

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.13, Issue 39, March 2024

## Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed

Somayeh Ebrahimzadeh<sup>1</sup>, Meysam Argany<sup>2\*</sup> , Farshad Mirdar Harijani<sup>3</sup>

1. PhD student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran
2. *Corresponding Author*, Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran.
3. MSc. Watershed and Soil Conservation Office, Forest, Range and Watershed Management of Iran, Tehran, Iran

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 03 July 2021

Revised: 28 January 2024

Accepted: 09 March 2024

#### Keywords:

soil erosion, sediment yield,  
 RUSLE, SDR, WTLS,  
 Dizgaran watershed.

### ABSTRACT

Water soil erosion is one of the most common types of soil degradation, which has very destructive effects on the environment and human life. This phenomenon reduces the quality of the soil in the site and may cause sedimentation problems in the downstream or reservoirs. The severity of soil erosion is usually estimated using different models. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is the most common soil erosion model due to its simplicity, less need for data, and adaptability to different environmental conditions. Studies around the world show that this experimental model is very efficient for estimating annual soil losses at the watershed scale. Sediment Delivery Ratio (SDR) is used to estimate the rate of sediment yield based on the soil erosion rate obtained from RUSLE. Dizgaran watershed, located on the border of Kurdistan and Kermanshah provinces, western Iran, is one of the mountainous areas of the country and has rough topography, vegetation cover, and weather conditions that make it prone to severe soil erosion. This research aims to estimate the annual average rate of soil erosion and sediment yield in the Dizgaran watershed and also to investigate the correlation between different RUSLE factors and the erosion rate to better understand the effect of each factor on the erosion rate. In this research, the rainfall-runoff erosivity (R) factor was created using the WTLS linear regression method based on the Digital Elevation Model (DEM). According to the results of the RUSLE/SDR model, the average rate of soil erosion was 45.09 tons per hectare per year and the average rate of sediment production was 19.42 tons per hectare per year in the watershed. 1.3% and 4.66% of the area of the area were placed in very low and low erosion classes, respectively. 16.18% of the area was in the moderate erosion class, and 36.18% and 41.68% of the area were in the severe and very severe erosion classes, respectively. Also, the results indicate that the two factors of topography (with a correlation coefficient of 79%) and cover and management (with a correlation coefficient of 47%) have the highest correlation with the soil erosion rate, respectively, and therefore play the most important role in changing the erosion rate in the watershed. The results of this research show that this watershed is involved in severe erosion, as can be seen from the presence of different forms of soil erosion in the field investigation. The results of this research can be used to carry out management measures to reduce the rate of soil erosion in the points with a high rate of erosion and to protect and manage the Dizgaran watershed.

**Cite this article:** Ebrahimzadeh, S., Argany, M., & Mirdar Harijani, F. (2024). Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24. DOI: 10.22111/jneh.2024.39109.1823



© Meysam Argany.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2024.39109.1823

\* Corresponding Author Email: [argany@ut.ac.ir](mailto:argany@ut.ac.ir)



مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۳، شماره ۳۹، فروردین ۱۴۰۳

## مدلسازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه

### آبریز دیزگران

سمیه ابراهیم‌زاده<sup>۱</sup>، میثم ارگانی<sup>۲\*</sup> ID، فرشاد میردادر هریجانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)

۳. کارشناس ارشد دفتر آبخیزداری و حفاظت خاک، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از رایج‌ترین انواع تخریب خاک که اثرات بسیار مخرب بر محیط‌زیست و زندگی بشر دارد، پدیده فرسایش خاک آبی است. این پدیده کیفیت خاک را در محل کاهش می‌دهد و ممکن است باعث ایجاد مشکلات رسوب در پایین‌دست یا مخازن شود. شدت فرسایش خاک معمولاً با استفاده از مدل‌های مختلف تخمین زده می‌شود. مدل معادله جهانی تلفات خاک (RUSLE) به دلیل سادگی، نیاز کمتر به داده و سازگاری با شرایط مختلف محیطی رایج‌ترین مدل فرسایش خاک است. مطالعات در سراسر دنیا نشان می‌دهد که این مدل تجربی برای تخمین تلفات سالانه خاک در مقیاس حوضه بسیار کارآمد است. برای تخمین نرخ تولید رسوب بر اساس نرخ فرسایش خاک حاصل از مدل RUSLE، از نسبت تحویل رسوب (SDR) استفاده می‌شود. حوضه آبریز دیزگران واقع در مرز استان‌های کردستان و کرمانشاه در غرب ایران، یکی از حوضه‌های کوهستانی کشور و دارای توپوگرافی ناهموار و شرایط پوشش گیاهی و آب و هوایی است که آن را مستعد فرسایش خاک شدید می‌کند. هدف این پژوهش برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز دیزگران و بررسی همبستگی عوامل مختلف RUSLE با نرخ فرسایش برای درک بهتر تاثیر هر یک از عوامل موثر بر این پدیده است. در این پژوهش فاکتور فرسایش‌دهی باران از روش رگرسیون خطی WTLS براساس مدل ارتفاعی رقومی ایجاد شد. با توجه به نتایج مدل RUSLE/SDR، نرخ متوسط فرسایش خاک در منطقه ۴۵،۰۹ تن در هکتار در سال و نرخ متوسط تولید رسوب ۱۹،۴۲ تن در هکتار در سال در حوضه محاسبه گردید. به ترتیب ۱/۳٪ و ۴/۶۶٪ از مساحت حوضه در کلاس‌های فرسایش خیلی کم و کم قرار گرفت. ۱۶/۱۸٪ از منطقه در کلاس فرسایش متوسط و به ترتیب ۳۶/۱۸٪ و ۴۱/۶۸٪ از سطح منطقه در کلاس‌های فرسایش شدید و بسیار شدید قرار گرفت. همچنین نتایج حاکی از این است که دو عامل توپوگرافی (با ضریب همبستگی ۷۹ درصد) و پوشش گیاهی (با ضریب همبستگی ۴۷ درصد) به ترتیب بیشترین همبستگی را با نرخ فرسایش خاک داشته و بنابراین به ترتیب مهم‌ترین نقش را در تغییر نرخ فرسایش در منطقه دارند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد همان‌طور که از حضور اشکال مختلف فرسایش در بازدید میدانی از حوضه پیداست، این منطقه درگیر فرسایش شدید می‌باشد. از نتایج این پژوهش می‌توان برای انجام اقدامات مدیریتی در جهت کاهش نرخ فرسایش خاک در نقاط با نرخ بالای فرسایش و حفاظت و مدیریت حوضه آبریز دیزگران استفاده نمود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹	
واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، تولید رسوب، RUSLE، SDR، WTLS، حوضه دیزگران.	
استناد: ابراهیم‌زاده، سمیه، ارگانی، میثم، میردادر هریجانی، فرشاد. (۱۴۰۲). مدلسازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۳۹)، ۱-۲۴. DOI: 10.22111/jneh.2024.39109.1823	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	© سمیه ابراهیم‌زاده، میثم ارگانی، فرشاد میردادر هریجانی.



## مقدمه

فرسایش خاک پدیده‌ای طبیعی و جبران ناپذیر است که فعالیت‌های انسان می‌تواند آن را تشدید کند. فرسایش آبی به‌عنوان از بین رفتن سریع لایه رویین خاک از سطح زمین توسط آب تعریف می‌شود (فائو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). این پدیده باعث کاهش حاصلخیزی خاک و ظرفیت کشاورزی، از بین رفتن پوشش گیاهی، آلودگی و شوری آب‌ها، افزایش خطر وقوع سیل، تخریب سازه‌های ساخت بشر و نیز کاهش ظرفیت و عمر سدها و مخازن آب می‌شود (اوزوی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ ابراهیم‌زاده<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، تخمین صحیح نرخ فرسایش خاک و توزیع مکانی آن برای برنامه‌ریزی و انجام اقدامات حفاظتی جهت کاهش آسیب‌های متعدد این پدیده امری ضروری است. میزان خاک فرسایش‌یافته در سراسر جهان بین ۲۰ تا ۳۰ گیگا تن در سال تخمین زده شده است که منجر به ازدست‌دادن ۰/۹۰ تا ۰/۹۵ میلی‌متر خاک از سطح زمین می‌شود (الول<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). قاره آسیا بیش از سایر قاره‌ها از فرسایش خاک رنج می‌برد و ایران یکی از کشورهای است که بالاترین نرخ فرسایش خاک را در این قاره دارند (رستمیان<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). نرخ متوسط فرسایش خاک در ایران حدود ۲۵ تن در هکتار در سال است که بیش از ۴/۳ برابر نرخ متوسط فرسایش خاک در جهان می‌باشد (رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸).

در دو دهه اخیر، مطالعات و مدل‌های تجربی مختلفی برای تخمین نرخ فرسایش خاک توسط پژوهشگران بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است (مریت<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۳) و در این میان مزایای زیاد سنسج‌ازدور ( $RS^V$ ) و سیستم اطلاعات جغرافیایی ( $GIS^A$ ) نقش تعیین‌کننده‌ای در تخمین هدررفت خاک دارد (ویشمایر<sup>۹</sup> و اسمیت<sup>۱۰</sup>، ۱۹۷۸). بررسی و تخمین مستقیم فرسایش خاک نیازمند تخمین ابعاد و حجم هر یک از قسمت‌های جویبارها، خندق‌ها و فرسایش صفحه‌ای و نیز تراکم این عوارض می‌باشد. این اطلاعات تنها می‌تواند از ابزاری با رزولوشن زمینی بسیار بالا به‌دست آید که در نتیجه بررسی فرسایش خاک را از نظر گستره زمینی بسیار محدود می‌کند (ششانی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، نقشه‌های خطر فرسایش خاک معمولا بر اساس مدل‌های فرسایش به‌دست می‌آیند (پراسون<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). این مدل‌ها خطر وقوع فرسایش را بر اساس عوامل و پارامترهای موثر بر فرسایش خاک تخمین زده و پیش‌بینی می‌کنند. مدل‌های تخمین و پیش‌بینی فرسایش، ابزار مناسبی برای اقدامات مدیریتی کنترل فرسایش خاک می‌باشند (اوزسوی<sup>۱۳</sup> و اکسوی<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۵).

مدل‌های تخمین فرسایش خاک و تولید رسوب به سه دسته مدل‌های فیزیکی، مفهومی و تجربی تقسیم می‌شوند (دی ونت<sup>۱۵</sup> و پواسون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵). داده‌های لازم و همچنین محاسبات در مدل‌های تجربی ساده‌تر از مدل‌های مفهومی

1 FAO  
2 Ozsoy  
3 Ebrahimzadeh  
4 Alewell  
5 Rostamian  
6 Merritt  
7 Remote Sensing (RS)  
8 Geographic Information System (GIS)  
9 Wischmeier  
10 Smit  
11 Shoshany  
12 Prasuhn  
13 Ozsoy  
14 Aksoy  
15 De Vente

مفهومی و فیزیکی است که باعث می‌شود در اکثر موارد قابل پیاده‌سازی با داده‌ها و اندازه‌گیری‌هایی با تراکم مکانی کمتر باشند (مریت و همکاران، ۲۰۰۳). مدل‌های تجربی، به این دلیل که بر اساس ضرایبی به‌دست می‌آیند و این ضرایب خود برپایه مشاهدات یا اندازه‌گیری‌ها محاسبه و یا کالیبره می‌شوند، نمی‌توانند فرآیند فرسایش را به‌عنوان مجموعه‌ای از پدیده‌های فیزیکی تشریح و بازسازی کنند (آمور<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). باین‌حال، مدل‌های تجربی به-دلیل سادگی ساختار و سهولت پیاده‌سازی رایج‌ترین مدل‌های تخمین فرسایش خاک بوده و به‌طور گسترده در جهان به‌کار می‌روند (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸).

