



Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province)

 Saleh Arekhi^{*a}, Sharam Barani^b

^{a†}Associate Professor of Physical Geography, University of Golestan, Gorgan, Iran

^bMS.c Student of Environmental Hazard, University of Golestan, Gorgan, Iran

Received: 11 February 2022

Revised: 3 May 2022

Accepted: 27 July 2022

Abstract

Soil erosion is one of the most important environmental problems in the world, which has created many problems for human societies. Qualitative and quantitative assessment of erosion using experimental models for estimating erosion and sediment is one of the solutions through which soil erosion can be controlled to some extent and its amount can be minimized. The present study was conducted to compare EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment in Chamgardalan watershed of Ilam province. In this regard, the factors affecting erosion include rain erosivity, soil erodibility, topography, vegetation and soil conservation operations as well as observable erosion coefficients, rock and soil susceptibility to erosion, land use and average slope, used as a percentage used in the mentioned models and finally the amount of erosion and sediment produced was calculated according to the proposed models and compared with the amount observed in the sedimentation station of Chamgardalan watershed. The results show that the estimated sediment rate of RUSLE model was 16.37 tons per hectare per year and in the EPM method was 21.49 tons per hectare per year, which is closer to the estimated value of RUSLE. Observed sediment of 16.58 tons per hectare per year, the efficiency of RUSLE model in estimating sediment in the study area is higher. Finally, it is recommended to use the EPM model for the initial phases of justification, overview and identification studies and RUSLE method for detailed and more accurate studies of erosion and sedimentation of the watershed.

Keywords: Soil erosion, Sediment estimation, RUSLE model, EPM model, Cham Gardalan watershed, Ilam province

*.Corresponding author: Saleh Arekhi

Email: S.arekhi@gu.ac.ir

Tel:+989113690648

How to cite this Article: Arekhi, S., & Barani, S. (2024). Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 342-374.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)



مقایسه مدل‌های RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه چم‌گردلان استان ایلام)

صالح آرخی^۱ - دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

شهرام بارانی - دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۵

چکیده

ارزیابی کیفی و کمی فرسایش با استفاده از مدل‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب، یکی از راهکارهایی است که از طریق آن می‌توان فرسایش خاک را تا حدودی کنترل و مقدار آن را به حداقل رساند. پژوهش حاضر به منظور مقایسه دو مدل EPM و RUSLE در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه چم‌گردلان استان ایلام انجام شده است. در این راستا، از عوامل مؤثر بر فرسایش شامل فرسایش باران، فرسایش پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظت خاک و همچنین ضرایب فرسایش مشاهده‌ای، حساسیت سنگ و خاک به فرسایش، استفاده از زمین یا کاربری زمین، شیب متوسط زمین به درصد مورد استفاده در مدل‌های یاد شده استفاده شده و در نهایت مقدار فرسایش و رسوب تولید شده با توجه به مدل‌های ارائه شده محاسبه و با مقدار مشاهده شده در ایستگاه رسوب‌سنجی حوضه چم‌گردلان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میزان رسوب برآوردی مدل RUSLE، ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال و در روش EPM، ۲۱/۴۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی RUSLE به مقدار رسوب مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال، کارایی مدل RUSLE در برآورد رسوب منطقه مورد مطالعه بیش‌تر است. در نهایت توصیه می‌شود، برای فازهای اولیه مطالعات توجیهی، اجمالی و شناسایی از مدل EPM و برای مطالعات تفصیلی و دقیق‌تر برآورد فرسایش و رسوب حوضه از روش RUSLE بهره گرفت.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، برآورد رسوب، مدل RUSLE، مدل EPM، حوضه چم‌گردلان، استان ایلام

مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین عناصر طبیعت و با ارزش‌ترین بستر تولید برای بشر است. مهم‌ترین عاملی که وجود خاک را تهدید می‌کند، فرسایش است. امروزه با پیشرفت دانش و فن و با ماشینی شدن جهان روبرو هستیم که بیش از هر زمان دیگر منابع آب و خاک را تهدید می‌کنند، به‌صورتی که هر ساله شاهد تولید میلیون‌ها تن رسوب در سراسر دنیا هستیم (Rafahi & Nemeti, 1995)، که فرسایش خاک بر اثر عامل آب بیش از ۵۶ درصد آن را شامل می‌شود (Elirehema, 2001). روش‌های اندازه‌گیری شدت فرسایش در حوضه‌های آبخیز شامل روش‌های تجربی، روش‌های ریاضی و نمونه‌برداری رسوب است (Galal, Hegazy, & Alghailani, 2016). روش‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب در ایران شامل معادله جهانی تلفات خاک (USLE)^۱ (Wischmeier & Smith, 1978)، معادله اصلاحی تلفات خاک (MUSLE)^۲ (Ferro, Giordano, & Lovino, 1991)، یا معادله تغییر یافته تلفات خاک (RUSLE)^۳ (Renard, Foster, 1997) و (Weesies, McCool, & Yoder, 1997) و EPM^۴ (Gavrilovic, 1988) مهم‌ترین این روش‌ها می‌باشند. در زمینه کاربرد مدل‌های فرسایش در دنیا تحقیقات متعددی صورت گرفته که در ادامه به برخی اشاره می‌گردد. Milevski (2008) و Tazioli (2009) به مناسب بودن روش EPM در برآورد فرسایش اشاره نمودند. Bahrawi et al. (2016) در بررسی خطر فرسایش در عربستان سعودی، تکنیک‌های سنجش‌ازدور و مدل RUSLE را تکنیک مناسبی جهت برآورد رسوب اعلام نمودند. Boggs, Devonport, Evans & Puig (2001)، خطر فرسایش خاک را بر اساس مدل تجدید نظر شده RUSLE و با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع^۵ و نقشه واحدهای زمین برآورد نمودند. Bartsch, Van Miegroet, Boettinger, & Dobrwolski (2002)، برای محاسبه فاکتورهای مورد نیاز RUSLE جهت تعیین خطر فرسایش خاک کمپ ویلیامز، از تکنیک‌های GIS استفاده نمودند. بوگیو^۶ و همکاران (۲۰۱۷) فرسایش خاک را در زمان بارندگی - های طبیعی در شیب‌های با طول متفاوت بر روی خاک لخت اندازه‌گیری کرده و نتایج آن را با مقادیر تخمینی USLE و RUSLE مقایسه کردند. نتایج نشان داد مقادیر تخمینی بخصوص در مدل USLE کمتر از هدر رفت خاک اندازه‌گیری شده بود.

در ایران نیز (Moradi, Ghonchehpour, Amiri, Arzani, Farahpour, Chaeichi, & Khajeh Aldin (2009) و (Nohegar, & Mahmoudi Nejad (2012) در مقایسه مدل EPM و MPSIAC در مناطق خشک ایران اذعان

1- Universal soil Loss equation

2 - Modified Universal soil Loss equation

3 - Revised Universal soil Loss equation

4 - Erosion Potential Model

5 - DEM

6 -Bagio et al

نمودند، مدل MPSIAC دچار پیش‌برآورد و EPM دچار کم‌برآورد در محاسبه نرخ فرسایش و رسوب ویژه می‌گردد و به ترتیب مدل بدبینانه و خوش‌بینانه قلمداد می‌شوند. (Ansari Lari, & Ansari, 2017) و Noori, Siadatmousavi, & Mojaradi, (2017) در بررسی مدل EPM، مدل فوق را مدل مناسبی برای برآورد فرسایش معرفی نمودند. (Vaezi, Abasi, & Abd Haji Maleki, 2017) مدل RUSLE همراه شده با سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی را در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه‌خشک شمال غربی ایران ارزیابی کردند. بر اساس نتایج، میانگین هدر رفت خاک برآوردی ۴۳/۶۸ تن در هکتار در سال بود که ۶/۵۸ برابر بیشتر از میانگین رسوب سالانه (۸/۶۷ تن در هکتار در سال) در عرصه‌های زهکش بود. (Mokhtari, Shafiei, & Rahmani, 2019) میزان فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبریز نورآباد ممسنی برآورد کردند. نتایج نشان داد میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه بر حسب تن در هکتار در سال از ۸ تا ۷۵ متغیر است. (Azimi Sardari, Bazrafshan, Panagupulus, & Rafiei Sardoei, 2019). در مطالعه‌ای حال و آینده مقدار فرسایش خاک را در حوضه آبریز سد استقلال میناب با بهره‌گیری از مدل RUSLE-3D و سناریوهای تغییر اقلیم ارزیابی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در آینده نشان دهنده افزایش آن از ۱۴۶/۷ میلی‌متر به ۱۷۸/۶۱ میلی‌متر در دوره آینده و به تبع آن افزایش عامل فرسایش باران (R) و در نتیجه افزایش نرخ فرسایش خاک در حوزه سد استقلال میناب است. شرایط سطح خاک مانند پوشش گیاهی، زبری و پوشش قطعات سنگی تأثیر مهمی بر روی نرخ نفوذ، فرسایش و رواناب دارد (Nouwakpo, Williams, Al-Hamdan, Weltz, Pierson, & Nearing, 2016).

