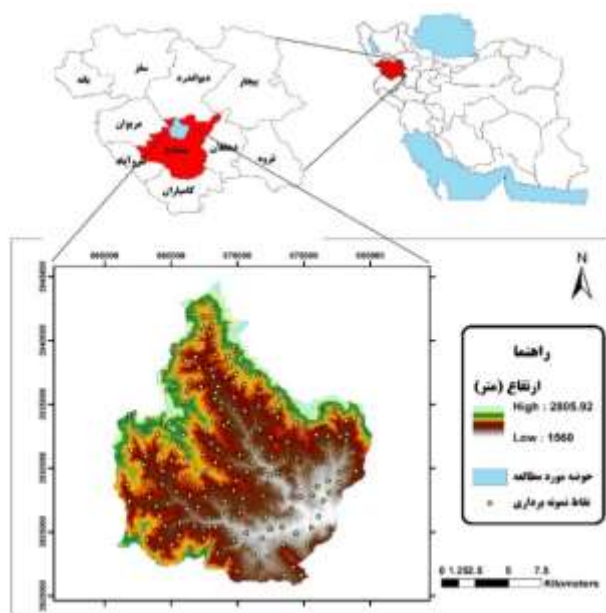
موقعیت و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه: جهت انجام این پژوهش، بخشی از حوضه سد قشلاق در شهرستان سنندج که دارای ایستگاه هیدرومتری می‌باشد، انتخاب گردید. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی در حداثی  $35^{\circ} 24' 49''$  تا  $35^{\circ} 01' 38''$  عرض طول شرقی و  $49^{\circ} 45' 10''$  تا  $46^{\circ} 09' 56''$  شمالی قرار گرفته، مساحت تقریبی آن برابر با  $27021$  هکتار بوده و محیط حوضه برابر با  $862$  کیلومتر می‌باشد. حداقل ارتفاع حوزه  $1560$  متر و حداکثر ارتفاع آن  $2806$  متر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه را در کشور و استان نشان می‌دهد. قسمت اعظم حوضه، مرتع بوده و یا تحت کشت دیم می‌باشد. بقیه کاربری‌ها مشتمل بر باغ، زراعت آبی توأم با باغ، زراعت آبی و غیره می‌باشد.

پیش‌بینی نرخ فرسایش احتمالی در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه مناسب است (۱۲). علی و دی‌بوئر (۲۰۱۰) به مدل‌سازی توزیع مکانی فرسایش و رسوب در حوضه رودخانه سند پرداختند. در این پژوهش نرخ فرسایش بالقوه با استفاده از مدل Thornes در ترکیب با یک مدل رواناب سطحی محاسبه گردید و با فرض این‌که نسبت تحویل رسوب (SDR)، تابعی از زمان حرکت رواناب سطحی از سلول‌های حوضه به نزدیک‌ترین کانال پایین‌دست است، مقادیر بار رسوب نیز محاسبه گردید. ارزیابی مدل براساس آماره‌های دقت و صحت، عملکرد بسیار خوب تا رضایت‌بخش مدل را در پیش‌بینی بار رسوب نشان داد. از آنجایی‌که چارچوب مدل‌سازی ارائه شده در این پژوهش به داده‌های نسبتاً کمی نیاز داشته و همه آن‌ها را می‌توان از مجموعه داده‌های جهانی استخراج کرد؛ بنابراین، این پژوهش‌گران بیان نمودند که می‌توان از آن برای پیش‌بینی فرسایش و بار رسوب در حوضه‌های فاقد اطلاعات یا حوضه‌های با اطلاعات ضعیف استفاده کرد (۱۳). در ارتباط با مدل Thornes، در ایران پژوهشی صورت نگرفته است.

با توجه به مسائلی که ذکر شد، پیش‌بینی مقادیر فرسایش خاک و رسوب، امری ضروری جهت اجرا و توسعه روش‌های حفاظت خاک به منظور مدیریت پایدار اراضی و منابع آب می‌باشد. به دلیل محدود بودن و کم بودن اطلاعات اکثر حوضه‌های آبخیز کشور، استفاده از مدل‌هایی که نیاز به ورودی‌های نسبتاً کمی دارند نسبت به مدل‌های با ورودی‌های زیاد، منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی به دلیل مزایای بسیار زیاد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور و امکان تلفیق با برخی مدل‌های فرسایش و برآورد سریع‌تر برخی از پارامترها به وسیله آن‌ها و هم‌چنین سازماندهی، مدیریت و تحلیل بهتر داده‌ها نیاز به استفاده از RS و GIS در برآورد فرسایش خاک ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که فرسایش خاک

و ۶۰ ثانیه، ۳، ۱۰ و ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۶، ۸ و ۲۴ ساعت). جهت تعیین توزیع اندازه ذرات شن، پس از قرائت کامل ۲۴ ساعته با هیدرومتر، محتویات هر استوانه محتوی سوسپانسیون خاک از الک ۵۰ میکرون عبور داده شد. محتویات بالای الک پس از شستشوی کامل همان ذرات شن بوده، که به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک گردید. پس از خشک شدن، توزین گردیده و با استفاده از سری الک و دستگاه شیکر الک، ذرات شن با قطرهای مختلف جدا گردیده و در نهایت توزیع اندازه ذرات با استفاده از این قرائت‌ها و با کمک فرمول‌های مربوطه تعیین شد. سپس درصد شن، سیلت و رس تعیین و در نهایت بافت خاک با استفاده از مثلث بافت خاک تعیین گردید (۱۴). اندازه‌گیری کربن آلی خاک (O.C.) به روش والکلی بلک صورت گرفت (۱۵) و مقدار آهک خاک (کربنات کلسیم معادل) براساس مقدار مواد خنثی شونده به روش حجمی، از روی واکنش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و سپس تیتراسیون با سود به دست آمد (۱۵).

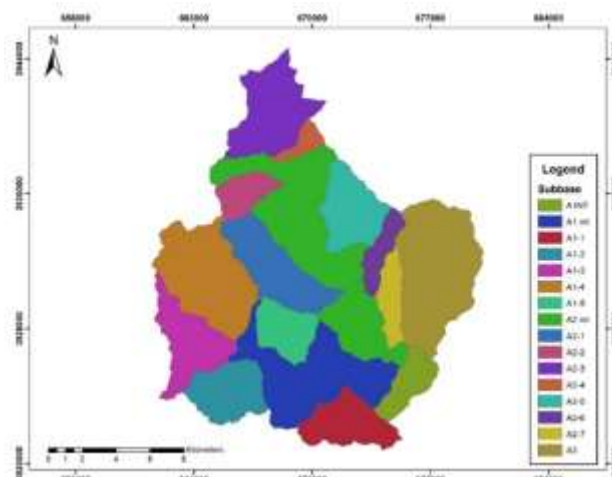
نمونه‌برداری، آماده سازی و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها: با استفاده از منابع، اطلاعات و نقشه‌های موجود یا تهیه شده از حوضه از جمله نقشه‌های کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، واحدهای هیدرولوژیک خاک و نقشه زمین‌شناسی، واحدهای همگن در حوضه مشخص شده و در این واحدها به صورت تصادفی نقاطی جهت نمونه‌برداری خاک مشخص گردیده و ۲۰۰ نمونه خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری در مناطق مرتعی و از مابقی کاربری‌ها که دست‌خوش فعالیت‌های انسانی بودند (باغ، زراعت آبی توام با باغ، زراعت آبی و...) از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری در نقاط مذکور جمع‌آوری گردید. سپس تمامی نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردیده و مراحل هوا خشک کردن، کوبیدن و سپس عبور از الک ۲ میلی‌متری جهت انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. برای تعیین توزیع اندازه ذرات و بافت خاک از روش هیدرومتری استفاده گردید. قرائت غلظت در ۹ نقطه برای تعیین دقیق درصد رس، سیلت و شن صورت گرفت (قرائت غلظت در زمان‌های ۳۰



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری.