توزیع مکانی خطر فرسایش خاک به‌دلیل توپوگرافی، نوع خاک، پوشش و کاربری زمین و آب‌وهوا تغییر می‌کند. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS<sup>۳</sup>) به آسانی و کاملاً موثر قادر به سامان‌دهی این داده‌های متغیر در فضا می‌باشد. به‌علاوه تخمین فرسایش خاک در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی هزینه و زمان لازم را کاهش داده و صحت تخمین را افزایش می‌دهد (اوزسوی و اکسوی، ۲۰۱۵). همچنین یک سیستم اطلاعات جغرافیایی پایگاه داده‌ای را شکل می‌دهد که به‌راحتی قادر به ویرایش، به‌روزرسانی و تغییر داده‌ها و نیز نمایش نتایج می‌باشد که اهمیت زیادی از نظر مدل‌سازی‌های مکانی دارد. تمام این مزایا در کنار در دسترس بودن داده‌های لازم مدل در بیشتر مناطق و نیز قابلیت اعتماد نسبتاً بالا (به‌دلیل غیر بومی بودن مدل) باعث پیشی گرفتن مدل تجربی معادله جهانی هدررفت خاک اصلاح-شده (RUSLE) (رنارد<sup>۴</sup>، ۱۹۹۷) بر سایر مدل‌های تخمین فرسایش خاک از نظر کاربرد در سراسر دنیا می‌شود. RUSLE نسخه بهبودیافته مدل تجربی USLE (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) می‌باشد که نسبت به USLE، از روش-های متنوع‌تر و پیشرفته‌تری برای محاسبه فاکتورهای مدل استفاده می‌کند (لوکا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین داده‌های موردنیاز در RUSLE نسبت به USLE در دسترس‌تر و به‌روزتر است (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸). تعدادی از مطالعات، روند بهبود و پیشرفت مدل RUSLE را توسط پژوهش‌های گوناگون مرور کرده‌اند (جهان<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ بناویدز و همکاران، ۲۰۱۸؛ غسال<sup>۷</sup> و داس باتاچاریا<sup>۸</sup>، ۲۰۲۰؛ لوی<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). به هر حال مطالعات گوناگون نشان داده است که RUSLE رایج‌ترین و قابل‌اعتمادترین مدل تخمین فرسایش خاک در سراسر دنیا است (لوکا و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجایی که مدل RUSLE یک مدل فرسایش خاک است و نرخ فرسایش خاک سالیانه را محاسبه می‌کند، برای محاسبه مقدار رسوب حاصل از فرسایش که به مخازن پایین‌دست می‌رسد، به نسبت تحویل رسوب (SDR) نیاز دارد (توماس<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). مدل RUSLE/SDR به‌دلیل کارایی بالا و سهولت اجرا به‌طور گسترده برای ارزیابی فرسایش خاک و رسوب‌دهی در مکان‌های متعدد استفاده شده است (برای مثال: توماس و همکاران، ۲۰۱۸؛ اوغوز<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ باتاچاریا<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ عزیزیان<sup>۱</sup> و کوهی<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱؛ احمد<sup>۳</sup> و

1 Poesen

2 Amore

3 Geographic Information System(GIS)

4 Renard

5 Lucà

6 Jahun

7 Ghosal

8 Das Bhattacharya

9 Luvai

10 Thomas

11 Oğuz

12 Bhattacharya

همکاران، ۲۰۲۲؛ کانیتو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۳؛ گودورو<sup>۵</sup> و جیلو<sup>۶</sup>، ۲۰۲۳؛ مويسا<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۳؛ اوکاچا<sup>۸</sup> و همکاران؛ ۲۰۲۳).

طبق گزارش سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در سال ۱۳۹۹ شمسی، درباره وضعیت فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز ایران بر اساس بازدیدهای میدانی کارشناسان، حوضه آبریز دیزگران در غرب کشور در لیست مناطق درگیر فرسایش شدید و فزاینده است. از آنجا که مطالعه‌ای در مورد وضعیت فرسایش خاک در حوضه دیزگران انجام نشده بود، بررسی و تخمین وضعیت فرسایش خاک در این حوضه می‌تواند کلیدی برای انجام اقدامات حفاظت خاک در نقاط دارای اولویت باشد.

هدف در این مطالعه بررسی و تخمین نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز دیزگران و شناسایی مناطق با نرخ بالای فرسایش، با استفاده از یک نسخه بهبودیافته مدل RUSLE/SDR است. در این روش از تخمین فاکتور فرسایش باران در سراسر منطقه با استفاده از مدل‌سازی رابطه بارندگی و ارتفاع سطح زمین (DEM) استفاده شده است. در این مطالعه با به‌کارگیری روش WTLS (محبوب<sup>۹</sup>، ۲۰۱۲) در مدل RUSLE، رویه سه‌بعدی عامل فرسایش باران توسط آمار بارندگی ده ساله (متوسط بارندگی ماهیانه و سالیانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی) و مدل رقومی زمین (DEM) به جای روش‌های درون‌یابی رایج (مانند کریجینگ) مدل‌سازی شده است. به دلیل در نظر گرفتن خطای تصادفی، هر دو کمیت مقدار بارندگی و ارتفاع زمین به‌عنوان کمیت‌های مشاهداتی در روش WTLS، این روش صحت برآورد عامل فرسایش باران را افزایش داده و باعث اجتناب از ورود خطای درون‌یابی در مدل می‌شود؛ زیرا استفاده از روش‌های درون‌یابی در مدلسازی، عامل فرسایش باران عدم قطعیت در مدلسازی RUSLE را به شدت افزایش می‌دهد (ژو<sup>۱۰</sup> و جیا<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۴؛ ما<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۲) و در نتیجه روش بیان‌شده منجر به افزایش صحت کلی تخمین فرسایش خاک با مدل RUSLE می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند برای درک بهتر وضعیت فرسایش خاک در حوضه دیزگران و انجام اقدامات حفاظتی برای کاهش نرخ فرسایش خاک و خسارت‌های ناشی از آن در نقاط پرخطر این حوضه به‌کار گرفته شود.

## داده‌ها و روش‌ها

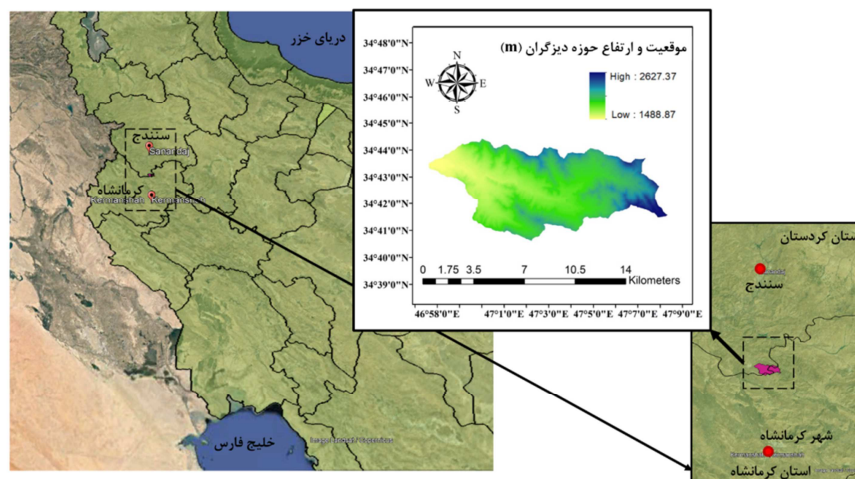
### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دیزگران، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه، در مرز استان کرمانشاه و کردستان قرار دارد. به‌طوری‌که ارتفاعات و بالادست حوضه در شهرستان کرمانشاه و خروجی حوضه در روستای شیروانه در ابتدای شهرستان کامیاران از استان کردستان قرار دارد.

1 Azizian  
2 Koohi  
3 Ahmad  
4 Kanito  
5 Guduru  
6 Jilo  
7 Moisa  
8 Okacha  
9 Mahboub  
10 Zhu  
11 Jia  
12 Ma

این حوضه با مساحت ۶۷۱۲/۶۰ هکتار ما بین ۴۶ درجه و ۵۸ دقیقه و ۸ ثانیه، تا ۴۷ درجه و ۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۸ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۴۸ دقیقه و ۳۹ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۶۳۲ متر در ارتفاعات و حداقل ارتفاع ۱۴۸۶ متر در خروجی آن می‌باشد.

در این حوضه اشکال متفاوت فرسایش شامل فرسایش‌های مکانیکی، سطحی، شیاری و جویباری قابل شناسایی است. فرسایش مکانیکی در بخش‌های رخنمون سنگی حوضه دیده می‌شود که به شکل تخریب در سنگ‌ها و تولید واریزه در پای دامنه‌ها و درز و شکاف‌های بین سنگ‌ها می‌باشد. این نوع فرسایش بیشتر در بخش ارتفاعات حوضه آبریز دیزگران دیده می‌شود. علت اصلی این نوع فرسایش عدم وجود رطوبت کافی در منطقه به دلیل شرایط اقلیمی و سرمای بسیار زیاد در فصول سرد و شب‌ها می‌باشد. اثر فرسایش سطحی در بخش‌های خاک‌دار حوضه آبریز که فاقد عامل حفاظتی می‌باشند در حد کم تا بحرانی قابل شناسایی است. این فرسایش عاملی جهت تشدید اشکال دیگر فرسایش می‌باشد. از عوامل پدید آورنده این نوع فرسایش در سطح حوضه آبریز بیشتر حساسیت بخشی از سازندها در برابر عوامل فرسایشی، شدت رگبارهای منطقه به همراه نبود عامل حفاظتی در سطح خاک‌های منطقه را می‌توان عنوان نمود. شیارها با شدت کم تا بحرانی در سطح بعضی تپه‌ها و بیشتر در دامنه‌هایی که خاک سطحی در اثر فرسایش سطحی از بین رفته و خاک زیرین که مارنی است بروزند یافته و در اثر تمرکز هرزآب‌ها در این دامنه‌ها دیده می‌شود که در تولید رسوب نقش مهمی در مواقع بارندگی دارند. این شیارها در حال گسترش و افزایش‌اند. آبراهه‌ها با حالت‌های نیمه‌فعال در بین تپه‌ها و به‌خصوص در داخل واحد کوهستان و در نهشته‌های کواترنر قابل شناسایی است. آبراهه‌ها در سرشاخه‌ها دارای حالت جوان و در مراحل فرسایشی و در بخش‌های پایین‌دست اغلب محل عبور و تجمع رسوبات می‌باشد. پدیده غالب در اکثر بخش‌های این حوضه، آبریز جلوه‌های فرسایش سطحی با شدت متفاوت آشکار است که تقریباً در تمام بخش‌های این حوضه آبریز قابل شناسایی و مشاهده است. موقعیت و محدوده حوضه دیزگران به‌عنوان منطقه مورد مطالعه از پیش تعریف‌شده و شناخته‌شده است. موقعیت جغرافیایی حوضه دیزگران در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دیزگران



### داده‌های پژوهش

در این پژوهش از نقشه رقومی توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ (برای ایجاد DEM)، نقشه خاک (۱/۵۰۰۰۰) و جدول نوع خاک، نقشه‌های پوشش و کاربری زمین (۱/۲۵۰۰۰)، آمار بارندگی ماهیانه و سالیانه در ۴۴ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده یا نزدیکی حوضه در یک دوره ده ساله (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷)، سری زمانی تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ (سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی) و گزارش عملیات حفاظت خاک زیرحوضه‌های دیزگران استفاده شد.