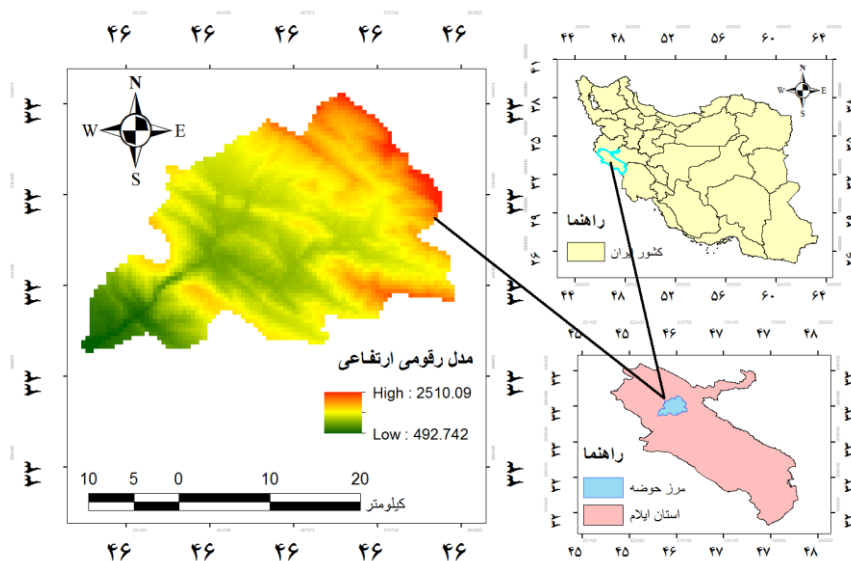
حوضه آبخیز چم‌گردلان ایلام نیز یکی از مناطقی است که متحمل فرسایش فزاینده خاک است و بررسی فرسایش و بار رسوب در آن به‌عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب شهر ایلام از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، جلوگیری از این فرسایش، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل جهت حفاظت از منابع طبیعی به شمار می‌رود (Morgan, 1995). در خصوص مطالعات و تحقیقات انجام شده در حوضه چم‌گردلان ایلام می‌توان به رساله کارشناسی ارشد (Azami, 2001) تحت عنوان تعیین روش مناسب برآورد بار معلق رسوبی در حوضه سد چم‌گردلان ایلام، تخمین فرسایش و رسوب با استفاده از روش‌های کیفی ژئومورفولوژیکی (واحدهای کاری) و EPM و مقایسه آن با آمار خروجی رسوب در حوضه سد چم‌گردلان ایلام (Shahbazi, 1999)، (Asgari, Servati, & Jafari, 2008) تحت عنوان برآورد فرسایش و رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC اشاره کرد.

در دهه‌های اخیر مخاطرات محیطی اعم از طبیعی و انسانی مانند فرسایش خاک از جمله مسائلی است که در سطح جهان و ایران با آن روبرو هستند و سالانه هزینه‌های کلانی هم متحمل می‌شوند. از این رو، ابتدا مخاطرات محیطی از قبیل فرسایش خاک و تولید رسوب باید شناسایی شوند تا مدیران مربوطه با اطلاعات

کامل و دقیقی برای مدیریت و کنترل آن، برنامه‌ریزی مناسبی انجام دهند. از آنجایی که مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب به‌عنوان ابزاری در راستای شناخت اولویت‌های فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز هستند و مدل‌های EPM و RUSLE بیشترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارد، لذا ارزیابی صحت، دقت و نحوه پراکنش طبقات فرسایش و رسوب حاصل از آن‌ها در سطح حوضه می‌تواند کمک مؤثری در نتیجه‌گیری بهتر از مدل‌ها و به‌کارگیری نتایج آن‌ها در پیشگیری از وقوع مخاطرات زیست-محیطی، اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات اجرایی و برنامه‌های حفاظتی داشته باشد که در این زمینه مطالعات زیادی انجام نشده است، لذا هدف از تحقیق فوق، برآورد فرسایش و میزان رسوب در حوضه آبخیز چم-گردلان با استفاده از مدل‌های EPM و RUSLE، مقایسه برآورد این مدل‌ها با آمار رسوب مشاهده‌ای، بررسی راستی آزمایی و اعتبارسنجی دو مدل نسبت به مقدار واقعی و در نهایت معرفی مدل کارآمد در برآورد رسوب در حوضه آبخیز مورد مطالعه است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز چم‌گردلان در جنوب شرقی شهرستان ایلام در موقعیت بین $30^{\circ} 16' 46''$ تا $33^{\circ} 40' 46''$ طول شرقی و $32^{\circ} 23' 33''$ تا $33^{\circ} 40' 51''$ عرض شمالی قرار دارد. مهم‌ترین آبراهه اصلی در این حوضه رود کنجانچم (چم‌گردلان) است که از اتصال دو رود چاوین و گل‌گل با آبراهه متقاطع تشکیل شده است و سد ایلام نیز در محل رودخانه کنجانچم (چم‌گردلان) احداث شده است (Asgari, Servati, & Jafari, 2008). سد مخزنی ایلام، مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب شهر ایلام و روستاهای اطراف می‌باشد و بند انحرافی امیرآباد در خروجی حوضه و همچنین نیاز به منابع آبی فراوان در منطقه به علت وجود شهرستان مهران و اراضی زراعی مرغوب استان در این منطقه در برنامه‌ریزی توسعه اقتصادی و اجتماعی آینده این دو شهرستان نقش بسزایی خواهند داشت. این حوضه بر روی سازندهای سست زمین‌شناسی دوران سوم قرار گرفته، از فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار است (شکل ۱) (Asgari, Servati, & Jafari, 2008).



شکل ۱ موقعیت کشوری و استانی محدوده مورد مطالعه

Fig.1. National and provincial situation of the study area

۳- مواد و روش‌ها

در انجام این تحقیق از مواد زیر با توجه به موضوع، ماهیت تحقیق و روش بکار رفته استفاده شده است: الف- آمار و اطلاعات موجود شامل داده‌های هواشناسی، نقشه‌های خاکشناسی، قابلیت اراضی خاک از منطقه مورد مطالعه در ارتباط با موضوع تحقیق مشتمل بر داده‌ها و اطلاعات مربوط به سازمان هواشناسی و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور جمع‌آوری گردید.

ب- DEM حوضه آبخیز با پیکسل سایز 30×30 به عنوان نقشه پایه

ج- نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس $1:100000$ جهت تهیه نقشه سنگ‌شناسی و وضعیت سازند منطقه

د- تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI (به تاریخ ۱۳۹۸/۵/۱۵) از سایت Earth explorer جهت تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه.

ه- بسته‌های نرم‌افزاری، ENVI5.3، ILWIS3.3 و Excel جهت تجزیه و تحلیل و استخراج اطلاعات و نقشه‌های پایه.

در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS10.3 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن؛ ENVI5.3 جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و Excel جهت به دست آوردن روابط رگرسیونی معادلات بهره-گیری شده است.

روش تحقیق

RUSLE

مدل RUSLE، یک مدل آماری بر پایه فرسایش آبی است که با شش فاکتور فرسایشی زیر [رابطه](#) دارد (Wischmeier & Smith, 1978):

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

در این رابطه، A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R فاکتور فرسایشی باران (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال)، K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر) فاکتور طول شیب، S فاکتور درجه شیب، C فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و نهایتاً P فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد. مقادیر L، S، C و P بدون واحد می‌باشند. در این پژوهش، روش بررسی کلی شامل استفاده از مدل RUSLE در محیط GIS می‌باشد. پاراگراف‌های بعدی نیز درباره نحوه برآورد فاکتورهای P، C، K، R و LS که به ترتیب از داده‌های بارش، نقشه‌های خاک، پردازش تصاویر ماهواره‌ای (فاکتورهای C و P) و مدل رقومی ارتفاعی به دست می‌آیند، توضیح می‌دهد.