Figure 1. The location of the studied watershed and sampling points.





شکل ۲- نقشه زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Map of the sub watersheds of the studied area.

منطقه استفاده شده و در نرم‌افزار ArcMap برحسب متر در متر تعیین گردید. فاکتور پوشش گیاهی به کمک تصاویر ماهواره لندست ۸ و محاسبه شاخص NDVI و با استفاده از رابطه زیر تخمین زده شد (۱۳):

$$C_i = 8.79815 + 93.07466 NDVI$$

که در آن،  $C_i$  درصد پوشش گیاهی یک سلول برای دوره زمانی  $i$  است. از آنجا که محاسبات این مدل براساس ماهیانه می‌باشد، تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه در هر ماه در طول یک دوره ۶ ساله استخراج و پس از انجام تصحیحات رادیومتریک، اتمسفری و هندسی، فاکتور  $C$  برای هر ماه محاسبه گردید. ضریب فرسایش‌پذیری خاک ( $K$ ) در نقاط نمونه‌برداری شده با استفاده از نتایج تجزیه نمونه‌های خاک (بافت و ماده آلی) و با استفاده از جدولی که برای مدل Thornes در نظر گرفته شده، تعیین گردید، سپس به کمک تکنیک‌های زمین‌آمار، نقشه فرسایش‌پذیری برای کل حوضه تهیه گردید. جهت تعیین اجزای معادله رواناب سطحی، از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مجاور منطقه مورد مطالعه

تعیین پارامترها و اجرای مدل Thornes: این مدل مبتنی بر سلول‌های مربعی شکل بوده و از مزایای این مدل نشان‌دادن میزان ارتباط بین پوشش گیاهی و فرسایش می‌باشد. معادله این مدل برای هر سلول در هر ماه به صورت زیر است:

$$E_i = kRO_i^2 s^{1.67} e^{-0.07ci}$$

در این رابطه، پارامتر  $E_i$  بیانگر نرخ فرسایش (میلی‌متر در ماه)، پارامتر  $k$  ضریب فرسایش‌پذیری خاک،  $RO_i$  رواناب سطحی (میلی‌متر)، پارامتر  $s$  بیانگر شیب (متر در متر) و پارامتر  $C_i$  فاکتور پوشش گیاهی (درصد) است. پارامتر رواناب سطحی از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RO_i = P_i e^{-(rc-S_i)/(P_i-D_i)}$$

که در آن،  $P_i$  بارندگی کل (میلی‌متر)،  $rc$  ظرفیت نگهداری آب بالقوه<sup>۱</sup> (میلی‌متر)،  $S_i$  رطوبت کل اولیه خاک (میلی‌متر)،  $D_i$  تعداد روزهای بارندگی و  $i$  دوره زمانی است (از ۱ تا ۱۲ برای ماه‌های مختلف) (۸ و ۹). در این مدل جهت تعیین پارامتر  $S$  از DEM

1- Potential water storage capacity

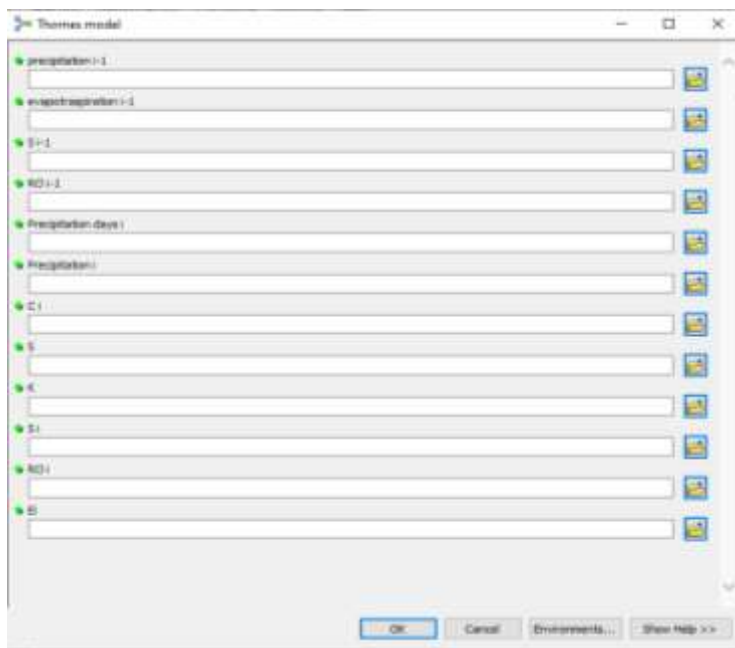
ظرفیت نگهداری آب بالقوه در خاک به کل مقدار آبی اطلاق می‌شود که یک نوع خاک معین می‌تواند در صورت اشباع کامل آن در خود نگه دارد. این پارامتر شامل آبی است که در منافذ خاک و روی سطح ذرات خاک نگهداری می‌شود.

در نهایت باتوجه به پارامترهای به‌دست آمده، مقدار فرسایش در هر ماه برحسب میلی‌متر در ماه با استفاده از نرم‌افزار ArcMap محاسبه و نهایتاً با جمع‌نمودن مقادیر فرسایش ماهیانه، فرسایش سالیانه حوضه برحسب میلی‌متر در سال تعیین گردید. با فرض جرم مخصوص ظاهری ۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب، فرسایش سالیانه حوضه برحسب تن در هکتار در سال (فرسایش ویژه) محاسبه گردید. جهت صرفه‌جویی در زمان، هم‌چنین بالا بردن دقت محاسبات و حذف خطای احتمالی، مدلی در نرم‌افزار ArcMap جهت اجرای مدل Thornes در ماه‌های مختلف، طراحی گردید و تعدادی از خروجی‌های این مدل در هر ماه برای ماه بعدی استفاده گردید (شکل ۳).