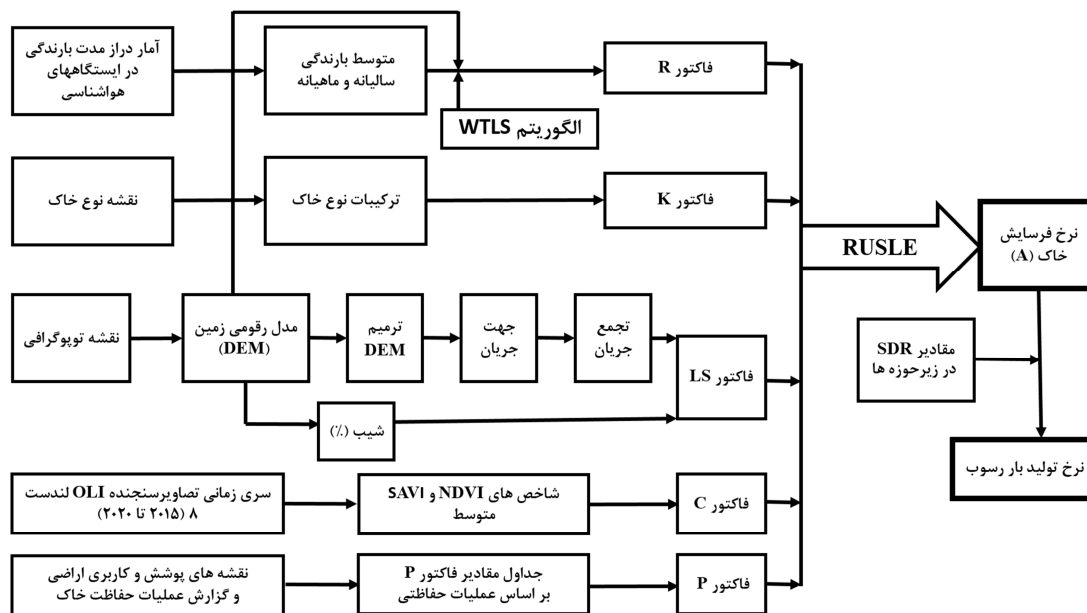
### روش پژوهش

در این پژوهش برای تخمین نرخ تولید رسوب از ترکیب مدل RUSLE (رنارد، ۱۹۹۷) با نسبت تحویل رسوب (SDR) استفاده شد. RUSL پرکاربردترین مدل تخمین فرسایش خاک می‌باشد که متوسط سالیانه هدر رفت خاک (خاک فرسایش یافته) را در واحد مساحت سطح تخمین می‌زند. مدل RUSLE اثر بارندگی، جنس خاک، توپوگرافی زمین (شیب و طول شیب)، پوشش گیاهی زمین که با کم کردن اثر قطره‌های باران و رواناب‌ها بر خاک بر فرآیند فرسایش خاک اثر می‌گذارد را روی این پدیده مدل‌سازی می‌کند (رنارد، ۱۹۹۷) و با معادله ۱ بیان می‌شود:

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

که  $A$  هدر رفت یا فرسایش خاک سالیانه (در واحد  $ha^{-1} yr^{-1}$ )،  $R$  عامل فرساینده باران (در واحد  $MJ mm ha^{-1} h^{-1} yr^{-1}$ )،  $K$  عامل فرسایش‌پذیری خاک (در واحد  $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ )،  $L$  عامل طول شیب،  $S$  عامل تندگی شیب،  $C$  عامل مدیریت پوشش اراضی و  $P$  عامل عملیات حفاظتی می‌باشد. در سال‌های اخیر معمولاً دو عامل  $L$  و  $S$  را به صورت همزمان ( $LS$ ) و با عنوان عامل توپوگرافی یا عامل شیب و طول شیب محاسبه و وارد مدل می‌کنند. عوامل  $LS$  و  $C$  و  $P$  کمیت‌هایی بدون واحد هستند.

در این مطالعه مدل رقومی زمین (DEM) با پیکسل سایز ۵ متری از منحنی میزان‌های موجود در نقشه توپوگرافی منطقه ایجاد گردید. سپس DEM حاصل برای ایجاد فاکتورهای توپوگرافی و فرساینده باران به کار برده شد. نمای کلی از پیاده‌سازی الگوریتم مدل RUSLE/SDR که در این پژوهش به کار رفت، در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نمای کلی الگوریتم مدل RUSLE/SDR

### عامل فرساینده باران (R)

فرساینده باران (R) اثر بارش باران و نیز نرخ و میزان رواناب مربوط به بارندگی را در فرسایش خاک تعیین می‌کند (تانگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). در این پژوهش روشی برای محاسبه این عامل به کار رفت که بر پایه بارندگی ماهیانه و سالیانه بوده و در سال ۱۹۵۹ میلادی پیشنهاد شد (ویشمایر<sup>۲</sup>، ۱۹۵۹). دلیل انتخاب این روش سادگی معادله، رنج گسترده کاربردهای آن در سراسر جهان و سادگی دسترسی به داده‌های لازم در این روش است. معادله این روش به صورت زیر می‌باشد (ویشمایر، ۱۹۵۹):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \times \log_{10} \left( \frac{p_i^2}{p} \right)) - 0.8188} \quad (2)$$

R عامل فرساینده باران ( $MJ \ mm \ ha^{-1} \ h^{-1} \ yr^{-1}$ )،  $p_i$  بارندگی ماهیانه (mm) و  $p$  بارندگی سالیانه (mm) است. آمار بارندگی ماهیانه و سالیانه یک دوره ده ساله (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷) ثبت شده در ۴۴ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده و نزدیکی منطقه مورد مطالعه برای محاسبه عامل R به کار رفت. در این مطالعه به جای روش‌های رایج محاسبه رویه فضایی عامل R (گسترش مقدار بارندگی از محل ایستگاه‌ها به سایر نقاط منطقه به وسیله روش‌های درون‌یابی که خطای درون‌یابی را در پی خواهند داشت)، از روش برازش خط با مدل ریاضی WTLS (محبوب، ۲۰۱۲) بر روی آمار بارندگی و مدل رقومی زمین (DEM)، برای ایجاد رویه R استفاده شد. برای گسترش بارندگی ماهیانه و سالیانه از ایستگاه‌های باران‌سنجی به سایر نقاط منطقه، ابتدا میانگین بارندگی سالیانه و ماهیانه (برای هر یک از ۱۲ ماه سال) از آمار ۱۰ ساله بارندگی در محل ایستگاه‌ها محاسبه گردید. به دلیل رابطه‌ای که بین ارتفاع زمین

1 Tang

2 Wischmeier



و میزان بارندگی وجود دارد (امسالو<sup>۱</sup> و منگو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴؛ اچائو-کوئوا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)، می‌توان بین ارتفاع نقاط زمین و بارندگی سالیانه یا ماهیانه یک خط برازش داد (سوبارنا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین یک برازش خطی بین بارندگی (mm) و ارتفاع مدل رقومی زمین (m) برای هریک از ۱۲ ماه سال به‌وسیله ایستگاه‌های باران‌سنجی انجام گرفت. همین کار برای متوسط بارندگی سالیانه انجام شد. بر اساس آنچه گفته شد جمعا ۱۲ برازش خطی بین بارندگی متوسط ماهیانه و ارتفاع زمین (DEM) برای ۱۲ ماه سال و نیز ۱ برازش خطی بین بارندگی سالیانه و ارتفاع زمین ایجاد شد. به‌دلیل ضریب همبستگی بالا در برازش رویه سه‌بعدی عامل فرساینده‌ی باران، صحت برازش‌های انجام‌شده قابل‌اعتماد بوده و به پاسخ دقیق‌تری نسبت به روش‌های درون‌یابی رایج می‌انجامد؛ زیرا برازش سطح از روی نقاط یک مدل رقومی زمین (DEM) با پیکسل سایز ۵ متر انجام گرفت که تراکم نقاط آن نسبت به تراکم مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی بسیار بیشتر می‌باشد. این برازش‌ها با الگوریتم WTLS که در سال ۲۰۱۲ ارائه گردید (محبوب، ۲۰۱۲)، انجام گرفت. زیرا هر دو کمیت ارتفاع حاصل از DEM و بارندگی (X و Y در برازش خط) به‌عنوان کمیت‌های مشاهده‌شده، کمیت‌هایی تصادفی هستند که آلوده به خطای تصادفی (نویز) می‌باشند و استفاده از روش WTLS به‌دلیل در نظر گرفتن نویز هر دو کمیت دقت برازش را نسبت به روش‌های کلاسیک به‌طور موثر افزایش داده و نتایج را بهبود می‌بخشد. با انجام برازش یادشده، مقدار بارندگی ماهیانه و سالیانه با استفاده از ارتفاع حاصل از DEM در همه نقاط منطقه محاسبه شد و لایه‌های مقدار بارندگی در رستری با پیکسل سایز ۵ متر (پیکسل سایز DEM) تولید گردید. پس از ایجاد لایه‌های  $p_i$  و  $p$ ، لایه رستری عامل R به‌وسیله رابطه (۲) محاسبه گردید. برای جزئیات کامل محاسبه این عامل با روش WTLS، به محبوب (۲۰۱۲) و ابراهیم زاده<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸) رجوع شود.

### عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) به‌طور گسترده در مدل‌های فرسایش خاک به‌کار می‌رود (بوسکو<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) و نقش ویژگی‌ها و مشخصات پروفایل خاک (جنس خاک) را بر فرسایش خاک نشان می‌دهد (رنارد، ۱۹۹۷، مارکوس<sup>۷</sup> و جاپایا<sup>۸</sup>، ۲۰۱۶). انتخاب روش محاسبه عامل K از بین روش‌های مختلف موجود بستگی به داده‌هایی از ویژگی‌های خاک دارد که در دسترس می‌باشند (مارکوس و جاپایا، ۲۰۱۶). مقدار عامل K بین مقادیر ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. مقدار ۰ مربوط به خاک‌هایی است که کمترین حساسیت را نسبت به فرسایش دارند و مقدار ۱ مربوط به خاک‌هایی است که به‌شدت به فرسایش به‌وسیله آب حساس هستند (رنارد، ۱۹۹۷). در این پژوهش عامل فرسایش‌پذیری خاک از رابطه (۳) محاسبه گردید (رنارد، ۱۹۹۷):

$$K = 0.277 \times 10^{-6} \times M^{1.14} (12 - OM) + (0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3)) \quad (3)$$

1 Amsalu  
2 Mengaw  
3 Ochoa-Cueva  
4 Subarna  
5 Ebrahimzadeh  
6 Bosco  
7 Markose  
8 Jayappa

$$M = (100 - \text{clay \%})(\text{silt \%} + \text{fine sand \%}) \quad (۴)$$

K نرخ فرسایش‌پذیری خاک ( $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ )، M پارامتری است که از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد، OM درصد مواد آلی خاک (بر حسب درصد)، s یک نوع پارامتر مربوط به ساختار خاک بر اساس اولین لایه خاک می‌باشد (کد ساختار خاک) و p پارامتر کلاس نفوذپذیری خاک (کد نفوذپذیری پروفایل خاک) می‌باشند (اچائو\_کوئوا و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه نقشه نوع خاک (شامل کد خاک هر پلیگون) در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ که از رابطه (۳) محاسبه شده بود و جدول نوع خاک و عامل فرسایش‌پذیری خاک، مربوط به حوضه دیزگران، برای تهیه نقشه عامل K به کار رفت.