فاکتور فرسایشی باران (R)

فرسایشی باران به صورت قدرت تراکمی باران در بروز فرسایش تعریف می‌شود (Lal, 1990). معمول‌ترین شاخص فرسایشی باران، فاکتور R مربوط به مدل‌های USLE (Yu & Rosewell, 1996) و RUSLE (Renard & Freimund, 1994) می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، فاکتور R همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد. فاکتور R برای دوره‌های مختلف، از حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I30) به دست می‌آید. از آنجایی که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، غالباً از مقادیر متوسط بارندگی سالیانه و ماهیانه، جهت برآورد فاکتور R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود. برای محاسبه فاکتور R، بعد از تعیین ایستگاه‌های شاخص در منطقه مورد مطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها و در دوره زمانی مورد مطالعه بازسازی گردید (بر اساس اطلاعات ایستگاه ایلام که کامل‌ترین و بیشترین آمار را داشته است). در مرحله بعد با استفاده از معادله ذیل، شاخص فورنیر و فاکتور R برای تمام ایستگاه‌ها به دست آمد. [رابطه](#) شاخص فورنیر، F، به صورت ذیل است:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad (2)$$

در این معادله، P_i متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه i و p متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. در این مطالعه، با استفاده از معادله (۲)، شاخص فورنیر برای تمامی ایستگاه‌ها، محاسبه گردید و سپس با جایگذاری

شاخص فورنیر (رابطه ۲) در روابط زیر که توسط Renard & Freimund (1994) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌های شاخص برآورد شد.

$$R - \text{factor} = (0.07397 \times F^{1.847} / 17.2) \quad (۳) \quad \text{اگر } F < 55 \text{ mm}$$

$$R - \text{factor} = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2 / 17.2) \quad (۴) \quad \text{اگر } F \geq 55 \text{ mm}$$

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)، سرعت فرسایش‌پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه‌گیری می‌شود و اغلب با استفاده از خصوصیات خاک تعیین می‌شود. اگرچه فاکتور K با بافت خاک، میزان ماده آلی خاک، نفوذپذیری و سایر فاکتورها رابطه دارد، اما عمدتاً با نوع تیپ خاک همبستگی بالایی دارد. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نمودار تعیین می‌شود. این نمودار متشکل از پنج پارامتر پروفیل خاک می‌باشد. رابطه جبری این نمودار به صورت ذیل است:

$$K = 2.73 \times 10^{-6} m^{1.14} (12 - a) + 3.25 \times 10^{-2} (b - 2) + 2.5 \times 10^{-2} (c - 3)$$

در این معادله، M قطر ذره (درصدسیلت + درصد شن خیلی ریز) × (درصد رس - ۱۰۰)، a درصد ماده آلی، b کد ساختمان خاک و c کلاسه نفوذپذیری پروفیل خاک می‌باشند. در این مطالعه، تمام پارامترهای اشاره شده در بالا از گزارش تفصیلی حوضه آبخیز چم‌گردلان ایلام استخراج و نقشه فاکتور K در محیط GIS تهیه شد.

فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

فاکتورهای L و S در مدل RUSLE، تأثیر توپوگرافی را بر روی فرسایش خاک نشان می‌دهد. ثابت شده که افزایش در طول شیب و درجه شیب می‌تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود (Haan, Barfield, & Hayes, 1994) و از اینها گذشته فرسایش خالص خاک نسبت به تغییرات در درجه شیب در مقابل طول شیب حساس‌تر است (McCool, Brown, & Foster, 1987). طول شیب فاصله بین نقطه بالایی آغاز سرآشینی تا نقطه‌ای است که شیب به حداقل خود می‌رسد و در این نقطه رسوبات ته‌نشین می‌شوند. تأثیرات ویژه توپوگرافی روی فرسایش خاک توسط فاکتور LS (بدون واحد) (طول شیب (L) و درجه شیب (S)) برآورد می‌شود. برای محاسبه فاکتورهای L و S از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود (Moore & Wilson, 1993):

$$S = \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (۷) \quad L = 1.4 \left[\frac{As}{22.13} \right]^{0.4} \quad (۶)$$

در این معادله As مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی (m²/m) و β زاویه شیب برحسب درجه است. در این مطالعه، نقشه فاکتور LS از نقشه DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر از وب سایت

سازمان نقشه‌برداری آمریکا به آدرس <http://earthexplorer.usgs.gov> دانلود و با استفاده از اکستنشن TOPOCROP آرک‌جی‌آی اس ۱۰.۳ استخراج شد که براساس کار Moore & Wilson (1993) توسعه یافته است.

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های کاشتی در مدیریت کشاورزی و اثر پوشش‌های درختی، درختچه‌ای، علفی و زمینی روی کاهش فرسایش خاک می‌باشد. با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می‌یابد. (Benkobi, Trlica, & Smith (1994) و Biesemans, Meirvenne, & Gabriels (2000) گزارش کردند، فاکتور پوشش گیاهی به همراه درجه شیب و طول شیب در فرسایش خاک و تولید رسوب حساسیت بیشتری دارند. در مدل RUSLE، فاکتور پوشش گیاهی (C)، معمولاً بر اساس معادلات تجربی تعیین می‌گردد. اما پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$NDVI = \frac{NIR-IR}{NIR+IR} \quad (8)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین -۱ و +۱ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون‌قرمز نزدیک (NIR) (باند ۵ لندست) در مقایسه با بخش طیف مرئی (قرمز، باند ۴ لندست) انعکاس بیشتری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی از قبیل مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین +۰/۱ و -۰/۱ را نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد. بعد از انجام تبدیل خطی معکوس از نمونه‌های تعلیمی، رابطه بین C و NDVI می‌تواند به صورت زیر ایجاد گردد (Lin, 1997):

$$C = (1 - NDVI)/2 \quad (9)$$

در نتیجه مقدار C در هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد.

فاکتور عملیات حفاظتی (P)

در این مطالعه، مقادیر فاکتور P از طریق طبقه‌بندی مجدد هر تیپ پوشش زمین و بر اساس مقادیر داده شده در جدول‌های ۱ و ۲ تعیین شدند (Deore, 2006). با توجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچ‌گونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، ارزش P تنها براساس کاربری و پوشش اراضی مختلف تعیین شده است (جدول ۱ و ۲).

جدول ۱- ارزش P برای کاربری و پوشش اراضی مختلف (Deore, 2006)

ارزش عددی P	کلاس کاربری/پوشش اراضی
۱	اراضی بایر
۰/۱۲	نیشکر
۰/۱	گندم
۰/۸	جنگل تنک
۱	اراضی آیش
۰/۸	جنگل با تراکم متوسط
۰/۸	جنگل باز
۱	بستر رودخانه

جدول ۲- ارزش P برای عملیات حفاظتی مختلف (Deore, 2006)

ارزش عددی P				شیب (درصد)
بدون اقدامات حفاظتی	تراس‌بندی	کشت نواری	کشت روی خطوط تراز	
۱	-	-	۰/۸	۰-۱
۱	-	۰/۳	۰/۶	۱-۲
۱	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۲-۷
۱	۰/۱۲	۰/۳	۰/۶	۷-۱۲
۱	۰/۱۶	۰/۴	۰/۸	۱۲-۱۸
۱	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۹	۱۸-۲۴

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR)

در این مطالعه، سه روش بر اساس مساحت (USDA, 1975؛ Boyce, 1975؛ Vanoni, 1975) به منظور محاسبه نقشه نسبت تحویل رسوب مورد استفاده قرار گرفتند. معادلات مربوط به این سه روش به شرح زیر می‌باشد:

۱- مدل وانونی (ارائه شده در سال ۱۹۷۵) به شرح رابطه ۱۰

$$SDR = 0.4724A^{-0.125} \quad (10)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

۲- مدل ارائه شده توسط USDA در سال ۱۹۷۲ به شرح **رابطه ۱۱**

$$SDR = 0.5656A^{-0.11} \quad (11)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

۳- مدل بویس (۱۹۷۵) که به شرح **رابطه ۱۲** است

$$SDR = 0.3750A^{-0.2382} \quad (12)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

مدل EPM

در روش EPM چهار مشخصه شامل ضریب فرسایش حوضه آبخیز (ψ)، ضریب استفاده از زمین (Xa)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه (I) در واحدهای همگن موردبررسی قرار گرفت. در هر یک از واحدهای همگن بر اساس این چهار عامل، مقدار (Z) یا ضریب شدت فرسایش از **رابطه ۱۳** محاسبه گردید (Gavrilovic, 1988).

$$Z = Y \cdot Xa(\psi + I^{0.5}) \quad (13)$$

Y : عامل حساسیت خاک و سنگ به فرسایش

Xa : عامل استفاده از زمین

ψ : عامل فرسایش

I : عامل شیب زمین به درصد

با محاسبه ضریب شدت فرسایش و قرار دادن مقدار آن در جدول استاندارد (جدول ۳) (Gavrilovic, 1988) که بر اساس شدت فرسایش و ضریب شدت فرسایش (Z) تنظیم شده است، طبقه فرسایشی هر یک از واحدهای همگن مشخص می‌شود.