شامل بارندگی منطقه، تبخیر و تعرق پتانسیل و فرکانس بارندگی استفاده شد (۱۳) و با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcMap نقشه‌های بارندگی ماهیانه، تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه و تعداد روزهای بارندگی در یک دوره ۲۰ ساله برای حوضه مورد مطالعه تهیه گردید. جهت تعیین رطوبت کل اولیه خاک ( $S_i$ ) نیز از رابطه زیر استفاده گردید:

$$S_i = S_{i-1} + P_{i-1} - ET_{i-1} - RO_{i-1}$$

که در آن،  $S_{i-1}$  کل رطوبت اولیه خاک برای سلول در ماه قبل (میلی‌متر)،  $P_{i-1}$  کل بارندگی (میلی‌متر) در ماه قبل،  $ET_{i-1}$  تبخیر و تعرق پتانسیل ماه قبل (میلی‌متر) و  $RO_{i-1}$  رواناب سطحی ماه قبل (میلی‌متر) است. جهت محاسبه دقیق‌تر (تاحدودی) ظرفیت نگهداری آب بالقوه، از نقشه عمق خاک اخذشده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان، درصد رس، سیلت و شن و نرم‌افزار RETC استفاده شد و برای بخش‌های مختلف حوضه مقادیر مختلفی به‌دست آمد.



شکل ۳- مدل طراحی شده در نرم‌افزار ArcMap جهت اجرای مدل Thornes در ماه‌های مختلف.

Figure 3. The model designed in ArcMap software to implement the Thornes model in different months.

(۲۵ سال) استخراج گردیده و نهایتاً میانگین بار معلق سالانه خارج شده از حوضه محاسبه و با احتساب ۲۰ درصد بار بستر، میانگین رسوب کل خارج شده از حوضه تعیین گردید.

### نتایج و بحث

در جدول ۱ برخی خصوصیات آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های گرفته شده از خاک سطحی نشان داده شده است. باتوجه به این جدول، نمونه‌های خاک دارای کربن آلی حداقل ۰/۰۲ و حداکثر ۳/۳۱ با میانگین ۱/۳۲ درصد و انحراف معیار ۰/۶ بود.

با توجه به جدول ۱ درصد شن نمونه‌ها در دامنه ۸/۵۰ تا ۷۸/۵۶ با میانگین ۴۰/۱۹ و انحراف معیار ۱۶/۵۷ بود. میزان سیلت نمونه‌ها مابین ۱۲/۲۲ تا ۸۸/۲۲ درصد با میانگین ۵۳/۶۵ و انحراف معیار ۱۷/۴۸ بود. به سبب فرسایش پذیری بالای ذرات سیلت و شن خیلی ریز، به نظر می‌رسد قسمت اعظم خاک‌های مورد مطالعه فقط با در نظر گرفتن میزان سیلت و شن خیلی ریز، فرسایش پذیری بالایی داشته باشند. نمونه خاک‌های مورد مطالعه از نظر کلاس بافتی دارای تنوع نسبتاً زیادی بوده و عمدتاً در ۴ کلاس بافتی شامل لوم شنی، لوم سیلتی، سیلتی و لومی قرار داشتند. وضعیت توپوگرافی منطقه یکی از عوامل کلیدی و بسیار مؤثر در میزان فرسایش خاک می‌باشد. نقشه شیب منطقه نشان‌دهنده شیب بسیار متغیر حوضه مورد مطالعه بوده که از شیب صفر درصد (صفر درجه) تا ۲۵۰/۱۳ درصد (۶۸/۲۱ درجه) نوسان داشته و میانگین شیب ۳۰/۸۲ درصد (۱۶/۷۸ درجه) بود.

محاسبه نسبت تحویل رسوب: پس از محاسبه مقدار فرسایش ماهیانه برای هر سلول، بار رسوب برای هر سلول (SYi) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$SYi = SDR \times Ei$$

که در آن، SDR نسبت تحویل رسوب می‌باشد. جهت محاسبه SDR از یکی از مدل‌های محاسبه این پارامتر استفاده شده و با فرض این‌که SDR، تابعی از زمان حرکت رواناب سطحی از سلول‌های حوضه به نزدیک‌ترین کانال پایین دست است، محاسبه گردید (۱۶):

$$SDR = \exp(-\beta t)$$

که در آن، t زمان پیمایش رواناب سطحی از سلول‌های حوضه به نزدیک‌ترین آبراهه است (ساعت) و B یک پارامتر وابسته به حوضه بوده و برای یک حوضه آبخیز ثابت در نظر گرفته می‌شود. معادله بالا می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$SDR = \exp \left[ -\beta \sum_{p=1}^m \frac{lp}{\sqrt{Sp}} \right]$$

که در آن، lp و Sp به ترتیب طول مسیر جریان و شیب مسیر جریان می‌باشد. این دو پارامتر در نرم افزار ArcMap محاسبه گردیده و نهایتاً نسبت تحویل رسوب برای تمامی سلول‌های حوضه و بار رسوب برای کل حوضه از مجموع بار رسوب تمامی سلول‌های حوضه به دست آمد. با توجه به مجهز بودن خروجی حوضه به ایستگاه رسوب سنجی و هیدرومتری، جهت ارزیابی کارایی مدل، از مقادیر واقعی رسوب خروجی از حوضه استفاده گردید. به کمک رسوب خروجی از حوضه و دبی متناظر آن، منحنی سنج رسوب در طول دوره آماری مورد مطالعه

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of the studied soils.

انحراف معیار SD	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Mean	ویژگی‌ها Characteristics
16.57	78.56	8.50	40.19	شن (%) Sand (%)
17.48	88.22	12.22	53.65	سیلت (%) Silt (%)
5.45	35.51	0.013	6.15	رس (%) Clay (%)
3.16	31.61	0.01	8.07	شن خیلی ریز (%) Very fine sand (%)
0.60	3.31	0.02	1.32	کربن آلی (%) OC (%)
6.86	31.55	0.51	6.13	کربنات کلسیم معادل (%) CCE (%)