### عامل توپوگرافی (LS)

نقش توپوگرافی سطح زمین بر فرسایش خاک با به‌کاربردن عامل توپوگرافی یا به عبارتی عامل شیب و طول شیب (LS) در روش مدل‌سازی RUSLE وارد می‌شود (درویسی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). عامل LS می‌تواند به‌طور مستقیم از لایه‌های شیب و تجمع جریان که هر دو از مدل رقومی زمین (DEM) به‌دست می‌آیند، محاسبه شود. همان‌طور که گفته شد DEM مربوط به منطقه با پیکسل سایز ۵ متر از نقشه توپوگرافی منطقه تهیه شد و سپس برای محاسبه عامل LS به کار رفت. در این مطالعه رابطه (۵) که توسط بیزورک<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شد، برای محاسبه عامل LS به کار رفت:

$$LS = \left( \frac{\text{flow acc} \times \text{resolution}}{22.13} \right)^m \times (0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2) \quad (۵)$$

در این رابطه flow acc تجمع جریان، S گرادیان شیب (بر حسب درصد) است و مقدار m بسته به مقدار شیب طبق جدول (۱) در بازه ۰/۲\_۰/۵ تغییر می‌کند. تجمع جریان، تعداد سلول‌هایی است که جریان آب را به سلول مورد نظر هدایت می‌کنند و مانند شیب از مدل ارتفاعی زمین پس از پر کردن سلول‌های خالی آن (ترمیم DEM) و محاسبه جهت جریان محاسبه می‌شود.

جدول ۱: مقادیر m در محاسبه عامل LS

مقدار m	شیب
۰,۵	>۵
۰,۴	۳-۵
۰,۳	۱-۳
۰,۲	<۱

### عامل مدیریت اراضی (C)

فرسایش خاک به پوشش گیاهی بسیار حساس است (بیزمنس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۰). عامل مدیریت اراضی (C) با نوع کاربری و پوشش اراضی و پوشش گیاهی در ارتباط می‌باشد. هر چه پوشش گیاهی بیشتر باشد، هدررفت خاک کمتر

1 Drzewiecki  
2 Bizuwerk  
3 Biesemans

و هر چه زمین از پوشش گیاهی عریان‌تر باشد، هدررفت خاک بیشتر است (ته<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱). پوشش گیاهی از طریق گرفتن انرژی قطرات باران قبل از رسیدن به خاک و همچنین کم کردن سرعت رواناب بر روی خاک از سرعت فرسایش خاک کم می‌کند. مقدار عامل C به نوع گیاه، مرحله رشد گیاه، تراکم و درصد تاج پوشش گیاه بستگی داشته و بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند (گیتاس<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). محاسبه فیزیکی عامل C به دلیل وابسته بودن این عامل به پارامترهای متعدد مانند کاربری و پوشش اراضی، تاج پوشش و نوع و رشد گیاه و حتی اثر رطوبت خاک یا زبری سطح زمین در فرسایش خاک بسیار مشکل است (بوسکو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). به دلیل ارتباط و وابستگی زیاد بین مقادیر عامل C و مقادیر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) (کارابورن<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰)، بسیاری از روش‌ها برای محاسبه عامل C بر اساس مقادیر NDVI در برآورد فرسایش خاک از مدل RUSLE پیشنهاد شده و توسعه یافته‌اند (مارکوس و جاپایا، ۲۰۱۶). برای محاسبه NDVI، فاصله انعکاس طیفی بین دو باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز مطابق رابطه (۶) به کار می‌رود (جنسن<sup>۵</sup>، ۲۰۰۰):

$$NDVI = (NIR - red)/(NIR + red) \quad (۶)$$

در بررسی فرسایش خاک بسیاری از محققان روش آنالیز برازش را برای تخمین مقادیر عامل C مربوط به کلاس‌های پوشش اراضی از روی مقادیر NDVI به کار برده‌اند (آناک<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). در این مطالعه، یک سری زمانی از تصاویر لندست 8 سنجنده OLI، بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی با پیکسل سایز ۳۰ متر، برای محاسبه NDVI و SAVI متوسط به کار رفت. معادله برازشی به کاررفته برای محاسبه عامل C از NDVI به دست آمده در رابطه (۷) بیان شده است (ون‌درنیف<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۰):

$$C = \exp\left[-\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right] \quad (۷)$$

$\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای بدون واحدی هستند که شکل منحنی برازشی بین عامل C و NDVI را مشخص می‌کنند. طبق بررسی‌های متعدد، این روش برازش نسبت به برازش خطی به نتایج بهتری می‌انجامد (ون‌درنیف و همکاران، ۲۰۰۰). مقادیر ۲ و ۱ به عنوان مقادیر بهینه به ترتیب برای پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  انتخاب می‌شود (ون‌درنیف و همکاران، ۲۰۰۰).

از طرفی کیو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی علاوه بر آنکه نشان دادند شاخص‌های پوشش گیاهی پتانسیل بالایی برای تعیین فاکتور C در USLE یا RUSLE دارند، ثابت کردند تخمین فاکتور C بر اساس SAVI در منطقه‌ای که چندین نوع خاک وجود دارد، نسبت به استفاده از NDVI بیشتر توصیه می‌شود (کیو و همکاران، ۲۰۱۶). آنها بیان کردند که وقتی فاکتور C برابر با ۱ است، NDVI بسیار متغیر است که این امر باعث کاهش دقت برآورد فاکتور C بر اساس NDVI می‌شود. بنابراین، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI) که توسط هوئت<sup>۹</sup> (۱۹۸۸) ارائه

1 Teh  
2 Gitas  
3 Bosco  
4 Karaburun  
5 Jensen  
6 Anache  
7 Van der Knijff  
8 KUO  
9 Huete

شد، می‌تواند برای بهبود تخمین فاکتور C استفاده شود. معادله شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده خاک (SAVI) را می‌توان به شرح زیر بیان کرد (هوئت، ۱۹۸۸):

$$SAVI = \left[ \frac{(NIR-Red)(1+L)}{(NIR+Red+L)} \right] \quad (۸)$$

در جایی که L فاکتور تنظیم اثر پس‌زمینه خاک است و ۰/۵ فرض می‌شود. نتایج پژوهش کیو و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که SAVI نسبت به NDVI با فاکتور C ارتباط قوی‌تری دارد و در رگرسیون خطی فاکتور C، با استفاده از SAVI به جای NDVI، ضریب تعیین  $R^2$  از ۰/۶۹ به ۰/۷۳ افزایش می‌یابد. هوئت (۱۹۸۸) نشان داد که تخمین پوشش گیاهی بر اساس SAVI کمتر تحت تأثیر خاک پس‌زمینه قرار دارد. این بدان معنی است که تخمین فاکتور C بر اساس SAVI در زمینه‌ای که چندین نوع خاک وجود دارد، دقیق‌تر از NDVI است. علاوه بر این کیو و همکارانش (۲۰۱۶) مشاهده کردند که در SAVI نسبت به NDVI تنوع کمتری در خاک لخت وجود دارد. آنان رابطه رگرسیونی زیر را برای محاسبه C بر پایه SAVI پیشنهاد کردند (کیو و همکاران، ۲۰۱۶):

$$C = -1.175 * SAVI + 1 \quad (۹)$$

در این پژوهش به‌دلیل پیشینه و کاربرد زیاد و دقت قابل‌قبول رابطه (۷) و نیز بر اساس آنچه کیو و همکارانش (۲۰۱۶) ثابت کردند، از میانگین حاصل از فاکتورهای C به‌دست‌آمده از NDVI و SAVI به‌عنوان فاکتور C نهایی استفاده شد.

### عامل عملیات حفاظتی (P)

عامل اقدامات حفاظتی و مدیریتی زمین (P) اثر تمهیدات حفاظت خاک مانند خطوط ترازبندی، کشت نواری و تراس‌بندی را در نرخ فرسایش خاک نشان می‌دهد. انجام این اقدامات مدیریتی تا حد زیادی به شیب منطقه بستگی دارد (آشیگبر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). وجود اقدامات حفاظتی به‌طور موثر از نرخ فرسایش خاک کاسته و عامل حفاظت خاک (عامل P) معمولاً در حالت انجام اقدامات مدیریتی، تخمین مدل RUSLE برای نرخ فرسایش خاک را اصلاح می‌کند (بلشری<sup>۲</sup> و کاخویلی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶). مقدار عامل P بین ۰ تا ۱ تغییر کرده، مقدار ۰ برای آن نشان‌دهنده اقدامات حفاظت کامل خاک و مقدار ۱ برای آن نشان‌دهنده فقدان یا ضعف اقدامات حفاظتی است (گاناسری<sup>۴</sup> و رامش<sup>۵</sup>، ۲۰۱۶). در اکثر موارد به‌دلیل عدم انجام اقدامات حفاظتی در منطقه مطالعاتی این عامل برابر مقدار ۱ قرار می‌گیرد (آشیگبر و همکاران، ۲۰۱۳).

عامل حفاظت خاک عبارت است از نسبت مقدار خاک از بین‌رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت‌شده، به زمینی که لخت بوده و در جهت بالا و پایین تندترین شیب شخم زده شده است (رفاهی<sup>۶</sup>، ۱۳۷۵). در اینجا منظور از اقدامات حفاظتی، بیشتر اقدامات سازه‌ای و روش‌های مناسب کشت‌وکار از جمله بر روی خطوط تراز، کشت نواری و

1 Ashiagbor  
2 Belasri  
3 Lakhouili  
4 Ganasri  
5 Ramesh  
6 Refahi

تراسبندی و ... است. البته عملیات حفاظتی دیگر مانند تناوب‌های حاوی علوفه، کود دادن، قرار دادن بقایای نباتی در سطح زمین و غیره نیز وجود دارد که مربوط به عامل مدیریت زراعی (C) می‌باشد. در بین عملیات حفاظتی، اثر کشت نواری در کاهش مقدار فرسایش از شخم و کشت در روی خطوط تراز بیشتر است و مقدار P در کشت نواری تابعی از درجه و طول شیب و نوع تناوب می‌باشد (رفاهی، ۱۳۷۵).

به استناد بازدید میدانی از منطقه، نقشه‌های کاربری اراضی، پوشش گیاهی و اطلاعات دریافتی از بخش پوشش گیاهی، عامل حفاظتی بر اساس امتیازبندی عامل کاربری اراضی به تفکیک زیرحوضه‌ها محاسبه گردید. در این مطالعه با توجه به مقادیر عامل اقدامات حفاظتی و مدیریتی زمین (P) در مطالعات پیشین، به ترتیب مقادیر ۰/۴ برای اراضی باغی، ۰/۷ برای اراضی جنگل کاری و ۱ برای مناطق بدون هیچ گونه اقدام حفاظتی در نظر گرفته شد.

### نسبت تحویل رسوب (SDR)

مدل RUSLE نرخ متوسط سالیانه فرسایش خاک را تخمین می‌زند و به‌طور مستقیم نمی‌تواند مقدار تولید و حمل رسوب را برای منطقه تخمین بزند. زیرا قسمتی از خاک فرسایش یافته هنگام حمل رسوب در خود منطقه ته‌نشین شده و به پایین دست و خارج منطقه منتقل نمی‌شود. برای احتساب این فرآیند، نسبت تحویل رسوب (SDR) برای هر حوضه آبریز باید محاسبه و به مقدار فرسایش خاک اعمال شود تا مقدار کلی رسوب حمل شده به خارج منطقه تخمین زده شود (کاموجو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶).

نسبت تحویل رسوب به‌صورت زیر تعریف می‌شود (کاموجو، ۲۰۱۶):

$$SDR = \frac{S_Y}{A} \quad (10)$$

در این رابطه SDR نسبت تحویل رسوب (بدون واحد)،  $S_Y$  رسوب حاصل (مقدار حمل رسوب به خارج حوضه) و A مقدار فرسایش خاک می‌باشد. توجه شود که واحدهای دو کمیت A (فرسایش) و  $S_Y$  (تولید رسوب) یکسان بوده و می‌تواند برای هر سلول منطقه ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) و یا برای کل محدوده مطالعاتی با احتساب مساحت منطقه ( $t \text{ yr}^{-1}$ ) بیان شود (کاموجو، ۲۰۱۶).