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت فرسایش

Table 3- Erosion intensity classification

مقدار متوسط Z	محدوده Z	شدت فرسایش	کلاس فرسایش
۱/۲۵	> 1	خیلی شدید	V
۰/۸۵	$1 > Z > 0/75$	شدید	IV
۰/۵۵	$0/7 > Z > 0/41$	متوسط	III
۰/۳	$0/4 > Z > 0/2$	کم	II
۰/۱	$Z < 0/19$	خیلی کم	I

در روش EPM برای تخمین متوسط سالانه فرسایش ویژه که در حقیقت میزان فرسایش را در واحد سطح (هکتار یا کیلومتر مربع) حوضه را نشان می‌دهد، از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود.

$$W_{SP} = T \cdot H \cdot \pi \cdot Z^{1.5} \quad (14)$$

که در آن:

H: بارندگی متوسط سالانه به میلی‌متر، π : عدد ثابت پی برابر با ۳/۱۴
T: ضریب درجه حرارت که از رابطه ۱۵ به دست می‌آید (Gavriloic, 1988):

$$T = \left(\frac{t}{10} + 0.1\right)^{0.5} \quad (15)$$

که در آن:

t = میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه به درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بعد از محاسبه فرسایش ویژه، مقدار فرسایش سالانه برای حوضه مورد مطالعه با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$W_s = W_{sp} \times A \quad (16)$$

که در آن

W_s : فرسایش کل حوضه بر حسب مترمکعب در سال،

A: مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع

W_{sp} : محاسبه شده در رابطه فوق بیانگر مقدار خاکی است که از بستر خود جدا کرده و انتقال یافته است؛ اما همه این مواد فرسایش یافته به خروجی حوضه نمی‌رسد و آن مقدار خاک فرسایش یافته که به رسوب خروجی تبدیل خواهد شد، بستگی به متغیرهای مختلفی دارد که در واقع بر نسبت رسوب‌دهی حوضه تأثیر می‌گذارند. در این مدل از ضریبی برای تبدیل میزان فرسایش به رسوب استفاده می‌شود که ضریب رسوب-دهی حوضه نامیده می‌شود.

محاسبه ضریب رسوب‌دهی حوضه

با اعمال این ضریب معین می‌شود که چه میزان مواد رسوبی از نقطه خروجی حوضه خارج خواهد شد. ضریب رسوب‌دهی در روش EPM براساس رابطه ۱۷ (Gavriloic, 1988) و با استفاده از عواملی مثل محیط و ارتفاع و طول حوضه به دست می‌آید:

$$Ru = 4 \times (O \times D)^{0.5} / [L + 10] \quad (17)$$

که در این رابطه:

Ru: ضریب رسوب‌دهی حوضه، O: محیط حوضه، به کیلومتر، L: طول حوضه آبخیز، کیلومتر، D: اختلاف ارتفاع بین ارتفاع متوسط و ارتفاع نقطه خروجی حوضه، به کیلومتر که از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$D = D_{av} - D_0 \quad (18)$$

که در این رابطه:

D_{av} : ارتفاع متوسط حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر

D_0 : ارتفاع نقطه خروجی در رودخانه بر حسب کیلومتر است؛ بنابراین مقدار D را پس از محاسبه، در رابطه ۵ قرار داده و ضریب رسوب‌دهی حوضه محاسبه می‌شود. سپس رسوب ویژه از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود (Gavrilovic, 1988).

$$G_{sp} = W_{sp} \times R_u \quad (19)$$

که در این

G_{sp} : تولید رسوب ویژه، بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال

W_{sp} : فرسایش ویژه، بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال

R_u : ضریب رسوب‌دهی حوضه که از رابطه ۱۷ به دست می‌آید (Gavrilovic, 1988)

و در نهایت رسوب کل حوضه از رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$G_s = G_{sp} \times A \quad (20)$$

که در این رابطه:

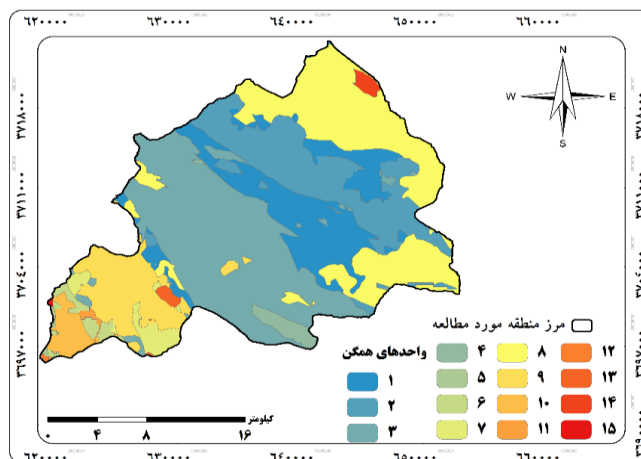
G_s : رسوب کل بر حسب مترمکعب در سال در حوضه،

A : مساحت حوضه آبخیز بر حسب کیلومترمربع می‌باشد.

در این تحقیق برای برآورد شدت فرسایش و پتانسیل رسوب‌دهی حوضه آبخیز مورد مطالعه از روش EPM و تکنیک GIS استفاده شده است. بعد از وارد کردن نقشه‌ها به محیط نرم‌افزار ArcGIS و زمین مرجع کردن آن‌ها، لایه‌های مورد نیاز رقومی و پایگاه اطلاعاتی برای آن‌ها ایجاد شد. سپس با استفاده از مدل EPM، عوامل مؤثر در فرسایش در واحدهای همگن (شکل ۲) ارزیابی و امتیازبندی شد. در این روش که در حقیقت ضریب شدت فرسایش است، چهار عامل ضریب فرسایش حوضه (ψ)، ضریب استفاده از زمین یا کاربری اراضی (X_a)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه آبخیز (I) در واحدهای همگن و در نهایت در کل حوضه مورد مطالعه قرار گرفت. در هر یک از واحدهای همگن، بر اساس چهار عامل فوق، مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش، متوسط سالانه فرسایش ویژه، فرسایش کل، رسوب ویژه و رسوب کل تولید شده در طول سال در سطح واحدهای همگن و بالاخره در کل حوضه آبخیز محاسبه گردیده است.

همان‌طور که ذکر شد، برای سهولت و دقت کار در به دست آوردن میزان فرسایش و تولید رسوب، ابتدا کل حوضه آبخیز چم‌گردلان، به واحدهای همگن تقسیم شد (۱۵ واحد همگن). سپس عوامل مؤثر در تولید

رسوب در هر یک از واحدهای همگن مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله آخر، میزان فرسایش و تولید رسوب با استفاده از فرمول‌ها و ضرایب مربوطه به دست آمد که در زیر به بررسی هر یک از عوامل چهارگانه خواهیم پرداخت.



شکل ۲- واحدهای همگن

Fig.2. Homogeneous units

ارزیابی کارایی مدل‌ها

ارزیابی دقت مدل برای اطمینان از صحت برآوردها ضروری است. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از داده‌های برآوردی رسوب و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری رسوب در خروجی حوضه انجام گرفت. همچنین کارایی مدل که اغلب برای کالیبراسیون، صحت سنجی و برآورد دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد از رابطه زیر تعیین شد (رابطه ۲۱). پس از برآورد رسوبات توسط مدل مذکور، برای ارزیابی کارایی مدل بکار رفته از رابطه زیر استفاده گردید.

$$R_E = (|S_O - S_E|/S_O) \times 100 \quad (21)$$

R_E = درصد خطای نسبی مدل،

S_O = مقدار رسوب مشاهده‌ای،

S_E = مقدار رسوب برآوردی

مقدار R_E بیانگر میانگین انحراف است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به بیان دیگر مشخص می‌کند که مدل، متغیر مورد نظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند. از نظر تئوری هرگاه این دو مقدار برابر با صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صد در صد بوده و مقدار برآورد شده یک کمیت، دقیقاً برابر با مقدار واقعی آن است.

نتایج و بحث

مدل **RUSLE**

شاخص‌های فورنیر و مقادیر فرساینده‌گی باران با استفاده از معادلات (۲)، (۳) و (۴) برای ۱۸ ایستگاه در طی دوره آماری ۲۲ ساله (۱۳۷۶-۱۳۹۸) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده شاخص فورنیر و فاکتور **R** در جدول ۴، نشان داده شده است. ابتدا بر اساس رابطه بین ارتفاع و بارش و سپس بر اساس رابطه بارش و فاکتور **R**، نقشه فاکتور **R** حوضه چم‌گردلان در محیط نرم‌افزار ILWIS3.3 به دست آمده است (شکل ۳). مقدار متوسط فاکتور **R** از ۱۳۶ تا ۳۹۶ (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال) متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب ۲۶۴ و ۴۴ (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال) می‌باشد. فرساینده‌گی باران در شمال‌شرقی و جنوب‌غربی حوضه مورد مطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیش‌تر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به عبارت دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور **R** دارد و از شمال-غرب و جنوب‌غرب به مرکز حوضه داشته است.