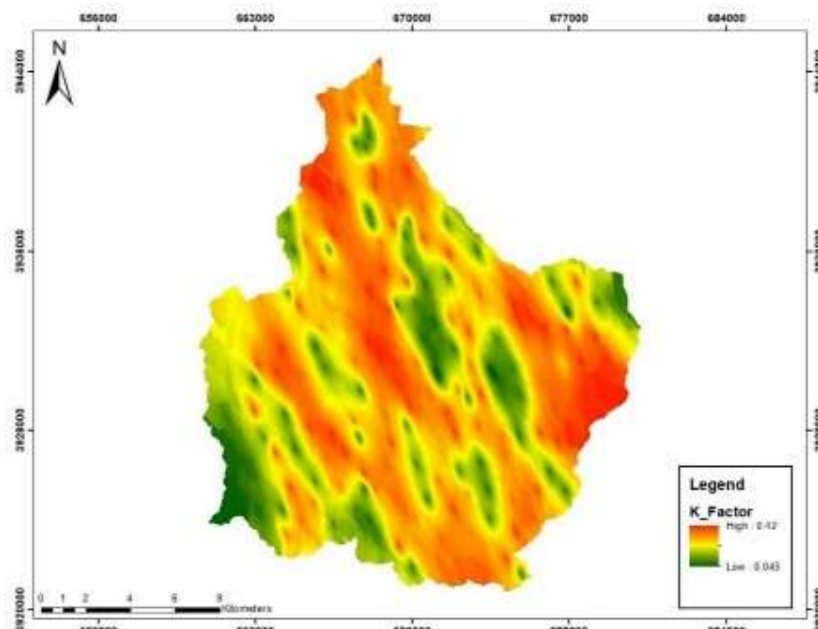
به طوری که قسمت‌های شمال شرقی حوضه، بارندگی کم‌تر و قسمت‌های جنوب غربی حوضه بارندگی بیش‌تری داشته‌اند. در ماه اکتبر مقدار بارندگی و تا حدودی الگوی بارندگی نسبت به ماه آوریل متفاوت بوده و با میانگین ۳۶/۹۱ در دامنه ۳۱/۵۹ تا ۴۲/۴۹ میلی‌متر در ماه نوسان داشت. طبق نقشه‌های پارامتر C و جدول ۱ مقادیر پارامتر پوشش گیاهی (C) بر حسب درصد) در ماه آوریل با میانگین ۳۵/۵۹ از صفر تا ۸۵/۰۷ درصد نوسان داشته و در ماه اکتبر با میانگین ۲۳/۷۳ از ۶/۲۳ تا ۸۰/۴۹ درصد در کل حوضه تغییرات داشته است. نتایج نشان داد، مقادیر پارامتر تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در ماه) در ماه آوریل با میانگین ۱۰۵/۵۳ از ۱۰۳/۵۵ تا ۱۰۸/۲۷ میلی‌متر در ماه نوسان داشته و در ماه اکتبر با میانگین ۹۱/۵۴ از ۸۹/۴۴ تا ۹۴/۲۳ میلی‌متر در ماه در کل حوضه تغییرات داشت.

**مدل Thornes:** میانگین برخی پارامترهای مورد نیاز برای اجرای مدل Thornes و بار رسوب برای هر کدام از زیرحوضه‌ها در جدول ۲ آمده است. از آنجا که مدل Thornes مقادیر فرسایش را به صورت ماهیانه برآورد می‌کند، به خاطر تعداد زیاد داده‌ها (برای ۱۲ ماه) از آوردن تمامی داده‌های ماهانه خودداری نموده و صرفاً به ارائه داده‌های دو ماه از سال (ماه‌های آوریل و اکتبر) اکتفا می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۴ و جدول ۲ مشاهده می‌گردد مقادیر K در حوضه با میانگین ۰/۲۹ از مقادیر کم (۰/۰۴۵) تا زیاد (۰/۴۲) نوسان داشت که نشان‌دهنده تفاوت خاکها در مقاومت به فرسایش (باتوجه به بافت و ماده آلی) می‌باشد.

باتوجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده و جدول ۲، مقادیر بارندگی در ماه آوریل با میانگین ۶۴/۹۹ از ۵۴/۲۵ تا ۷۶/۹۴ میلی‌متر در ماه نوسان داشته

است. نتایج نشان داد میانگین فرسایش حوضه در مدل Thornes،  $0.76$  میلی‌متر در سال یا  $10/24$  تن در هکتار در سال (با فرض جرم ویژه ظاهری  $1/4$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) بوده و باتوجه به SDR محاسبه‌ای برای کل حوضه میزان رسوب برآوردی توسط مدل  $4/34$  تن در هکتار در سال برآورد گردید. بر طبق آمار بلندمدت ایستگاه هیدرومتری قرارگرفته در خروجی حوضه، میزان رسوب خارج‌شده  $3/1$  تن در هکتار در سال بود.

همان‌طورکه قبلاً نیز ذکر گردید، نرخ فرسایش بالقوه با استفاده از مدل Thornes در مقیاس زمانی ماهانه، محاسبه و از مجموع آن‌ها میانگین بلندمدت فرسایش سالیانه تخمین زده شد. نقشه میانگین بلندمدت ماهیانه (ماه‌های آوریل و اکتبر) در شکل ۵ و نقشه میانگین بلندمدت فرسایش سالیانه در شکل ۶ نمایش داده شده است و در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نقشه SDR برای کل حوضه و نقشه میانگین بلندمدت بار رسوب ویژه سالیانه تخمینی توسط ترکیب مدل Thornes و مدل SDR آورده شده



شکل ۴- نقشه عامل فرسایش پذیری در مدل Thornes.  
Figure 4. Map of erodibility factor in Thornes model.

جدول ۲- میانگین برخی پارامترهای مورد نیاز برای اجرای مدل Thornes و بار رسوب برای هر کدام از زیرحوضه‌ها.

**Table 2. The average of some parameters required to implement the Thornes model and the sediment yield for each sub watershed.**

بارندگی (اکتبر - میلی‌متر) Precipitation (October-mm)	بارندگی (آوریل - میلی‌متر) Precipitation (April-mm)	تبخیر و تعرق پتانسیل (اکتبر - میلی‌متر) Potential evapotranspiration (October-mm)	تبخیر و تعرق پتانسیل (آوریل - میلی‌متر) Potential evapotranspiration (April-mm)	زیرحوضه Sub watershed
37.43	66.00	89.84	103.92	A1-1
40.84	73.57	90.67	104.77	A1-2
36.57	64.06	90.09	104.10	A INT
38.56	68.53	90.48	104.53	A1 int
39.18	69.96	91.05	105.07	A1-5
41.59	75.15	91.31	105.42	A1-3
36.21	63.01	91.11	105.02	A2-7
38.83	69.49	91.89	105.97	A1-4
37.32	66.14	91.76	105.76	A2-1
35.70	61.57	91.70	105.56	A2-6
35.51	61.02	91.39	105.20	A3
34.19	60.50	92.66	106.70	A2-2
35.07	60.16	92.24	106.11	A2-5
35.62	62.37	91.89	105.85	A2 int
33.48	57.36	93.12	107.06	A2-4
32.59	56.77	93.53	107.55	A2-3
36.91	64.99	91.54	105.52	Total watershed