پژوهش‌های متعددی برای تخمین نسبت تحویل رسوب انجام شده است که بر اساس آن معلوم گردید که مقدار نسبت تحویل رسوب به‌طور عمده به مساحت حوضه آبریز بستگی دارد. رابطه وابستگی بین نسبت تحویل رسوب و مساحت حوضه با عنوان منحنی نسبت تحویل رسوب شناخته می‌شود (یواس دی ای<sup>۲</sup>، ۱۹۷۲). بسیاری از محققان منحنی‌های نسبت تحویل رسوب مختلفی را به‌دلیل سادگی این روش به‌کار برده‌اند (دی روزا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در تخمین میزان تولید رسوب، فرسایش کل منطقه (A) می‌تواند از الگوریتم‌ها و مدل‌های مختلف مانند RUSLE محاسبه شود. در این مطالعه ابتدا مقدار متوسط نسبت تحویل رسوب برای هر یک از زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی

1 Kamuju  
2 USDA  
3 De Rosa

منطقه از دو معادله (۱۲) و (۱۳) (علیزاده<sup>۱</sup>، ۱۳۸۰) محاسبه گردید و سپس مقدار تولید رسوب ( $S_Y$ ) از روابط (۱۱) تخمین زده شد.

$$S_Y = SDR \times A \quad (11)$$

مساحت تا ۱۰ مایل مربع:

$$SDR = 43/4 * A^{-.1753} \quad (12)$$

مساحت ۱۰ تا ۱۰۰ مایل مربع:

$$SDR = 46/7 * A^{-.2071} \quad (13)$$

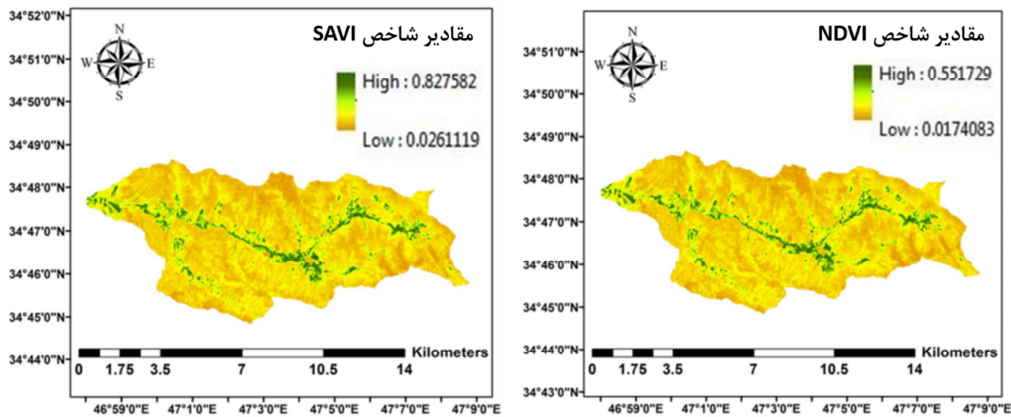
این ضریب برای تک تک زیرحوضه‌های دیزگران بر اساس مساحت‌شان محاسبه گردید.

### نتایج و بحث

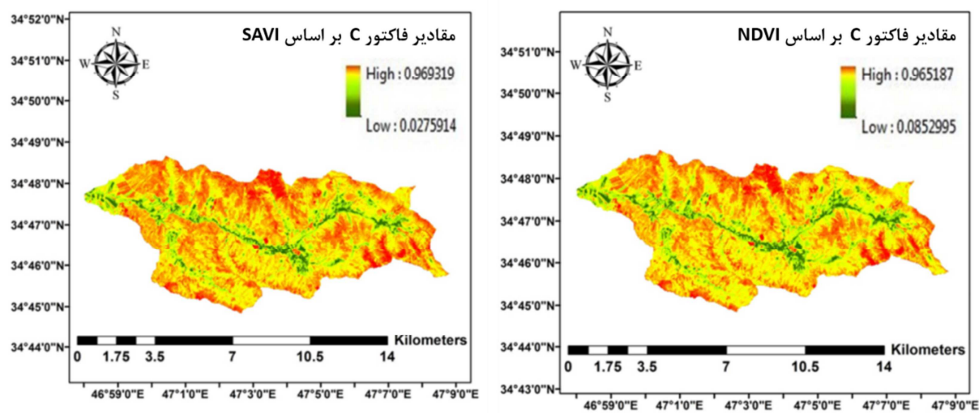
دو شاخص گیاهی NDVI و SAVI متوسط که از میانگین این دو شاخص بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ به دست آمده است، در شکل (۳) نشان داده شده است. این دو شاخص به ترتیب از روابط (۶) و (۸) محاسبه شدند. بر اساس دو شاخص گیاهی NDVI و SAVI، عامل مدیریت پوشش زمین ( $C_{SAVI}$  و  $C_{NDVI}$ ) به ترتیب به وسیله روابط (۷) و (۹) محاسبه شده و در شکل (۴) قابل مشاهده است. عامل مدیریت پوشش زمین (C) که در مدل RUSLE وارد شد، از میانگین دو عامل C محاسبه شده ( $C_{SAVI}$  و  $C_{NDVI}$ ) به دست آمد. پس از ایجاد پنج لایه مربوط به عوامل  $L, S, K, R$ ،  $C$  و  $P$  که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است، لایه نرخ متوسط سالانه فرسایش خاک (A) در منطقه به-وسیله رابطه (۱) با پیکسل سایز ۵ متر ایجاد شد و بدین ترتیب لایه توزیع مکانی نرخ فرسایش خاک در حوضه به-دست آمد.

به‌طور کلی طبق رابطه (۱۱)، مقدار تولید رسوب در هر نقطه وابسته به مقدار فرسایش خاک در آن نقطه و مساحت زیرحوضه شامل نقطه (که مستقیماً بر مقدار SDR اثر می‌گذارد) می‌باشد (ان آر سی اس: یو اس دی اس<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲). نقشه فرسایش خاک (A) حوضه در ۵ کلاس طبقه‌بندی شد که نتیجه در شکل (۷) نمایش داده شده است. مساحت و سهم هر یک از کلاس‌های نرخ فرسایش خاک از مساحت منطقه (بر حسب درصد) در جدول (۲) ارائه شده است و در شکل (۸) به صورت نمودار قابل مشاهده است. همچنین نرخ تولید رسوب ( $S_Y$ ) بر حسب تن بر هکتار در سال و ۵ کلاس مربوط به آن در شکل (۷) نشان داده شده است. برای بررسی بصری اثر شیب بر فرسایش خاک، لایه شیب بر حسب درجه نیز در شکل (۶) به نمایش گذاشته شده است.

<sup>1</sup> Alizadeh  
<sup>2</sup> NRCS:USDA

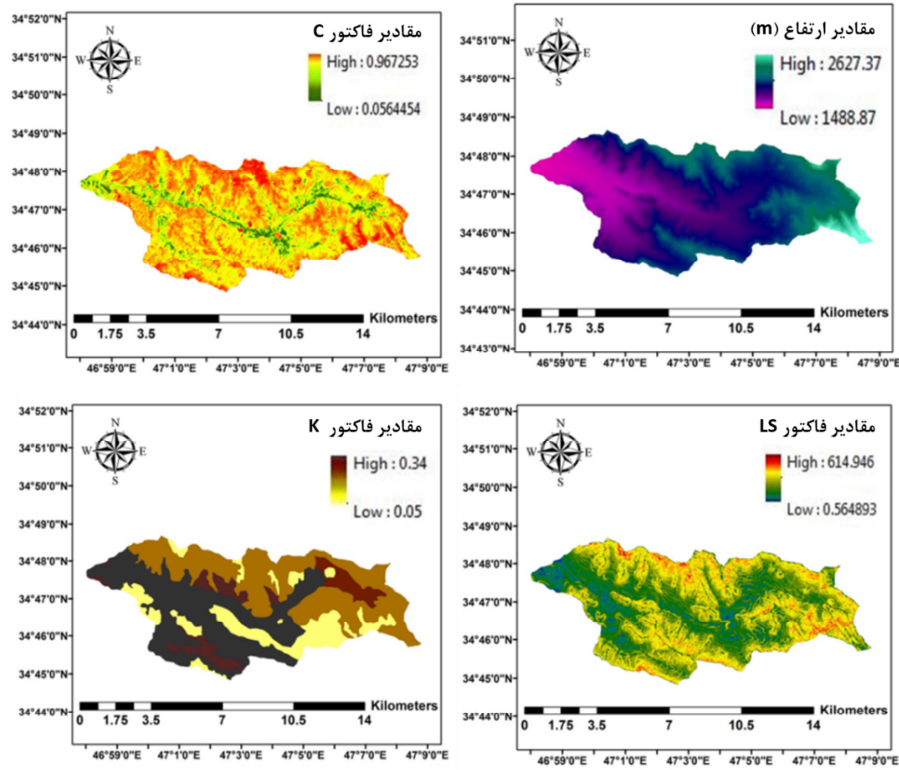


شکل ۳: لایه‌های مربوط به SAVI و NDVI در حوضه دیزگران

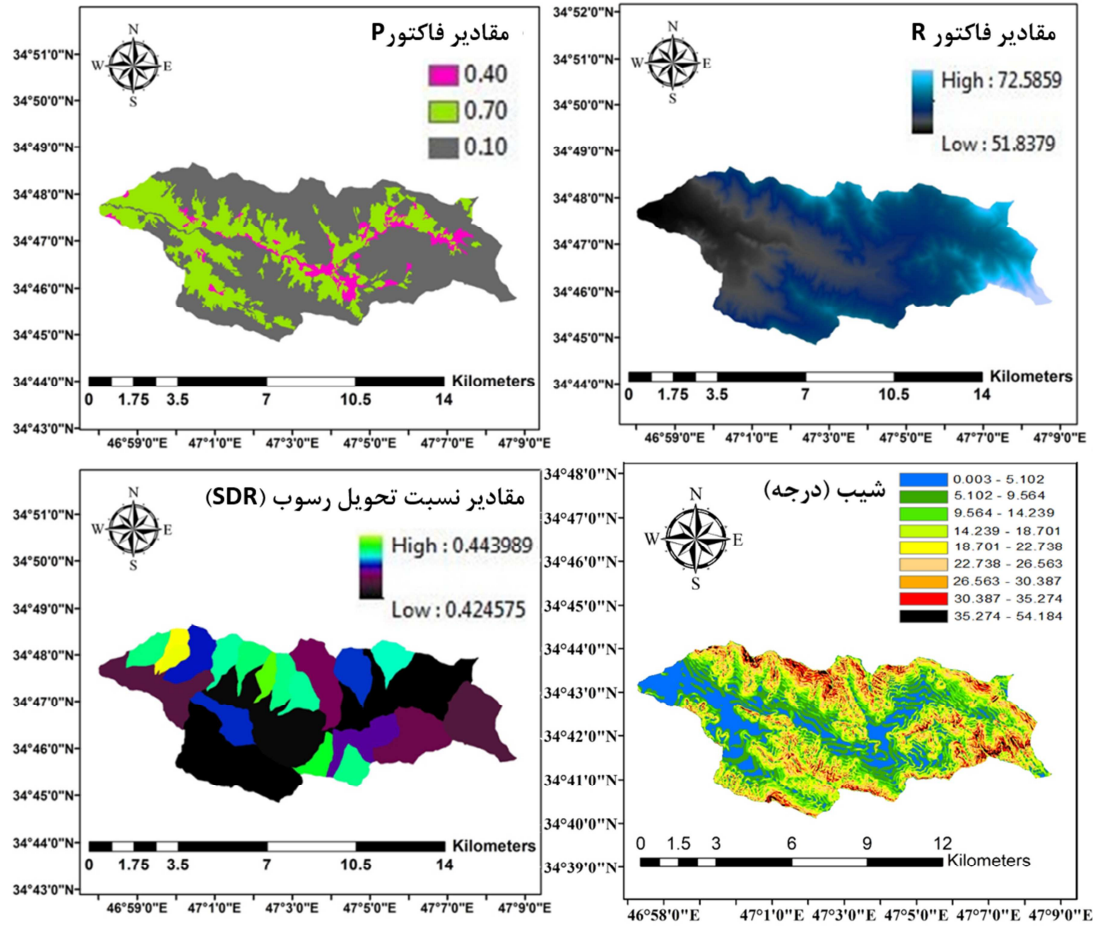


شکل ۴: لایه‌های مربوط به فاکتور C به دست آمده از دو شاخص گیاهی NDVI و SAVI در حوضه دیزگران