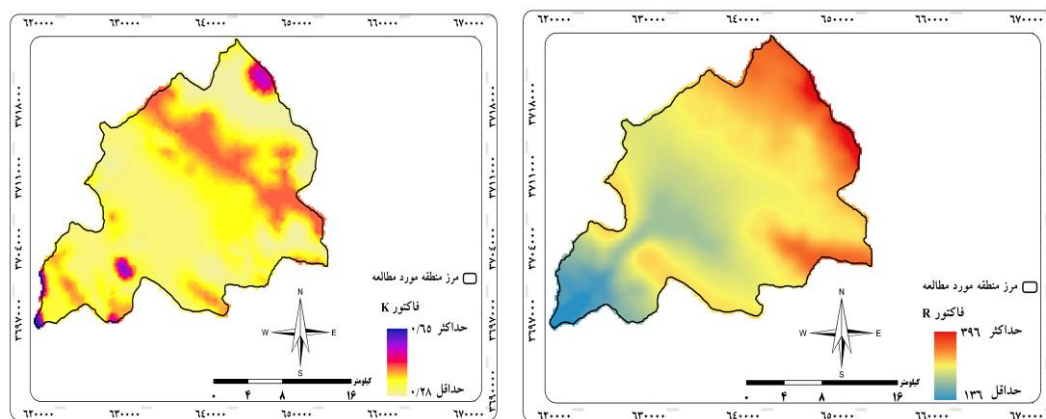
فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (**K**)

جهت محاسبه فاکتور **K** اطلاعات مورد نیاز از نقشه‌های تفصیلی حوضه چم‌گردلان و لایه‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی استفاده شده که متوسط مقدار **K** در حوزه مورد مطالعه بین ۰/۲۸ تا ۰/۶۶ متغیر بوده میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۰۵ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر می‌باشد. شکل ۴ توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۴- محاسبه و برآورد **F** و **R** برای ایستگاه‌های بارندگیTable 4- Calculation and estimation of **F** and **R** for rainfall stations

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع (متر)	بارندگی (میلی‌متر)	F	R مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال
ارکواز	۶۴۸۴۷۸	۳۶۹۵۸۱۹	۱۲۹۰	۶۴۳/۵۰	۱۱۶/۵۴	۳۴۱/۰۲
صالح‌آباد	۶۱۰۴۰۸	۳۷۰۴۱۲۹	۶۲۰	۳۶۳/۷۰	۸۷/۶۳	۱۸۷/۵۵
سراب کلان	۶۵۹۳۷۹	۳۷۱۶۲۷۰	۹۷۰	۴۸۱	۸۷/۱۷	۱۸۵/۴۶
شهید طالقانی	۶۵۱۹۰۰	۳۶۹۲۵۸۰	۱۴۰۰	۴۷۷/۹۰	۸۱/۳۱	۱۶۰/۱۸
طولاب	۶۴۷۰۴۹	۳۷۱۳۸۸۶	۱۶۰۰	۵۲۲/۵۰	۹۶/۸۶	۲۳۱/۵۱
قلندرعلیا	۶۵۱۰۱۰	۳۷۲۳۹۶۶	۱۰۴۵	۴۹۹/۵۰	۸۷/۴۸	۱۸۶/۸۸
میشخاص	۶۴۲۸۰۴	۳۷۰۸۶۳۶	۱۲۵۰	۵۹۰/۲۰	۱۱۲	۳۱۳/۸۳

۱۷۹/۶۳	۸۵/۸۶	۴۹۴	۱۲۸۰	۳۷۳۳۶۱۷	۶۴۱۸۶۰	کارزان
۱۸۳/۵۵	۸۶/۷۴	۴۷۴	۸۶۰	۳۶۸۰۴۵۹	۶۴۳۳۰۷	گناباد
۳۶۴/۲۸	۱۲۰/۲۸	۷۴۷/۴۰	۱۳۰۰	۳۶۸۶۹۶۹	۶۴۷۳۴۴	درگه
۱۹۶/۲۵	۸۹/۵۴	۴۷۷/۷۰	۱۴۸۰	۳۷۱۵۵۵۴	۶۳۸۷۶۸	قجر
۷۸/۸۶	۵۸/۱۸	۲۸۸/۷۰	۲۹۰	۳۶۶۹۹۸۱	۶۲۶۳۵۵	بان رحمان
۲۱۶/۰۴	۹۳/۷۲	۴۸۶	۱۲۲۰	۳۶۸۹۹۸۴	۶۳۹۰۹۰	سیاه آب
۳۰۷/۴۴	۱۱۰/۹۰	۵۹۷	۱۱۴۰	۳۷۰۳۸۲۶	۶۳۷۷۳۶	گل گل
۱۴۳/۲۰	۷۷/۱۱	۳۴۴/۷۰	۵۶۰	۳۶۹۸۵۱۴	۶۱۷۴۷۱	گلان
۳۱۰/۵۵	۱۱۱/۴۴	۵۹۷/۷۰	۱۳۳۷	۳۷۱۶۸۷۹	۶۳۳۰۱۳	ایلام
۹۷/۴۸	۶۴/۳۰	۲۳۱	۲۰۰	۳۶۶۵۱۰۶	۶۰۸۷۱۳	مهران
۲۳۰/۸۳	۹۶/۷۲	۵۱۱/۵۰	۱۰۹۰	۳۷۰۲۰۹۴	۶۳۳۲۱۴	اما



شکل ۳- نقشه عامل فاکتور R

Fig.3. R factor factor map

شکل ۴- نقشه فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)

Fig.4. Map of Soil erodibility factor (K)

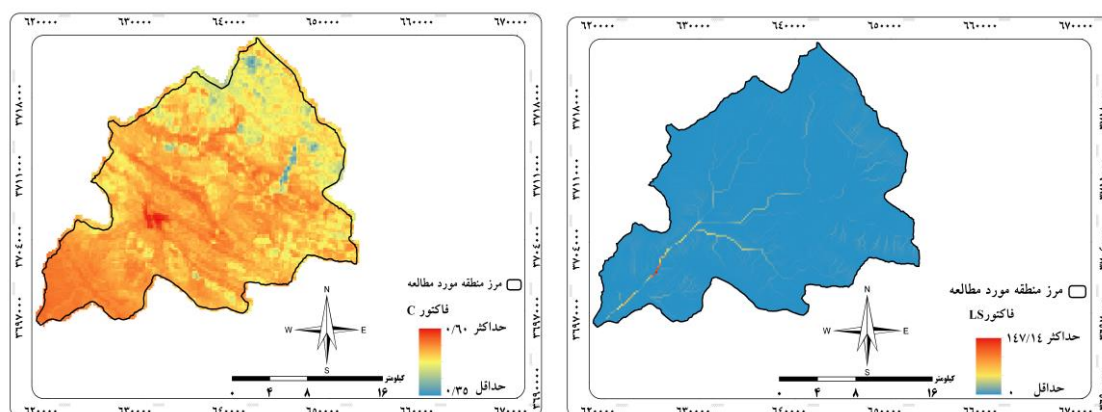
فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به منظور ایجاد طول شیب و درجه شیب (LS) مورد استفاده قرار گرفته است. فاکتور LS به وسیله معادله‌های مربوطه با استفاده از نقشه DEM حوضه و با در نظر گرفتن کنش متقابل بین توپوگرافی و تجمع جریان آب محاسبه شد. همان‌طور که از شکل ۶ برمی‌آید، فاکتور LS در

منطقه مورد مطالعه بین ۰ تا ۱۴۷ در سطح پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن ۲ می باشد. مقادیر LS در بعضی از مناطق با شیب های تند مانند رودخانه ها و یال ها بیش تر است.

فاکتور مدیریت پوشش (C)

نقشه فاکتور C براساس NDVI تهیه گردید (شکل ۶). در حقیقت این فاکتور به طور کامل، رابطه معکوس با NDVI دارد. مقدار فاکتور C بین ۰/۳۵ تا ۰/۶۰ متغیر است و متوسط آن ۰/۵۱ می باشد. نقشه فاکتور C نشان می دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد که با رنگ روشن تر نشان داده شده است.



شکل ۵ نقشه فاکتور طول شیب و درجه شیب (LS)

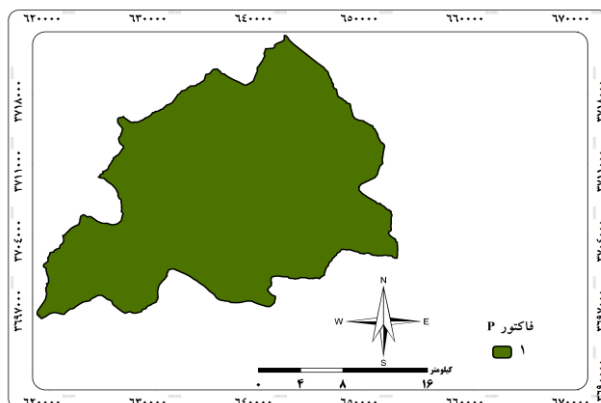
Fig.5. Map of Slope length factor and slope degree (LS)

شکل ۶ نقشه مدیریت پوشش، فاکتور (C)

Fig.6. Coverage Management Map, Invoice (C)

- فاکتور عملیات حفاظتی (P)

با توجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچ گونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، فاکتور عملیات حفاظتی (P)، یک در نظر گرفته می شود (شکل ۷). آمار مربوط به فاکتورهای R، LS، K، C و P در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۷- نقشه عملیات حفاظتی فاکتور (P)

Fig.7. Map of factor protection operations (P)