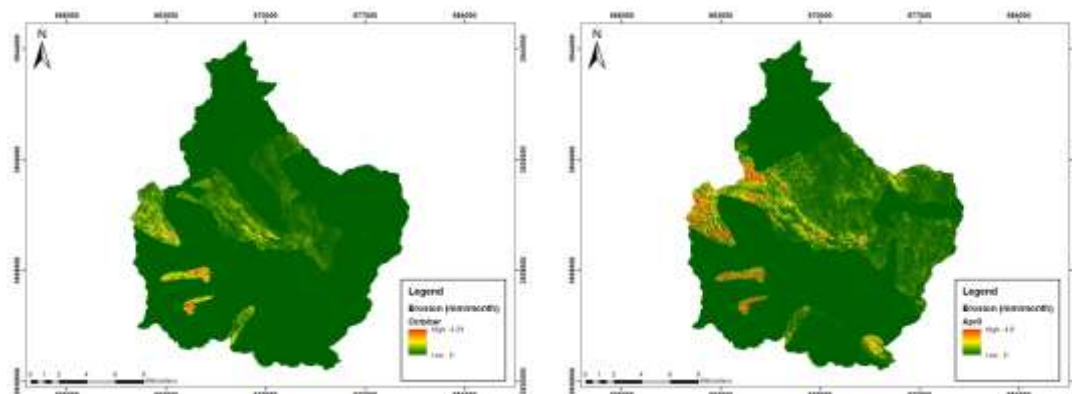
ادامه جدول ۲-

**Continue Table 2.**

نسبت تحویل رسوب SDR	عامل C (اکتبر) C factor (October)	عامل C (آوریل) C factor (April)	عامل K K factor	شیب (متر در متر) Slope (m/m)	زیرحوضه Sub watershed
0.37	23.80	39.67	0.32	0.22	A1-1
0.46	24.13	31.62	0.25	0.36	A1-2
0.36	24.10	39.57	0.30	0.28	A INT
0.42	24.13	37.21	0.28	0.30	A1 int
0.39	23.45	37.42	0.30	0.26	A1-5
0.44	24.12	31.95	0.19	0.32	A1-3
0.46	22.80	40.03	0.23	0.28	A2-7
0.44	22.79	31.48	0.29	0.35	A1-4
0.37	24.71	36.12	0.32	0.28	A2-1
0.44	22.64	35.71	0.27	0.33	A2-6
0.40	22.86	37.88	0.32	0.30	A3
0.38	26.00	27.64	0.30	0.31	A2-2
0.43	23.19	36.59	0.27	0.34	A2-5
0.42	24.25	38.35	0.29	0.29	A2 int
0.50	23.15	33.17	0.34	0.38	A2-4
0.43	23.57	29.58	0.33	0.36	A2-3
0.41	23.73	35.60	0.29	0.31	Total watershed

مکانی فرسایش در حوضه و میزان هم‌خوانی فرسایش پیش‌بینی‌شده با واقعیت عرصه‌ای باید با مطالعات و داده‌های میدانی بیش‌تر همراه باشد. از دیگر محدودیت‌های مدل **Thornes** این است که اگر مقدار رواناب پیش‌بینی‌شده در مدل برای هر ماه صفر باشد میزان فرسایش هم صفر خواهد شد، در صورتی‌که واقعیت امر به شکل دیگری است. به‌عنوان مثال فرسایش پاشمانی یکی از مهم‌ترین فرسایش‌ها و مقدمه فرسایش‌های دیگر هم‌چون بین‌شیاری و ورقه‌ای نادیده گرفته می‌شود و به‌عبارت دیگر، ممکن است فرسایش اتفاق بیفتد بدون این‌که روانابی ایجاد شده باشد. باتوجه به مشاهدات عرصه‌ای و مشاهده وضعیت فرسایش و رسوب و هم‌چنین طبق آمار بلندمدت رسوب خارج‌شده از حوضه و براساس نتایج مدل، به‌نظر می‌رسد مدل **Thornes** برآورد نسبتاً خوبی از وضعیت فرسایش در بخش‌های زیادی از حوضه مورد مطالعه داشته است. البته اظهارنظر در ارتباط با توزیع مکانی فرسایش در حوضه و میزان هم‌خوانی فرسایش پیش‌بینی‌شده با واقعیت عرصه‌ای در ارتباط با برآورد مدل بیش‌تر جنبه کیفی داشته و باید اعتبارسنجی مدل به‌صورت کمی صورت گیرد. هم‌چنین بخشی از اختلاف بین مقادیر رسوب اندازه‌گیری‌شده و تخمینی به‌وسیله ترکیب مدل **Thornes** با مدل برآورد **SDR**، به نوع مدل استفاده‌شده جهت تخمین رسوب بر می‌گردد. به‌طورکلی، تمام روش‌های تخمین **SDR** تا حدی دارای اشکالاتی هستند از جمله: آن‌ها به داده‌ها و ورودی‌های قابل‌توجهی نیاز دارند که ممکن است در عمل محدود شوند و این مدل‌ها مفروضاتی را مطرح می‌کنند که عدم قطعیت را در برآوردها ایجاد می‌کنند و نمی‌توانند به‌طور کامل پیچیدگی سیستم‌های حوضه آبخیز واقعی را نشان دهند.

تجزیه و تحلیل نرخ فرسایش و ویژگی‌های حوضه نشان می‌دهد که قسمت‌های با نرخ فرسایش بالا در حوضه با پستی و بلندی، رواناب زیاد، پوشش گیاهی کم و عمق کم خاک همراه است. براساس شکل‌های ۵، ۶ و ۸ و جدول ۳، بیش‌ترین مقدار فرسایش و رسوب برآوردی، مربوط به زیرحوضه‌های **A2-1**، **A1-4** و **A2-6** می‌باشد. باتوجه به جدول ۲ به‌نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین عواملی که سبب اختلاف در مقادیر فرسایش زیرحوضه‌ها شده، متفاوت بودن عمق خاک در بخش‌های مختلف حوضه و به تبع آن اختلاف در ظرفیت نگهداری آب بالقوه در زیرحوضه‌های مختلف محدوده مورد مطالعه باشد. براساس برآوردهای مدل **Thornes**، حدود ۶۳ درصد از حوضه، فرسایش ناچیز و بقیه فرسایش قابل‌توجهی دارند (جدول ۴). باتوجه به نتایج به‌دست آمده حدود ۶۰ درصد از حوضه فرسایش ویژه کم‌تر از ۲ تن در هکتار در سال و حدود ۲۷ درصد از حوضه فرسایش بالاتر از ۱۰ تن در هکتار در سال دارند (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد علاوه بر تأثیر عوامل دیگر، به‌واسطه عمق بیش‌تر خاک و به تبع آن ظرفیت نگهداری آب بالقوه بیش‌تر در تعدادی از زیرحوضه‌ها از جمله **A1-5**، **A2-4** و **A2-3** مقدار فرسایش و رسوب ویژه کم‌تر از مقداری که از این زیرحوضه‌ها انتظار می‌رود (براساس مشاهدات عرصه‌ای) پیش‌بینی گردیده است. در واقع، نتایج مدل **Thornes** نشان داد که حساسیت این مدل به برخی پارامترها از جمله، تبخیر و تعرق پتانسیل و ظرفیت نگهداری آب بالقوه (که می‌تواند متأثر از عوامل مختلفی از جمله عمق خاک باشد) بسیار زیاد بود و تغییرات کوچکی در این پارامترها سبب تغییر زیادی در نتایج شده که خود موجب کاهش کارایی مدل خواهد شد. البته باید به این نکته مهم توجه داشت که اظهارنظر در ارتباط با توزیع