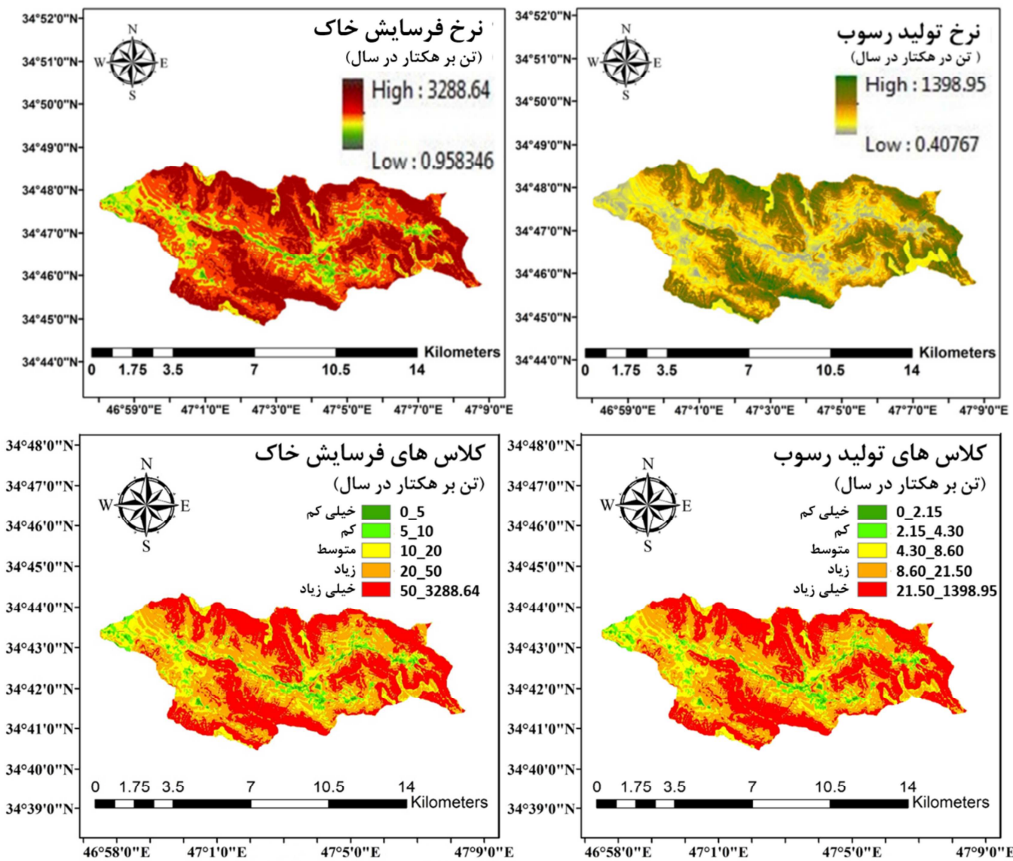




شکل ۵: لایه‌های مربوط به ارتفاع و عوامل محاسبه شده C و LS و K در حوضه دیزگران



شکل ۶: لایه‌های مربوط به عوامل محاسبه شده R و P و SDR و شیب در حوضه دیزگران



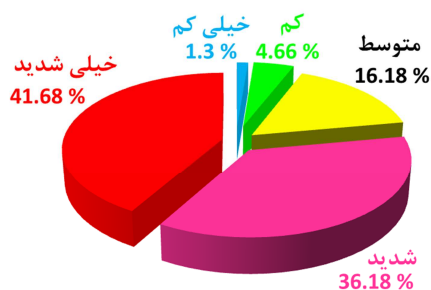
شکل ۷: لایه‌های مربوط به نرخ و کلاس‌های فرسایش خاک و بار رسوب تولیدشده در حوضه دیزگران

جدول ۲: سهم مساحت هر یک از کلاس‌های فرسایش خاک در حوضه دیزگران

کلاس نرخ فرسایش	خیلی کم	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید	همه حوضه
نرخ فرسایش خاک (تن بر هکتار در سال)	۵ >	۵_۱۰	۱۰_۲۰	۲۰_۵۰	۵۰ <	<۳۲۸۹
مساحت (مترمربع)	۸۷۲۶۳۸	۳۱۲۸۰۷۲	۱۰۸۶۰۹۸۷	۲۴۲۸۶۱۸۷	۲۷۹۷۸۱۱۷	۶۷۱۲۶۰۰۰
سهم مساحت در حوضه (برحسب درصد)	۱/۳	۴/۶۶	۱۶/۱۸	۳۶/۱۸	۴۱/۶۸	۱۰۰

با توجه به شکل‌های (۵) تا (۷)، قابل مشاهده است که کلاس‌های فرسایش بسیار کم و کم به‌طور عمده در امتداد مناطقی از حوضه که دارای شیب بسیار اندک، پوشش گیاهی متراکم و انواع خاک با مقادیر کم عامل فرسایش پذیری خاک (K) می‌باشد، متمرکز شده‌اند که اکثر این نقاط در نواری شرقی - غربی در مرکز حوضه واقع شده است. کلاس‌های فرسایش شدید و بسیار شدید اغلب در مناطقی با شیب تند، نوع خاک با مقدار بالای عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و اراضی با پوشش گیاهی کم تراکم توزیع شده است. این مناطق بیشتر در مناطق کناری

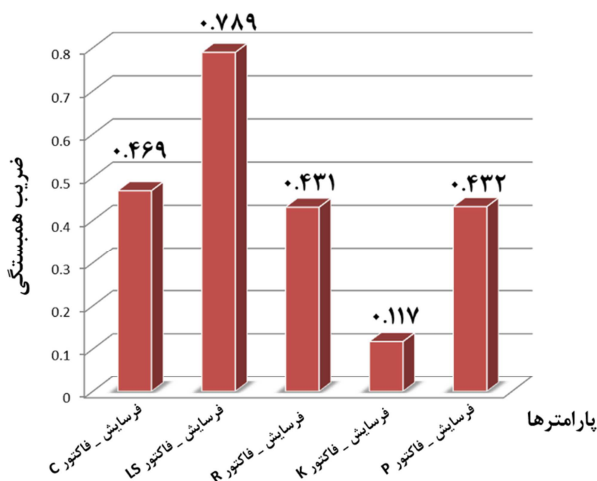
حوضه دیده میشود. در بین عوامل مؤثر، وابستگی بالای نرخ فرسایش با توپوگرافی با توجه به نقشه فاکتور توپوگرافی در شکل (۵) به وضوح مشهود است. در بسیاری از مناطق با شیب تند، نرخ بالایی از خطر فرسایش خاک توسط RUSLE تشخیص داده شده است و مناطق با بالاترین نرخ فرسایش خاک بیشتر در نقاطی با شیب زیاد قرار گرفته- اند.



شکل ۸: سهم مساحت هر یک از کلاس‌های نرخ فرسایش خاک در حوضه دیزگران

طبق شکل (۸)، ۴۱/۶۸٪ از مساحت منطقه در کلاس‌های فرسایش خیلی شدید (بیشتر از ۵۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد. ۳۶/۱۸٪ از مساحت منطقه در کلاس فرسایش شدید (۲۰-۵۰ تن در هکتار در سال)، ۱۶/۱۸٪ مساحت در کلاس فرسایش متوسط (۱۰-۲۰ تن در هکتار در سال)، ۴/۶۶٪ از مساحت در کلاس فرسایش کم (۱۰-۵ تن در هکتار در سال) و در نهایت ۱/۳٪ از سطح منطقه در کلاس فرسایش خیلی کم (زیر ۵ تن در هکتار در سال) قرار دارد و متوسط نرخ فرسایش خاک در منطقه ۴۵/۰۹ تن در هکتار در سال است.

برای بررسی این موضوع که کدامیک از عوامل بیشتر در تغییر نرخ فرسایش در منطقه مؤثر است، ضریب همبستگی بین هریک از لایه‌های عوامل R، K، LS، C و P و نرخ فرسایش خاک (A) دو به دو در منطقه محاسبه شد. نتایج حاصل در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹: ضریب همبستگی بین نرخ فرسایش و هر یک از عوامل مدل

با توجه به شکل (۹)، توزیع مکانی نرخ هدررفت خاک به ترتیب الگوی مکانی مشابه با عوامل LS، C، P، R و K را نشان می‌دهد، که حاکی از این است که تغییر نرخ فرسایش خاک در منطقه دارای یک همبستگی قوی با تغییرات توپوگرافی بوده و سپس با تغییرات فاکتور پوشش زمین و پس از آن با فاکتورهای حفاظت خاک و فاکتور فرساینده‌گی باران مرتبط است. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک کمترین همبستگی را با نرخ فرسایش دارد و این بدین معنی است که فاکتور فرسایش‌پذیری خاک نسبت به سایر فاکتورها، کمترین تغییرات را در فرسایش منطقه ایجاد می‌کند و این به دلیل همگن بودن تقریبی خاک منطقه و رنج تغییرات کم این عامل در منطقه است.

نرخ متوسط فرسایش خاک برآورد شده از مدل RUSLE در منطقه ۴۵/۰۸۸۰ تن در هکتار در سال می‌باشد که بنابراین مقدار هدررفت خاک برای کل منطقه ۳۰۲۶۵۷/۸۰۰۵ تن در سال می‌باشد. مقدار نسبت تحویل رسوب متوسط ۰/۴۳۰۶ محاسبه شد. همچنین میانگین نرخ تولید رسوب در منطقه ۱۹/۴۲۱۰ تن در هکتار در سال به دست آمد که با در نظر گرفتن مقدار SDR در هر یک از زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی منطقه و نیز نرخ فرسایش خاک، متوسط تولید رسوب برای کل منطقه ۱۳۰۳۶۵/۷۰۲۴ تن در سال محاسبه گردید. اصلی‌ترین نتایج کمی حاصل از این مطالعه به‌طور خلاصه در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: خلاصه نتایج مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران

مقدار تولید رسوب کل منطقه (تن در سال)	نرخ متوسط تولید رسوب (تن در هکتار در سال)	مقدار SDR متوسط	مقدار فرسایش خاک کل منطقه (تن در سال)	نرخ متوسط فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)
۱۳۰۳۶۵/۷۰۲۴	۱۹/۴۲۱۰	۰/۴۳۰۶	۳۰۲۶۵۷/۸۰۰۵	۴۵/۰۸۸۰

تراکم کم داده‌های بارش و خاک و استفاده از روش‌های درون‌یابی یا بزرگ در نظر گرفتن سلول‌های نقشه می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی از صحت مدل بکاهد و عدم قطعیت مدل را افزایش دهد. در این پژوهش برقرار کردن رابطه بین داده‌های بارش و ارتفاع منطقه باعث شد تراکم داده‌های بارش به ۵ متر (پیکسل سایز DEM) ارتقاء یابد که به‌طور موثری در بهبود نتایج مدل نقش داشت. از طرفی تهیه نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک با نمونه‌گیری دقیق و متراکم در منطقه و محاسبه این عامل به‌طور موثر باعث بهبود خروجی مدل گردید؛ زیرا یافتن نوع خاک موجود در منطقه به‌درستی با همان ترکیبات و ویژگی‌ها در جداول استاندارد خاک، امری بعید است و معمولاً باید نزدیک‌ترین و شبیه‌ترین نوع خاک موجود در جداول را در نظر گرفت که این خود عدم قطعیت و خطای قابل‌توجهی در مدل ایجاد می‌کند. در مورد عامل مدیریت اراضی (عامل C) نیز استفاده از جداول استاندارد برای تشکیل عامل C که بر اساس نوع پوشش و کاربری زمین است، معمولاً از دو جهت صحت مدل را به‌طور فاحش کاهش می‌دهد: اول آنکه تاریخ نقشه‌های موجود پوشش و کاربری زمین معمولاً با تاریخ سایر داده‌ها یکسان نیست و با توجه به تغییر نسبتاً سریع پوشش و کاربری زمین، باعث کاهش صحت خروجی مدل می‌شود. استفاده از طبقه‌بندی برای تهیه نقشه یادشده نیز خطای طبقه‌بندی را وارد مدل می‌کند. دوم آنکه یافتن پوشش و کاربری زمین در جداول استاندارد به‌درستی مشابه با نوع موجود در منطقه از نظر نوع و تراکم پوشش امری بعید است و معمولاً باید نزدیک‌ترین پوشش‌های موجود در جدول استاندارد را برای انواع پوشش زمین در منطقه در نظر گرفت که این کار نیز عدم قطعیت و خطای قابل‌توجهی