جدول ۵- آمار مربوط به فاکتورهای معادله RUSLE در حوضه چم‌گردلان ایلام

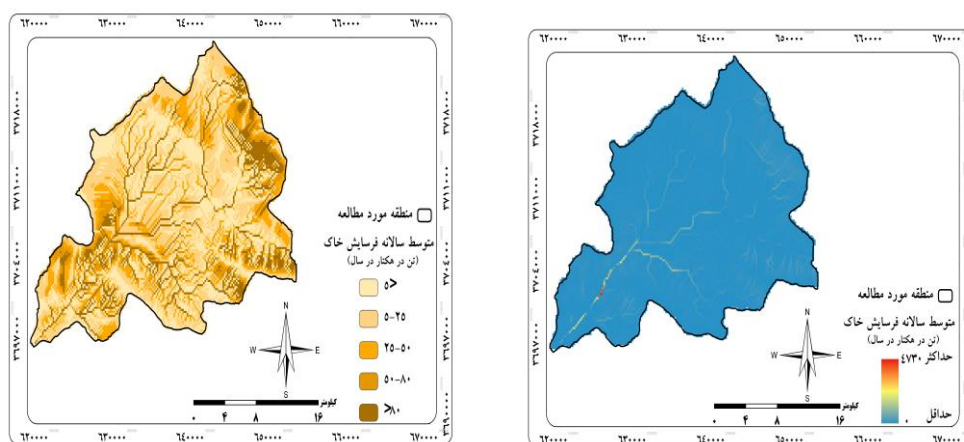
Table 5- Statistics related to the factors of the RUSLE equation in the Cham-Gardlan basin of Ilam

فاکتور P	فاکتور C	فاکتور LS	فاکتور K	فاکتور R	
۱	۰/۳۵	۰	۰/۲۸	۱۳۶	حداقل
۱	/۶۰	۱۴۷	۰/۶۶	۳۹۶	حداکثر
۱	۰/۵۱	۲	۰/۳۵	۲۶۴	میانگین
۰	۰/۰۳	۹	۰/۰۵	۴۴	انحراف معیار

فرسایش سالانه خاک

متوسط فرسایش سالیانه خاک به وسیله ضرب کردن فاکتورهای فرسایشی (R)، فاکتور فرسایش پذیری (k)، فاکتور توپوگرافی (LS)، فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) و فاکتور عملیات حفاظتی (P) در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.3 محاسبه شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه بین صفر و ۴۷۳۰ تن در هکتار در سال تعیین شد. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹). مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه بین صفر (بدون فرسایش) تا ۴۷۳۰ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب برابر با ۸۶/۵۰ و ۳۴۶/۰۰ تن در هکتار در سال تعیین شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۸ نشان داده شده است. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹) (Yue-Qing, Shao, & Kong, 2008). فراوانی هر یک از کلاس‌های

خطر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین قسمت حوضه مورد مطالعه، جزء طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم (۶۵ درصد) قرار داشت که عمدتاً این کلاس‌ها در بخش میانی حوضه واقع شده بودند. حدود ۲۰ درصد حوضه نیز تحت خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار داشت که از این بین، بیشترین مناطق تحت خطر فرسایش بالا تا شدید، در مناطق شمال غربی، غرب و شمال شرقی و جنوب شرقی حوضه قرار داشتند. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد، فاکتور LS با ضریب همبستگی ۰/۸۱ بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است (شکل ۱۱). این در حالی است که همبستگی بسیار پایینی بین سایر فاکتورها و فرسایش سالیانه خاک وجود داشت (جدول ۶).

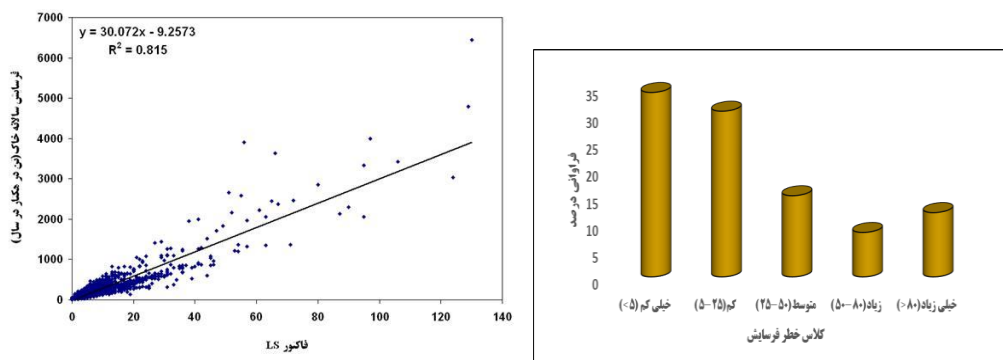


شکل ۸- نقشه متوسط سالانه فرسایش

Fig.8. Annual average erosion map

شکل ۹- نقشه کلاس فرسایش خاک

Fig.9. Soil erosion class map



شکل ۱۱- رابطه فاکتور LS با متوسط سالانه فرسایش خاک شکل ۱۰- فراوانی کلاس‌های خطر فرسایش

Fig.10. Frequency of erosion risk classes

Fig.11. Relationship between LS factor and average annual soil erosion

جدول ۶- میزان همبستگی و روابط رگرسیونی بین مقدار فرسایش سالانه خاک و پارامترهای مدل RUSLE

Table 6-

فاکتورهای RUSLE	تلفات سالانه خاک
R	$r^2 = 0.0024, y = -0.3526x + 195.16$
K	$r^2 = 0.0151, y = 270.91x + 198.17$
LS	$r^2 = 0.8111, y = 20.337x + 45.145$
C	$r^2 = 0.0866, y = 503.16x - 67.268$
P	$r^2 = 0.0993, y = 1642.6x - 1071.3$

بار رسوب

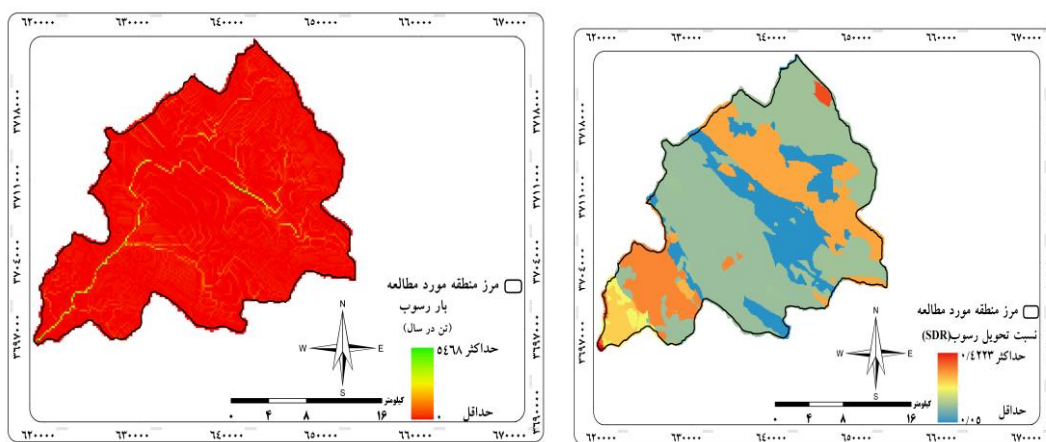
در این مطالعه، متوسط مقادیر نسبت تحویل رسوب بین ۰/۱۲ تا ۰/۳۴ و متوسط بار رسوب در خروجی حوضه بین ۵/۳۶ تا ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال متغیر بود (جدول ۷).

میزان رسوب مشاهده و محاسبه شده بر اساس ۱۶ سال آمار ایستگاه هیدرومتری با استفاده از منحنی‌های سنجه (حد وسط دسته‌ها) به‌طور متوسط معادل ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال (Azami, 2001) بوده و مقدار رسوب برآورد شده (متوسط رسوب برآورد شده) بر اساس مدل RUSLE با استفاده از روش نسبت تحویل رسوب USDA معادل ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال می‌باشد. در ضمن مقدار بار رسوبی برآورد شده در این حوضه توسط (Shahbazi (1999) با استفاده از روش EPM برابر ۱۸/۹۰ تن در هکتار در سال (آمار مشاهده-ای معادل ۱۶ تن در هکتار در سال) و (Asgari, Servati, & Jafari, (2008) با استفاده از مدل MPSIAC برابر ۱۴/۹۸ تن در هکتار در سال می‌باشد (آمار مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال). بنابراین اختلاف بین مقدار رسوب مشاهده شده با مقدار برآورد شده توسط مدل RUSLE در این مطالعه برابر ۰/۲۱ تن در هکتار در سال است. به‌عبارت‌دیگر مقدار رسوب برآورد شده حدود ۱ در صد کمتر از مقدار رسوب اندازه‌گیری شده (مشاهده شده) (براساس محاسبه خطای نسبی) می‌باشد.

بنابراین اختلاف معنی‌داری بین نتایج این کار و آمار واقعی مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین از آنجایی که مقدار بار رسوب برآوردی با استفاده از روش USDA (جدول ۷) تقریباً نزدیک به مقدار بار رسوب ثبت شده در ایستگاه رسوب‌سنجی حوضه چم‌گردلان ایلام (۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال) بود (Azami, 2001). از این‌رو، این روش به‌عنوان بهترین روش برای محاسبه نسبت تحویل رسوب انتخاب گردید و براساس آن، نقشه نسبت تحویل رسوب و بار رسوب تهیه شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). در این روش، متوسط نسبت تحویل رسوب و رسوب سالانه از ۰/۰۵ تا ۰/۴۲ و ۰ تا ۵۴۶۸ تن در سال به ترتیب متغیر است.