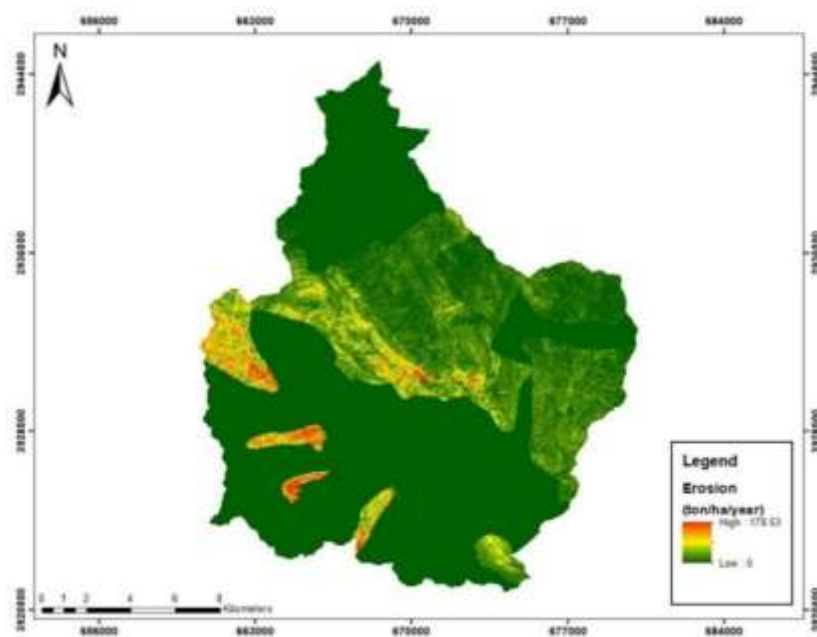
شکل ۵- نقشه میانگین بلندمدت فرسایش ماهیانه در ماه‌های آوریل و اکتبر (میلی‌متر در ماه).

Figure 5. Long-term average monthly soil erosion rates in April and October ( $\text{mm month}^{-1}$ ).

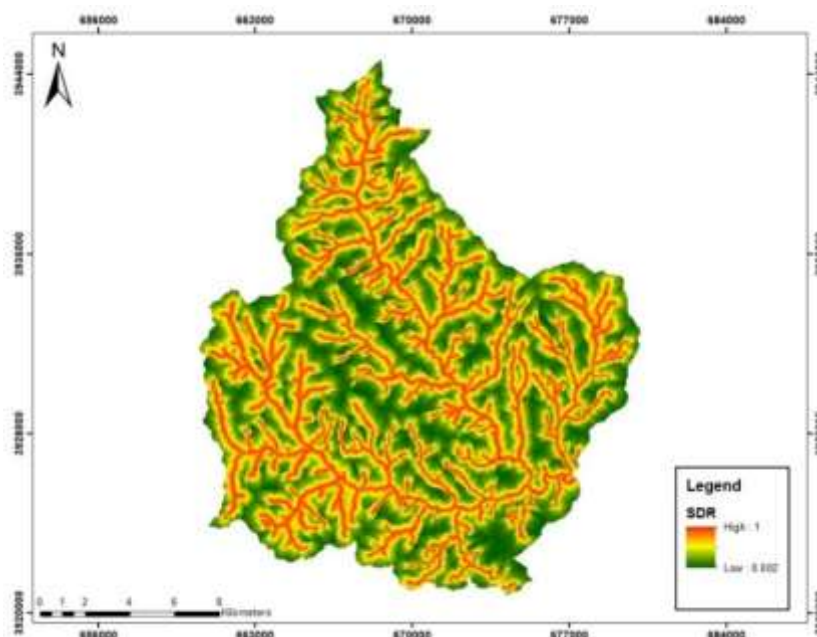
هستند، استفاده کرد. علاوه براین، نتایج این مطالعه براساس مدل‌سازی بدون واسنجی بوده و پیش‌بینی می‌شود که واسنجی پارامترهای مدل ممکن است تا حد زیادی دقت مدل را بهبود بخشد. روند توسعه یک مدل معمولی فرسایش نیز این است که قبل از اعتبارسنجی ابتدا باید پارامترها و متغیرهای مدل را در برابر داده‌های مشاهده‌ای واسنجی نمود. واسنجی کمک نموده تا اطمینان حاصل شود که مدل به درستی نشان‌دهنده سیستم دنیای واقعی و فرآیندهای مدل‌سازی شده است و بدون واسنجی، هرگونه تلاش برای اعتبارسنجی، کاربرد محدودی دارد. واسنجی نمودن مدل به کمک روش‌های مختلف اندازه‌گیری فرسایش صورت می‌گیرد. واسنجی مدل‌های فرسایش با استفاده از داده‌های ایستگاه هیدرومتری نیز قطعاً بهتر از عدم واسنجی است، اما محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. نکته کلیدی این است که هنگام تفسیر نتایج مدل واسنجی شده، باید از منابع احتمالی خطا آگاه بود و تا حد امکان آن‌ها را در نظر گرفت. البته هدف از این پژوهش بررسی کارایی مدل Thornes در پیش‌بینی فرسایش بدون انجام واسنجی بوده، چون در اکثر حوضه‌های کشور، اندازه‌گیری فرسایش در عرصه امکان‌پذیر نبوده و اکثر حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها نیز مجهز به ایستگاه هیدرومتری نیستند.

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید ساودرا و مانائیرتز (۲۰۰۵) نیز به بررسی تخمین فرسایش با استفاده از ۵ مدل (Thornes, USPED, RUSLE, SPL) و MMMF پرداختند و نتایج آن‌ها نشان‌داد از نظر توزیع مکانی مدل MMMF برای شناسایی منابع رسوب در مقیاس حوضه آبخیز مناسب‌تر بوده و به دلیل داده‌های ورودی مورد نیاز کم‌تر مدل‌های RUSLE و Thornes در جایی که اطلاعات دقیق حوضه به راحتی در دسترس نباشد، پیش‌بینی‌های این دو مدل به اندازه کافی قابل اعتماد می‌باشند (۱۱). علی و دی‌بوئر (۲۰۱۰) هم به مدل‌سازی توزیع مکانی فرسایش و رسوب در حوضه رودخانه سند پرداخته و نرخ فرسایش بالقوه را با استفاده از مدل Thornes ترکیب با یک مدل رواناب سطحی تخمین زدند. ارزیابی مدل براساس آماره‌های دقت و صحت، عملکرد بسیار خوب تا رضایت‌بخش مدل را در پیش‌بینی بار رسوب نشان داد (۱۳). چارچوب مدل Thornes دارای ورودی‌های کمی بوده و با نتایج به دست آمده می‌توان بیان نمود با انجام واسنجی مناسب براساس داده‌های ایستگاه هیدرومتری- رسوب‌سنجی از این مدل برای برآورد بار رسوب در حوضه‌های زهکشی بدون ایستگاه که دارای شرایط آب و هوایی، توپوگرافی و کاربری اراضی مشابه