در مدل ایجاد می‌کند. بنابراین، معمولا استفاده از روابط بین NDVI و SAVI و عامل C که در نقاط مختلف اعتبارسنجی و تایید شده‌اند، نتایج بهتری را نسبت به استفاده از جداول استاندارد ارائه می‌کند. انتخاب نوع رابطه بین NDVI و SAVI با عامل C تاثیر بسیار زیادی در صحت خروجی مدل خواهد داشت و باید سعی شود از روابطی استفاده گردد که در مطالعات مختلف نتایج بهتری نسبت به سایر روابط ارائه کرده‌اند. در این پژوهش دقیق‌ترین رابطه بین NDVI و عامل C و همچنین بین SAVI و عامل C با توجه به مطالعات انجام‌شده در سراسر دنیا به کار گرفته شد. در مورد عامل توپوگرافی نیز باید توجه شود که دقت و پیکسل سایز DEM به کار رفته و نیز روش محاسبه این عامل در بهبود نتایج موثر است که در این مطالعه استفاده از DEM تولیدشده با پیکسل سایز ۵ متر از نقشه توپوگرافی و انتخاب روش مناسب در محاسبه این عامل منجر به نتیجه مطلوب گردید. علاوه بر آنچه در مورد عوامل مدل RUSLE گفته شد، با توجه به رابطه (۱۱) روش محاسبه و مقدار نسبت تحویل رسوب (SDR) در برآورد مقدار تولید رسوب نقش مهمی دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک نسخه بهبودیافته از مدل ترکیبی RUSLE/SDR به منظور برآورد نرخ فرسایش خاک و نرخ تولید رسوب در حوضه دیزگران به کار رفت. در این روش برای گسترش عامل فرسایشی باران (R) از محل ایستگاه-های باران‌سنجی به سایر نقاط منطقه، روش رگرسیون خطی بین مقدار بارندگی و ارتفاع زمین حاصل از DEM با استفاده از مدل WTLS به کار گرفته شد. به عبارتی، به جای روش‌های مرسوم درون‌یابی مانند کریجینگ، تخمین فاکتور R در منطقه با برقراری رابطه بین ارتفاع زمین (DEM) و مقدار بارندگی با استفاده از روش برآورد WTLS انجام گرفت. با روش به کار رفته، از عدم قطعیت مربوط به روش‌های درون‌یابی اجتناب شده و تراکم داده بارش تا ۵ متر (به اندازه پیکسل سایز DEM) افزایش یافت. نرخ متوسط فرسایش خاک برآوردشده از مدل RUSLE بهبودیافته در منطقه تقریبا ۴۵ تن در هکتار در سال می‌باشد که بنابراین مقدار هدررفت خاک برای کل منطقه تقریبا ۳۰۲۶۵۸ تن در سال می‌باشد. مقدار متوسط نسبت تحویل رسوب ۰/۴۳ محاسبه شده و میانگین نرخ تولید رسوب در منطقه ۱۹/۴۲ تن در هکتار در سال به دست آمد. تولید رسوب متوسط سالیانه برای کل منطقه ۱۳۰۳۶۶ تن محاسبه گردید. با توجه به ضریب همبستگی محاسبه‌شده بین نقشه فرسایش حاصل از مدل و هر یک از فاکتورها، فرسایش خاک در منطقه بیشترین همبستگی مکانی را با فاکتور توپوگرافی (شیب و طول شیب) دارد که این امر به دلیل رنج تغییرات زیاد این عامل و تاثیر زیاد آن در تغییر مقدار فرسایش خاک در حوضه است. فرسایش خاک کمترین همبستگی را با فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در منطقه دارد که این به دلیل همگن بودن تقریبی خاک حوضه و رنج تغییرات کم این عامل در حوضه دیزگران است که باعث اثر کم این فاکتور در تغییر مقدار نرخ فرسایش در حوضه می‌شود. پس از عامل توپوگرافی، عامل پوشش زمین (C) بیشترین ضریب همبستگی را با نرخ فرسایش خاک در منطقه دارد که حاکی از آن است که با تقویت پوشش گیاهی در حوضه می‌توان نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب را به‌طور موثر کم کرد. ۴۱/۶۸٪ از مساحت منطقه در کلاس‌های فرسایش خیلی شدید (بیشتر از ۵۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد. ۳۶/۱۸٪ از مساحت منطقه در کلاس فرسایش شدید (۲۰-۵۰ تن در هکتار در سال)، ۱۶/۱۸٪ مساحت در کلاس فرسایش متوسط (۱۰-۲۰ تن در هکتار در سال)، ۴/۶۶٪ از مساحت در کلاس فرسایش کم (۵-۱۰ تن در هکتار



در سال) و در نهایت تنها ۱/۳٪ از سطح منطقه در کلاس فرسایش خیلی کم (زیر ۵ تن در هکتار در سال) قرار دارد. همان‌طور که نتایج پژوهش نشان می‌دهد، اکثریت حوضه دیزگران (۷۷/۸۶٪ مساحت منطقه) درگیر فرسایش خیلی شدید یا شدید است که ضرورت انجام اقدامات حفاظتی را در این مناطق نشان می‌دهد. از آنجا که تخمین و پهنه‌بندی فرسایش خاک و شناسایی مناطق دارای اولویت حفاظت، گام پیشین و لازم جهت انجام عملیات حفاظت خاک است، نتایج این پژوهش می‌تواند برای انجام اقدامات مدیریتی در جهت کاهش فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه دیزگران به کار رود. با توجه به نتایج پژوهش پیشنهاد می‌شود برای کاهش نرخ فرسایش در این حوضه ابتدا تقویت پوشش گیاهی و سپس سایر اقدامات حفاظت خاک انجام گیرد.

## منابع

- رفاهی، حسینقلی. (۱۳۷۵). فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۵۱ ص.
- علیزاده، امین. (۱۳۸۰). اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی، ۷۳۵ ص.
- Ahmad, W. S., Jamal, S., Taqi, M., El-Hamid, H. T. A., Norboo, J. (2022). Estimation of soil erosion and sediment yield concentrations in Dudhganga watershed of Kashmir Valley using RUSLE and SDR model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges, and limitations of soil erosion modeling. *International soil and water conservation research*, 7(3), 203-225.
- Amore, E., Modica, C., Nearing, M. A., Santoro, V. C. (2004). Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology*, 293(1-4), pp 100-114.
- Amsalu, T., Mengaw, A. (2014). GIS-based soil loss estimation using rusle model: the case of jabi tehinan woreda, ANRS, Ethiopia. *Natural Resources*, 2014. doi.org/10.4236/nr.2014.511054.
- Anache, J. A., Bacchi, C. G., Alves-Sobrinho, T. (2014). Modeling of (R) USLE C-factor for pasture as a function of normalized difference vegetation index. *Eur Int J Sci Technol*, 3(9), 214-221.
- Ashagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., Aabeyir, R. (2013). Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools. *Int J Remote Sens Geosci*, 2(4), 1-17.
- Azizian, A., Koochi, S. (2021). The effects of applying different DEM resolutions, DEM sources, and flow tracing algorithms on LS factor and sediment yield estimation using USLE in Barajin River basin (BRB), Iran. *Paddy and Water Environment*, 19, 453-468.
- Belasri, A., Lakhoul, A. (2016). Estimation of soil erosion risk using the universal soil loss equation (USLE) and geo-information technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8(01), 98.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086.
- Bhattacharya, R. K., Chatterjee, N. D., Das, K. (2020). Estimation of erosion susceptibility and sediment yield in the ephemeral channel using RUSLE and SDR model: Tropical Plateau Fringe Region, India. *Gully erosion studies from India and surrounding regions*, 163-185.
- Biesemans, J., Van Meirvenne, M., Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1), 35-42.
- Bizuwerk, A., Taddese, G., Getahun, Y. (2003). Application of GIS for modeling soil loss rate in Awash River basin, Ethiopia. *International Livestock Research Institute (ILRI)*, Addis Ababa, Ethiopia, 1-11.
- Bosco, C., de Rigo, D., Dewitte, O., Poesen, J., Panagos, P. (2015). Modeling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(2), 225-245.
- De Rosa, P., Cencetti, C., Fredduzzi, A. (2016). A GRASS tool for the Sediment Delivery Ratio mapping. *PeerJ Preprints*, 4, e2227v1.
- De Vente, J., Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-science reviews*, 71(1-2), 95-125.
- Drzewiecki, W., Wężyk, P., Pierzchalski, M., Szafrńska, B. (2014). Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (Poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. *Pure and Applied Geophysics*, 171, 867-895.



- Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., Harijani, F. M. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), pp 1-17.
- Ganasri, B. P., Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961.
- Gitas, I. Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G. N., Karydas, C. G. (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeL proceedings*, 8(1), 40-52.
- Ghosal, K., Das Bhattacharya, S. (2020). A review of the RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 689-707.
- Guduru, J. U., Jilo, N. B. (2023). Assessment of rainfall-induced soil erosion rate and severity analysis for prioritization of conservation measures using RUSLE and Multi-Criteria Evaluations Technique at Gidabo watershed, Rift Valley Basin, Ethiopia. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 23(1), 30-47.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Jahun, B. G., Ibrahim, R., Dlamini, N. S., Musa, S. M. (2015). Review of soil erosion assessment using the RUSLE model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(9), 36-47.
- Merchant, J. W. (2000). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(4), 311-311.
- Kamuju, N. (2016). Soil erosion and sediment yield analysis using prototype and enhanced SATEEC GIS system models. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(1), 1471-1482.
- Kanito, D., Bedadi, B., Feyissa, S. (2023). Sediment yield estimation in GIS environment using RUSLE and SDR model in Southern Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2167614.
- Karaburun, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 77-85.
- KUO, K. T., SEKIYAMA, A., MIHARA, M. (2016). Determining the C factor of universal soil loss equation (USLE) based on remote sensing. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7(2), 154-161.
- Luca, F., Buttafuoco, G., & Terranova, O. (2018). GIS and Soil. In *Comprehensive geographic information systems* (Vol. 3, pp. 37-50). Elsevier Inc..
- Luvai, A., Obiero, J., Omuto, C. (2022). Soil loss assessment using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022. [doi.org/10.1155/2022/2122554](https://doi.org/10.1155/2022/2122554).
- Mahboub, V. (2012). On weighted total least-squares for geodetic transformations. *Journal of geodesy*, 86(5), pp 359-367.
- Ma, L., Chi, X., Zuo, C. (2012, August). Evaluation of interpolation models for rainfall erosivity on a large scale. In *2012 First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* (pp. 1-5). IEEE.
- Markose, V. J., Jayappa, K. S. (2016). Soil loss estimation and prioritization of subwatersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 188(4), pp 225.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental modeling and software*, 18(8-9), 761-799.
- Moisa, M. B., Babu, A., Getahun, K. (2023). Integration of geospatial technologies with RUSLE model for analysis of soil erosion in response to land use/land cover dynamics: a case of Jere watershed, Western Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 13.
- NRCS: USDA, (2002). *Technical Guide to RUSLE*. State Office of Michigan, Michigan.
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., Boll, J. (2015). Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of southern Ecuador. *Land degradation and development*, 26(6), 565-573.
- Oğuz, I., Susam, T., Kocyigit, R., Bicak, H., Demirkiran, O., Demir, S. (2019). Estimation of soil erosion and river sediment yield in a rural basin of North Anatolia, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4).
- Okacha, A., Salhi, A., Arari, K., El Badaoui, K., Lahrichi, K. (2023). Soil erosion assessment using the RUSLE model for better planning: a case study from Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-9. [doi.org/10.1007/s40808-023-01731-4](https://doi.org/10.1007/s40808-023-01731-4).
- Ozsoy, G., Aksoy, E., and Karaata, E. U. (2013). Estimating soil loss of Doganci Dam watershed, northwest Turkey, and lifetime analysis of Doganci Dam using multi-year remotely sensed data and GIS techniques. *Soil-Water Journal*, 2(1), 927-934.
- Ozsoy, G., and Aksoy, E. (2015). Prediction of soil loss differences and sediment accumulation at the Nilufer Creek watershed, Turkey, using multiyear satellite data in a GIS. *Geocarto international*, 30(8), 843-857.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A., and Clément, J. P. (2013). A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as a strategic policy support system. *Land use policy*, 32, pp 281-291.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A., Clément, J. P. (2013). A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as a strategic policy support system. *Land use policy*, 32, 281-291.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Government Printing. ISBN: 0-16-048938-5.

- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 977-988.
- Shoshany, M., Goldshleger, N., Chudnovsky, A. (2013). Monitoring of agricultural soil degradation by remote-sensing methods: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17), 6152-6181.
- Subarna, D., Purwanto, M. Y. J., Murtiaksono, K. Wiweka (2014). The relationship between monthly rainfall and elevation in the Cisangkuy watershed Bandung regency. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 3(2), 55-60. ISSN (Online):2278-5299.
- Teh, S. H. (2011). Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malaysia for hydropower development (Doctoral dissertation). <https://skemman.is/handle/1946/7751>.
- Thomas, J., Joseph, S., Thirvikramji, K. P. (2018). Assessment of soil erosion in a monsoon-dominated mountain river basin in India using RUSLE-SDR and AHP. *Hydrological Sciences Journal*, 63(4), 542-560.
- TPS, FAO. (2015). Status of the world's soil resources (SWSR)—Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 650.
- USDA, (1972). Sediment sources, yields, and delivery ratios, In *National Engineering Handbook*. Section 3 Sedimentation, USDA, Washington DC. <https://directives.sc.egov.usda.gov/ViewRollUp.aspx?hid=17092&sf=1>
- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk: assessment in Europe. [https://www.preventionweb.net/files/1581\\_ereurnew2.pdf](https://www.preventionweb.net/files/1581_ereurnew2.pdf)
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246-249.
- Wischmeier W. H., and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science, and Education Administration.
- Zhu, H. Y., and Jia, S. (2004). Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data. *Progress in Geography*, 23(2), 34-42.

## References

### References (in Persian)

- Refahi, H., (1375). Soil Erosion By Water, Conservation. Tehran University Publication, 551 p, [https://press.ut.ac.ir/book\\_1854.html](https://press.ut.ac.ir/book_1854.html) [In Persian]
- Alizadeh A., (2001). Principles of Applied Hydrology. Astan Quds Razavi Publications, 735 pages. <https://www.adinehbook.com/gp/product/9646582559> . [In Persian]

### References (in English)

- Ahmad, W. S., Jamal, S., Taqi, M., El-Hamid, H. T. A., Norboo, J. (2022). Estimation of soil erosion and sediment yield concentrations in Dudhganga watershed of Kashmir Valley using RUSLE and SDR model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges, and limitations of soil erosion modeling. *International soil and water conservation research*, 7(3), 203-225.
- Amore, E., Modica, C., Nearing, M. A., Santoro, V. C. (2004). Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology*, 293(1-4), pp 100-114.
- Amsalu, T., Mengaw, A. (2014). GIS-based soil loss estimation using rusle model: the case of jabi tehinan woreda, ANRS, Ethiopia. *Natural Resources*, 2014. doi.org/10.4236/nr.2014.511054.
- Anache, J. A., Bacchi, C. G., Alves-Sobrinho, T. (2014). Modeling of (R) USLE C-factor for pasture as a function of normalized difference vegetation index. *Eur Int J Sci Technol*, 3(9), 214-221.
- Ashiagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., Aabeyir, R. (2013). Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools. *Int J Remote Sens Geosci*, 2(4), 1-17.
- Azizian, A., Koohi, S. (2021). The effects of applying different DEM resolutions, DEM sources, and flow tracing algorithms on LS factor and sediment yield estimation using USLE in Barajin River basin (BRB), Iran. *Paddy and Water Environment*, 19, 453-468.
- Belasri, A., Lakhouli, A. (2016). Estimation of soil erosion risk using the universal soil loss equation (USLE) and geo-information technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8(01), 98.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086.
- Bhattacharya, R. K., Chatterjee, N. D., Das, K. (2020). Estimation of erosion susceptibility and sediment yield in the ephemeral channel using RUSLE and SDR model: Tropical Plateau Fringe Region, India. *Gully erosion studies from India and surrounding regions*, 163-185.
- Biesemans, J., Van Meirvenne, M., Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1), 35-42.
- Bizuwerk, A., Taddese, G., Getahun, Y. (2003). Application of GIS for modeling soil loss rate in Awash River basin, Ethiopia. *International Livestock Research Institute (ILRI)*, Addis Ababa, Ethiopia, 1-11.
- Bosco, C., de Rigo, D., Dewitte, O., Poesen, J., Panagos, P. (2015). Modeling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(2), 225-245.
- De Rosa, P., Cencetti, C., Fredduzzi, A. (2016). A GRASS tool for the Sediment Delivery Ratio mapping. *PeerJ Preprints*, 4, e2227v1.
- De Vente, J., Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-science reviews*, 71(1-2), 95-125.
- Drzewiecki, W., Wężyk, P., Pierzchalski, M., Szafrńska, B. (2014). Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (Poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. *Pure and Applied Geophysics*, 171, 867-895.
- Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., Harijani, F. M. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), pp 1-17.
- Ganasri, B. P., Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961.
- Gitas, I. Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G. N., Karydas, C. G. (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSel proceedings*, 8(1), 40-52.
- Ghosal, K., Das Bhattacharya, S. (2020). A review of the RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 689-707.
- Guduru, J. U., Jilo, N. B. (2023). Assessment of rainfall-induced soil erosion rate and severity analysis for prioritization of conservation measures using RUSLE and Multi-Criteria Evaluations Technique at Gidabo watershed, Rift Valley Basin, Ethiopia. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 23(1), 30-47.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Jahun, B. G., Ibrahim, R., Dlamini, N. S., Musa, S. M. (2015). Review of soil erosion assessment using the RUSLE model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(9), 36-47.

- Merchant, J. W. (2000). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(4), 311-311.
- Kamuju, N. (2016). Soil erosion and sediment yield analysis using prototype and enhanced SATEEC GIS system models. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(1), 1471-1482.
- Kanito, D., Bedadi, B., Feyissa, S. (2023). Sediment yield estimation in GIS environment using RUSLE and SDR model in Southern Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2167614.
- Karaburun, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 77-85.
- KUO, K. T., SEKIYAMA, A., MIHARA, M. (2016). Determining the C factor of universal soil loss equation (USLE) based on remote sensing. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7(2), 154-161.
- Luca, F., Buttafuoco, G., & Terranova, O. (2018). GIS and Soil. In *Comprehensive geographic information systems* (Vol. 3, pp. 37-50). Elsevier Inc..
- Luvai, A., Obiero, J., Omuto, C. (2022). Soil loss assessment using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022. [doi.org/10.1155/2022/2122554](https://doi.org/10.1155/2022/2122554).
- Mahboub, V. (2012). On weighted total least-squares for geodetic transformations. *Journal of geodesy*, 86(5), pp 359-367.
- Ma, L., Chi, X., Zuo, C. (2012, August). Evaluation of interpolation models for rainfall erosivity on a large scale. In *2012 First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* (pp. 1-5). IEEE.
- Markose, V. J., Jayappa, K. S. (2016). Soil loss estimation and prioritization of subwatersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 188(4), pp 225.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental modeling and software*, 18(8-9), 761-799.
- Moisa, M. B., Babu, A., Getahun, K. (2023). Integration of geospatial technologies with RUSLE model for analysis of soil erosion in response to land use/land cover dynamics: a case of Jere watershed, Western Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 13.
- NRCS: USDA, (2002). *Technical Guide to RUSLE*. State Office of Michigan, Michigan.
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., Boll, J. (2015). Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of southern Ecuador. *Land degradation and development*, 26(6), 565-573.
- Oğuz, I., Susam, T., Kocyigit, R., Bicak, H., Demirkiran, O., Demir, S. (2019). Estimation of soil erosion and river sediment yield in a rural basin of North Anatolia, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4).
- Okacha, A., Salhi, A., Arari, K., El Badaoui, K., Lahrichi, K. (2023). Soil erosion assessment using the RUSLE model for better planning: a case study from Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-9. [doi.org/10.1007/s40808-023-01731-4](https://doi.org/10.1007/s40808-023-01731-4).
- Ozsoy, G., Aksoy, E., and Karaata, E. U. (2013). Estimating soil loss of Doganci Dam watershed, northwest Turkey, and lifetime analysis of Doganci Dam using multi-year remotely sensed data and GIS techniques. *Soil-Water Journal*, 2(1), 927-934.
- Ozsoy, G., and Aksoy, E. (2015). Prediction of soil loss differences and sediment accumulation at the Nilufer Creek watershed, Turkey, using multiyear satellite data in a GIS. *Geocarto international*, 30(8), 843-857.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A., and Clément, J. P. (2013). A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as a strategic policy support system. *Land use policy*, 32, pp 281-291.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A., Clément, J. P. (2013). A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as a strategic policy support system. *Land use policy*, 32, 281-291.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Government Printing. ISBN: 0-16-048938-5.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 977-988.
- Shoshany, M., Goldshleger, N., Chudnovsky, A. (2013). Monitoring of agricultural soil degradation by remote-sensing methods: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17), 6152-6181.
- Subarna, D., Purwanto, M. Y. J., Murti Laksono, K. Wiweka (2014). The relationship between monthly rainfall and elevation in the Cisangkuy watershed Bandung regency. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 3(2), 55-60. ISSN (Online):2278-5299.
- Teh, S. H. (2011). *Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malaysia for hydropower development* (Doctoral dissertation). <https://skemman.is/handle/1946/7751>.
- Thomas, J., Joseph, S., Thirvikramji, K. P. (2018). Assessment of soil erosion in a monsoon-dominated mountain river basin in India using RUSLE-SDR and AHP. *Hydrological Sciences Journal*, 63(4), 542-560.
- TPS, FAO. (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR)—Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 650.
- USDA, (1972). *Sediment sources, yields, and delivery ratios*, In *National Engineering Handbook*. Section 3 Sedimentation, USDA, Washington DC. <https://directives.sc.gov.usda.gov/ViewRollUp.aspx?hid=17092&sf=1>

- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk: assessment in Europe. [https://www.preventionweb.net/files/1581\\_ereurnew2.pdf](https://www.preventionweb.net/files/1581_ereurnew2.pdf)
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Journal, 23(3), 246-249.
- Wischmeier W. H., and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science, and Education Administration.
- Zhu, H. Y., and Jia, S. (2004). Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data. Progress in Geography, 23(2), 34-42.