جدول ۷- روش‌های نسبت تحویل بار رسوب، مقادیر نسبت تحویل و بار رسوب در حوزه مورد مطالعه
Table 7- Sediment load delivery ratio methods, delivery ratio values and sediment load in the study area

روش‌های تحویل بار رسوب	میزان نسبت تحویل	بار رسوب (تن در هکتار در سال)
وانونی	۰/۲۶	۱۱/۶۲
بویس	۰/۱۲	۵/۳۶
USDA	۰/۳۴	۱۶/۳۷



شکل ۱۲- نقشه نسبت تحویل رسوب

شکل ۱۳- نقشه بار رسوب

Fig.12. Sediment delivery ratio map

Fig.13. Sediment load map

محاسبه فرسایش و رسوب با مدل EPM

در حوزه مورد نظر، برای تعیین میزان فرسایش خاک و همچنین تولید رسوب از مدل EPM استفاده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات پایه و بازدیدهای میدانی انجام شده، ضرایب تعدادی از پارامترهای مدل برای منطقه مورد مطالعه به شرح **جدول ۸** می‌باشد. در این قسمت، میانگین چهار ضریب، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج چهار ضریب در فرسایش خاک در **جدول ۸** مشخص شده است و سپس این چهار لایه (شکل ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 با هم همپوشانی شدند و نقشه شدت فرسایش منطقه به دست آمد؛ بنابراین و بر اساس **رابطه ۱۳** و با همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی، نقشه شدت فرسایش حوزه (شکل ۱۸) تهیه گردید. لازم به ذکر است ضریب شدت فرسایش (Z) برای هر یک از واحدهای همگن به صورت جداگانه محاسبه گردید (**جدول ۸**) و میانگین آن برای کل حوزه در نظر گرفته شد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از **جدول ۸** ضریب استفاده از زمین حداقل ۰/۲۰

و حداکثر ۰/۶۰ می‌باشد و متوسط آن در مدل EPM، ۰/۴۰ برآورد شده است. متوسط ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) ۰/۷۱ می‌باشد که کمترین آن ۰/۵۰ و بیشترین آن ۱/۲۰ برآورد شده است. ضریب فرسایش مشاهده‌ای یا حوضه منطقه که حداقل آن ۰/۲۰ و حداکثر آن ۰/۷۰ برآورد شده است. ضریب فرسایش (Z) در این منطقه به‌طور متوسط در کل حوضه برابر ۰/۸۹ می‌باشد که بر اساس جدول ۳ در محدوده فرسایش II یا شدید قرار دارد. جدول ۸، ضرایب فرسایش حوضه و ضریب شدت فرسایش را در واحدهای همگن به تفکیک مساحت نشان داده است. نتایج حاصل از بررسی نقشه شدت فرسایش نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و شرق حوضه قرار دارد. چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به‌اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدود بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است. مقدار Z برای این مناطق بیش از ۱ است که نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری شدید این ناحیه می‌باشد (شکل ۱۸)

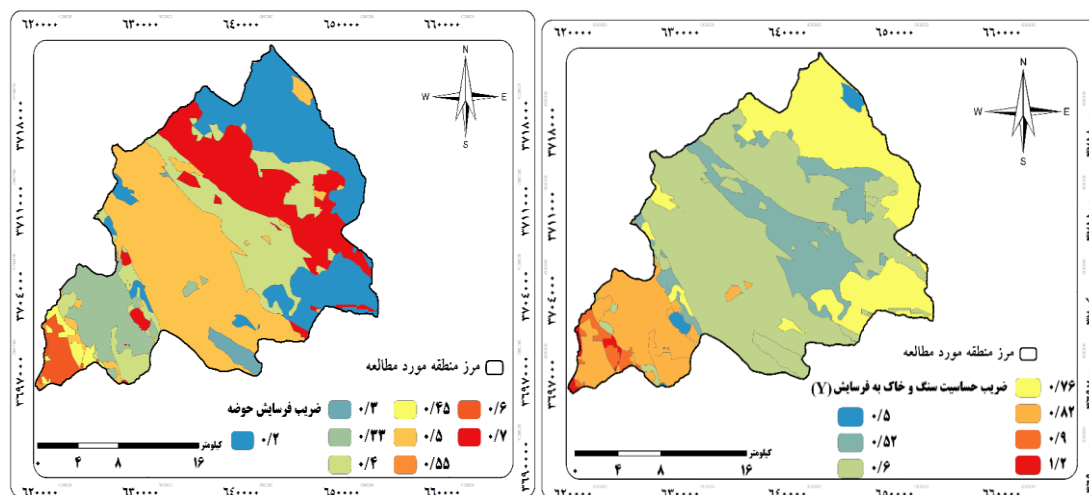
جدول ۸- داده‌های لازم جهت محاسبه شدت فرسایش خاک در واحدهای همگن با مدل EPM

Table 8- Necessary data to calculate soil erosion intensity in homogeneous units with EPM model

شماره واحد همگن	ضریب استفاده از زمین	ضریب حساسیت سنگ و خاک	ضریب عامل فرسایش	شیب متوسط (در صد)	ضریب شیب	ضریب شدت فرسایش	کلاس فرسایش	مساحت (هکتار)
PN	Xa	y	Ψ	slope	$I^{0.5}$	Z	Erosion intensity	ha(area)
۱	۰/۶	۰/۵۲	۰/۴۰	۴	۲/۰۰	۰/۷۴	شدید	۸۸۱۲/۰۲
۲	۰/۳۵	۰/۶۰	۰/۷۰	۷	۲/۶۴	۰/۷۰	شدید	۹۵۸۰/۳۹
۳	۰/۳۰	۰/۶۰	۰/۵۰	۹	۳/۰۰	۰/۶۳	متوسط	۱۶۶۶۴/۶۷
۴	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۳۰	۷	۲/۶۴	۰/۸۸	شدید	۸۲۵/۸۲
۵	۰/۴۰	۱/۲	۰/۶۰	۱۰	۳/۱۶	۱/۸۰	خیلی شدید	۱۴۱/۶۵
۶	۰/۲۰	۰/۹۰	۰/۴۵	۷	۲/۶۴	۰/۵۵	متوسط	۸۹۵/۶۷
۷	۰/۲۰	۰/۸۲	۰/۴۰	۱۳	۳/۶۰	۰/۶۵	متوسط	۱۱۸۲/۵۸
۸	۰/۲۲	۰/۷۶	۰/۲۰	۲۲	۴/۶۹	۰/۸۱	شدید	۱۳۵۱۱/۴۹
۹	۰/۳۰	۰/۸۲	۰/۳۳	۳۲	۵/۶۵	۱/۴۷	خیلی شدید	۴۷۰۷/۲۴
۱۰	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۶۰	۱	۱/۰۰	۰/۴۵	متوسط	۱۲۷۷/۸۲
۱۱	۰/۳۰	۱/۲	۰/۵۰	۲	۱/۴۱	۰/۶۸	متوسط	۱۴۱/۰۷
۱۲	۰/۶۰	۱/۲	۰/۵۵	۲	۱/۴۱	۱/۴۱	خیلی شدید	۵۸/۱۶
۱۳	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۷۰	۲	۱/۴۱	۰/۶۳	متوسط	۲۳۹/۲۶

شماره دوم	جغرافیا و مخاطرات محیطی							۳۶۴
۲۹۱/۹۱	شدید	۰/۹۹	۴/۴۷	۲۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۱۴
۴۰/۵۸	خیلی شدید	۱/۰۰	۲/۲۳	۵	۰/۵۵	۱/۲۰	۰/۳۰	۱۵
58370		۰/۸۹	۲/۸۰	۹/۵۳	۰/۴۸	۰/۸۱	۰/۳۷	میانگین

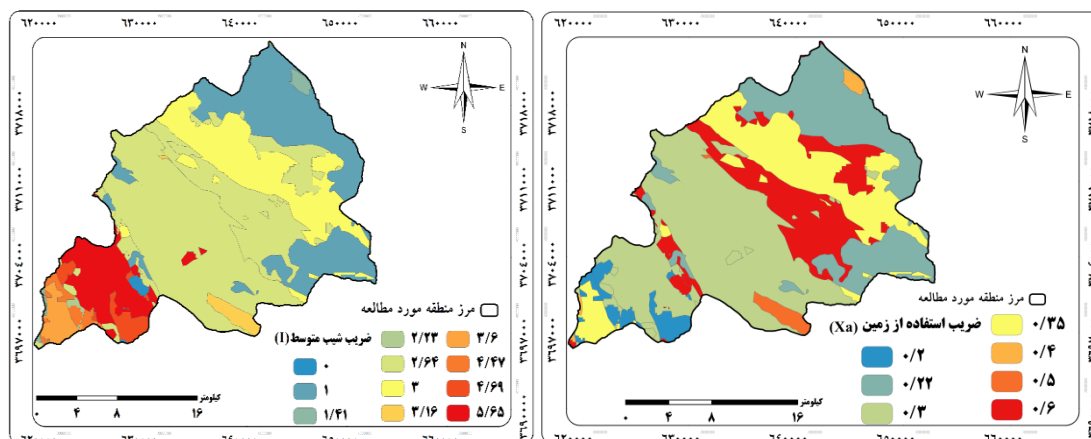
همان‌طور که ذکر شد، نقشه‌های ضرایب شدت فرسایش در حوضه چم‌گردلان استان ایلام در شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۸ نقشه شدت فرسایش در حوضه چم‌گردلان نشان داده شده است که بر اساس آن کمترین مقدار فرسایش در قسمت‌های مرکزی و هموارتر منطقه است و بیشتر زیر کشت آبی و دیم و باغ‌کاری در مناطق با شیب کم قرار می‌گیرد که دارای فرسایش‌پذیری کمتری می‌باشد.