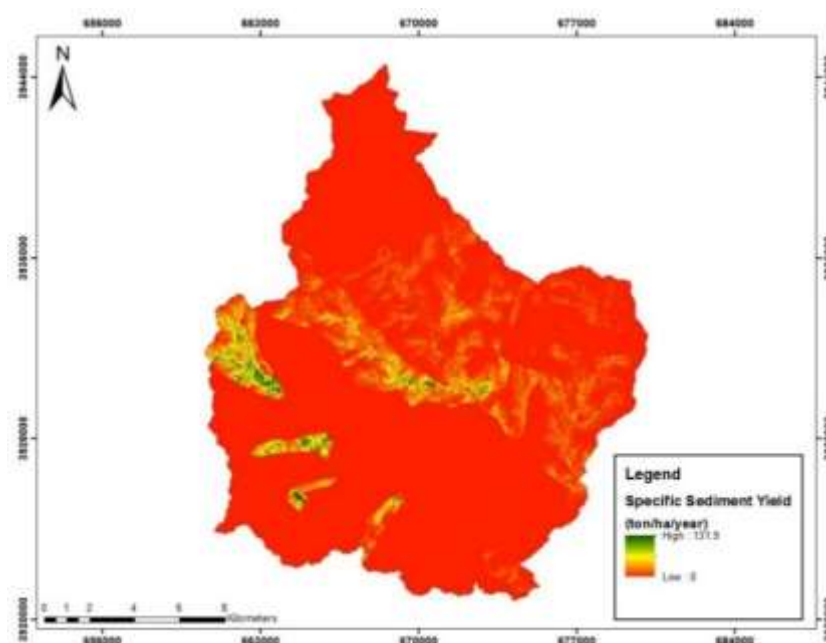




شکل ۶- نقشه میانگین بلندمدت فرسایش سالیانه با فرض جرم مخصوص ظاهری ۱/۴ (تن در هکتار در سال).  
 Figure 6. Long-term average annual soil erosion rates map with the assumption of bulk density of 1.4 (ton ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>).



شکل ۷- نقشه نسبت تحویل رسوب برای تمامی قسمت‌های حوضه.  
 Figure 7. Sediment delivery ratio map for all parts of the watershed.



شکل ۸- نقشه میانگین بلندمدت بار رسوب ویژه سالیانه (تن در هکتار در سال).

Figure 8. Long-term average annual specific sediment yield map ( $\text{ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ).

جدول ۳- مقادیر فرسایش و رسوب ویژه برآوردی توسط مدل Thornes در زیرحوضه‌ها.

Table 3. Specific erosion and sediment rates estimated by Thornes model in sub watersheds.

رسوب ویژه (تن در هکتار در سال) Specific sediment rate ( $\text{ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )	فرسایش ویژه (تن در هکتار در سال) Specific erosion rate ( $\text{ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )	زیرحوضه Sub watershed
0.85	5.74	A1-1
2.69	7.07	A1-2
1.89	5.87	A INT
1.67	5.12	A1 int
0.05	0.12	A1-5
3.08	6.34	A1-3
4.11	8.58	A2-7
12.20	23.74	A1-4
12.45	29.72	A2-1
5.60	12.80	A2-6
3.93	10.02	A3
1.64	6.69	A2-2
5.43	11.65	A2-5
3.65	9.29	A2 int
0.06	0.12	A2-4
0.09	0.19	A2-3
4.34	10.24	Total watershed

جدول ۴- درجه، مقدار و درصد مساحت فرسایش خاک برآوردشده با مدل Thornes.

**Table 4. Grade, rate and area percentage of soil erosion estimated by Thornes model.**

درصد مساحت Area percentage	مقدار فرسایش (تن درهکتار در سال) Erosion rate (ton ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	درجه فرسایش خاک Grade of soil erosion
57.90	<0.5	Insignificant soil erosion
4.35	0.5 تا 3	Weak erosion
12.58	3 تا 12	Considerable erosion
19.56	12 تا 50	Severe erosion
5.61	50 تا 200	Very severe erosion

### نتیجه گیری کلی

باتوجه به مشاهداتی که در طول این پژوهش در عرصه صورت گرفته و هم‌چنین طبق آمار بلندمدت رسوب خارج شده از حوضه و براساس نتایج، به نظر می‌رسد مدل Thornes در بیش‌تر قسمت‌های حوضه برآورد نسبتاً خوبی از وضعیت فرسایش حوضه مورد مطالعه داشته است. البته باید بیان نمود انتخاب مدل مناسب برآورد نسبت تحویل رسوب در بخش‌های مختلف حوضه و نهایتاً محاسبه بار رسوب می‌تواند در تعیین کارایی مدل اهمیت به‌سزایی داشته باشد. روش‌های مختلفی جهت تخمین SDR وجود دارد، اما هرکدام از این روش‌ها تا حدی دارای اشکالات و عدم قطعیت‌هایی هستند. به نظر می‌رسد مدل Thornes مقدار رسوب و هم‌چنین فرسایش را در تعدادی از زیرحوضه‌ها بیش‌تر از محدوده مورد انتظار (براساس مشاهدات عرصه‌ای) به‌خصوص در بخش‌هایی از حوضه که مقدار فرسایش برآوردشده بیش از ۵۰ تن در هکتار می‌باشد (۵/۶ درصد از حوضه)، و در برخی از زیرحوضه‌ها کم‌تر از مقادیر مورد انتظار، برآورد نموده است (به نظر می‌رسد این نتیجه ناشی از حساسیت زیاد مدل به پارامتر ظرفیت نگهداری آب بالقوه باشد). به‌طورکلی نتایج مدل Thornes نشان داد که حساسیت این مدل به برخی

پارامترها از جمله، تبخیر و تعرق پتانسیل و ظرفیت نگهداری آب بالقوه (که می‌تواند متأثر از عمق خاک باشد) بسیار زیاد بود و تغییرات کوچکی در این پارامترها سبب تغییر زیادی در نتایج شده که خود سبب کاهش کارایی مدل خواهد شد، اما باتوجه به این‌که این مدل به داده‌های نسبتاً کمی نیاز داشته، ممکن است بتوان از آن برای پیش‌بینی فرسایش و بار رسوب در حوضه‌های بزرگ فاقد اطلاعات یا حوضه‌های با اطلاعات ضعیف استفاده کرد.

در مورد تطابق مقادیر فرسایش و رسوب واقعی در بخش‌های مختلف حوضه و فرسایش و رسوب تخمینی توسط مدل Thornes در ترکیب با مدل برآورد رسوب، نمی‌توان با ضریب اطمینان بالا اظهارنظر نمود و ارزیابی کارایی مدل صرفاً می‌تواند به‌صورت کیفی صورت گیرد، چون در بخش‌های مختلف حوضه، فرسایش و رسوب، اندازه‌گیری نشده و ارزیابی کمی صرفاً با مقایسه نتایج تخمین با نتایج اندازه‌گیری در عرصه امکان‌پذیر خواهد بود. هرچند مقایسه برآورد رسوب خروجی برآوردی از حوضه با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری می‌تواند تا حدودی ارزیابی مدل را از حالت صرفاً کیفی خارج نموده و نسبتاً کمی نماید. البته مقایسه تخمین‌های رسوب مدل‌سازی شده با بار رسوب

رسوب تخمینی در بخش‌های مختلف حوضه صرفاً با داشتن داده اندازه‌گیری امکان‌پذیر خواهد بود و متأسفانه این یکی از نقایص بزرگ مطالعات تخمین فرسایش در حوضه‌های مختلف و با مدل‌های مختلف می‌باشد.

بنابراین، در حالی که ممکن است مدل Thornes به‌طورکلی تخمین نسبتاً خوبی در بیش‌تر قسمت‌های حوضه داشته باشد، باید محدودیت‌ها و کم‌برآورد بودن و بیش‌برآورد بودن آن را در شرایط مختلف در نظر گرفت. پیشنهاد می‌شود بررسی بیش‌تری از طریق اندازه‌گیری مستقیم فرسایش و رسوب در حوضه به کمک روش‌های مستقیم (از جمله تله‌های رسوب‌گیر، کرت‌های فرسایشی، ردیابی رادیونوکلئیدی، فوتوگرامتری و غیره) جهت ارزیابی مدل صورت گیرد.

به‌طورکلی با توجه به ماهیت دینامیک و تجربی مدل‌های هیبرید و مشکلات دسترسی به اطلاعات در اکثر حوضه‌ها و نیاز به ورودی نسبتاً کم در تعدادی از این مدل‌های هیبرید هم‌چون Thornes، به‌نظر می‌رسد این مدل‌ها ابزارهایی ایده‌آل برای ارزیابی فرسایش خاک در مقیاس حوضه آبخیز در محیط GIS و با کمک تصاویر سنجنش از دور باشند و واسنجی پارامترهای مدل‌ها تا حد زیادی می‌تواند دقت مدل را بهبود بخشد.

اندازه‌گیری‌شده در یک ایستگاه هیدرومتری می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری در حوضه رودخانه ارائه دهد، اما برخی محدودیت‌ها و اشکالات وجود دارد که باید در این رویکرد در نظر گرفت، از جمله: محدودیت‌های مدل (مدل‌های رسوب بر ورودی‌ها و معادلاتی تکیه می‌کنند که فرآیندهای پیچیده را ساده می‌کنند)، محدودیت‌های اندازه‌گیری (نمونه‌برداری از رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری اغلب متناوب است. رویدادهای شدید با بارهای رسوب بالا ممکن است نادیده گرفته شوند و اندازه‌گیری‌ها می‌توانند خطاهای قابل‌توجهی داشته باشند)، داده‌های واسنجی (یک واسنجی مناسب به داده‌های رسوب اندازه‌گیری‌شده با کیفیت در یک دوره زمانی طولانی، که همیشه در دسترس نیست، متکی است)، تغییر شرایط (فرسایش و رسوب به‌واسطه تغییرات کاربری زمین، اقلیم و هیدرولوژی ممکن است در طول زمان تغییر نموده و مدل‌ها ممکن است این شرایط پویا را منعکس نکنند). با وجود این مسائل، مقایسه رسوب مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هم‌چنان می‌تواند نشانه‌ای کلی از دینامیک رسوب در یک حوضه ارائه کند، اما عدم قطعیت‌ها باقی می‌ماند و این روش ممکن است تغییرات پیچیده مکانی و زمانی را به‌طور کامل نشان ندهد. به‌طورکلی ارزیابی کمی دقیق توزیع فرسایش و

## منابع

1. Wu, C., Zhou, Z., Xiao, W., Wang, P., Teng, M., & Huang, Z. (2011). Estimation of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area of China using RUSLE, remote sensing and GIS. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9 (2), 728-734. doi: 10.1071/sr10191.
2. Arabkhedri, M., Iranmanesh, F., Razmjoo, P., & Hakimkhani, S. (2005). Preparing a sediment production map for Iran and prioritizing watersheds in terms of sedimentation. P 83-88, 3<sup>rd</sup> Erosion and Sediment National Conference, Tehran. <https://en.civilica.com/doc/8215/>. [In Persian]
3. Nigel, R., & Rughooputh, S. (2010). Mapping of monthly soil erosion risk of mainland Mauritius and its aggregation with delineated basins. *Geomorphology*, 114, 101-114. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.06.013.

4. Stroosnijder, L. (2005). Measurement of erosion: Is it possible? *Catena*, 64, 162-173. doi: **10.1016/j.catena.2005.08.004**.
5. Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799. doi: **10.1016/S1364-8152(03)00078-1**.
6. Hajigholizadeh, M., Melesse, A. M., & Fuentes, H. R. (2018). Erosion and sediment transport modelling in shallow waters: A review on approaches, models and applications. *International journal of environmental research and public health*, 15 (3), 518. doi: **10.3390/ijerph15030518**.
7. Halefom, A., Ahmad, I., & Dar, M. (2021). Soil loss rate estimation using a hybrid model of geographic information system coupled with fuzzy logic technique. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 421-432. doi: **10.1007/s13762-021-03178-5**.
8. Thornes, J. B. (1985). The ecology of erosion. *Geography*, 70, 222-235. doi: **10.1177/030913331036754**.
9. Thornes, J. B. (1990). The interaction of erosional and vegetation dynamics in land degradation: Spatial outcomes. P 41-53, In: J. B. Thornes (ed.), *Vegetation and erosion: processes and environments*, J. Wiley, Chichester, West Sussex, England. 518p.
10. Zhang, X., Drake, N., & Wainwright, J. (2002). Scaling land surface parameters for global-scale soil erosion estimation, *Water Resources Research*, 38 (9), 1180. doi: **10.1029/2001WR000356**.
11. Saavedra, C., & Mannaerts, C. M. (2005). Erosion estimation in an Andean catchment combining coarse and fine resolution satellite imagery. 4 p. In: *Proceedings of the 31st international symposium on remote sensing of Environment: global monitoring for sustainability and security*, Saint Petersburg, 20-24 June 2005. <https://www.isprs.org/proceedings/2005/ISRSE/html/papers/1017.pdf>.
12. Symeonakis, E., Calvo-Cases, A., & Arnau-Rosalen, E. (2007). Land use change and land degradation in southeastern Mediterranean Spain. *Environmental Management*, 40, 80-94. doi: **10.1007/s00267-004-0059-0**.
13. Ali, K. F., & De Boer, D. H. (2010). Spatially distributed erosion and sediment yield modeling in the upper Indus River basin. *Water Resources Research*, 46 (8). doi: **10.1029/2009WR008762**.
14. Dane, H., Topp, G., & Warren, A. (2002). *Methods of Soil Analysis Part-4 Physical Methods: SSSA Book*, Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
15. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., & Sumner, M. E. (1996). *Methods of soil analysis. Part 3-Chemical methods*, SSSA Book, Madison, Wisconsin, USA. 1390 p.
16. Ferro, V., & Minacapilli, M. (1995). Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal*. 40 (6). 703-717. doi: **10.1080/02626669509491460**.