شکل ۱۴- ضریب فرسایش حوضه (Ψ) شکل ۱۵- ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y)

Fig.14. basin erosion coefficient (Ψ)

Fig.15. Coefficient of sensitivity of rock and soil to erosion (Y)

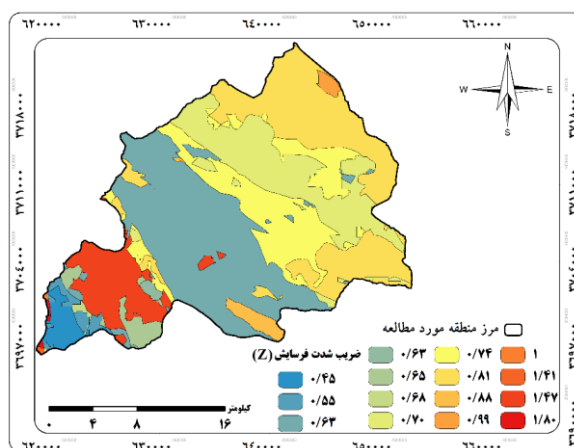


شکل ۱۶- ضریب استفاده از زمین (Xa)

Fig.16. Land use coefficient (Xa)

۱۷- ضریب شیب متوسط حوضه (I)

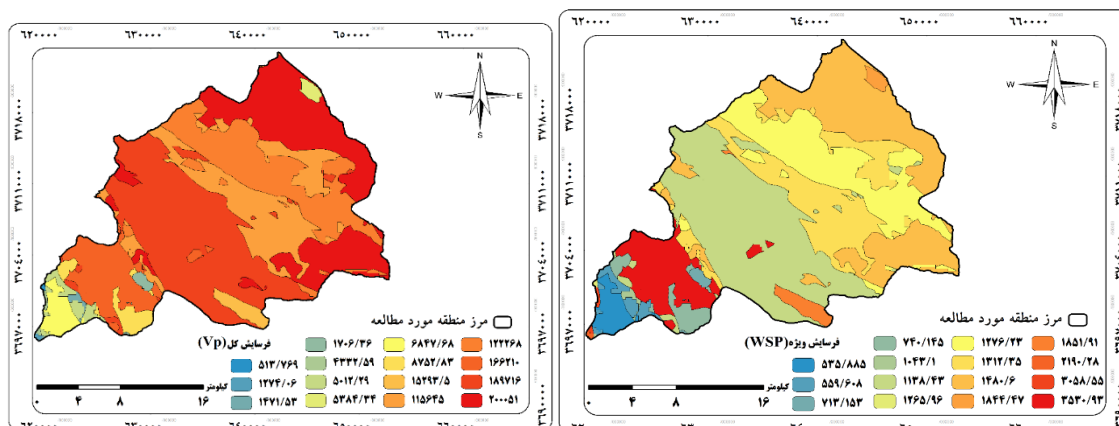
Fig.17. Average slope coefficient of the basin (I)



شکل ۱۸- ضریب شدت فرسایش (Z)

Fig.18. Erosion intensity coefficient (Z)

طبق رابطه ۱۴، لایه‌های دما، بارش و لایه‌های شدت فرسایش با توابع تحلیلی ذکر شده در عدد پی ضرب گردیده و با همپوشانی، نقشه سالانه فرسایش ویژه و فرسایش کل در حوضه به دست آمد (شکل‌های ۱۹ و ۲۰).



شکل ۱۹- فرسایش ویژه

Fig.19. Special erosion

شکل ۲۰- فرسایش کل

Fig.20. total erosion

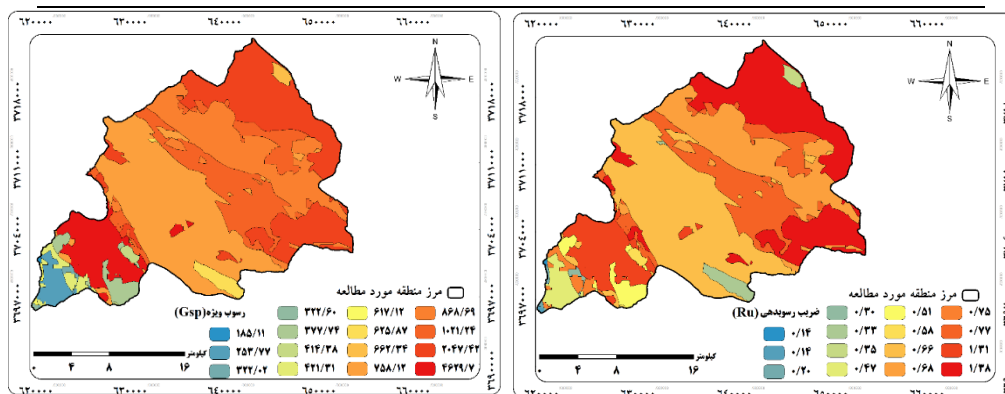
در نهایت از تلفیق نتایج به دست آمده، فرسایش ویژه، فرسایش کل، رسوب ویژه و رسوب کل در واحدهای همگن به دست آمد (جدول ۹). بر این اساس، میزان فرسایش ویژه و فرسایش کل به ترتیب معادل ۱۵۰۲ مترمکعب در کیلومترمربع در سال و ۸۷۷۱۷۴ مترمکعب در سال است. همچنین میزان رسوب ویژه و رسوب کل در حوضه آبخیز چمگردان به ترتیب ۲۹۵۶ مترمکعب در کیلومترمربع در سال و ۱۱۹۱۰۰۲ مترمکعب در سال است. همچنین، در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب نقشه‌های ضریب رسوب، رسوب ویژه و رسوب کل نشان داده شده است. با توجه به جدول شماره ۹، میزان فرسایش ویژه بسته به میزان ضریب شدت فرسایش در واحدهای همگن تغییر می‌کند. این تغییرپذیری، نتیجه کاربری‌های مختلف حوضه و همچنین سازندهای مختلف و شیب متغیر منطقه است.

مقدار رسوب ویژه برای واحدهای همگن و کل حوضه بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال به دست آمد. سپس با در نظر گرفتن وزن مخصوص ظاهری خاک (۱/۴۳)، مقدار رسوب ویژه بر حسب تن در هکتار در سال محاسبه شد و مقدار آن ۲۱/۴۹ تن در هکتار در سال بر آورد گردید (جدول ۹). این در حالی است که مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی برابر ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مقایسه نتایج ایستگاه هیدرومتری و رسوب سنجی در خروجی حوضه با مدل EPM نشان‌دهنده هم‌خوانی ۷۱ درصدی رسوبی خروجی این مدل است. در جدول ۱۰، مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چمگردان استان ایلام را مشاهده می‌فرمایید.

جدول ۹- فرسایش و رسوب محاسبه شده برای واحدهای همگن و کل حوضه با مدل EPM

Table 9- Erosion and sedimentation calculated for homogeneous units and the entire basin with the EPM model

شماره واحد همگن	فرسایش ویژه (مترمکعب در سال)	مساحت (km ²)	فرسایش کل (مترمکعب در سال)	ضریب رسوبدهی در واحدهای همگن	Gsp (m ³ /year/km ²)	Gs (m ³ /year)
۱	۱۳۱۲/۴۰	۸۸/۱۲	۱۱۵۶۴۴/۶۰	۰/۷۸	۱۶۸۶/۴۵	۱۴۸۶۱۰/۱۰
۲	۱۲۷۶/۲۰	۹۵/۸۰	۱۲۲۳۶۸/۳۰	۰/۶۸	۱۸۷۴/۹۷	۱۷۹۶۲۹/۴۰
۳	۱۱۳۸/۴۰	۱۶۶/۶۴	۱۸۹۷۱۶/۳۰	۰/۶۷	۱۷۰۹/۵۳	۲۸۴۸۸۶/۹۰
۴	۱۸۵۱/۹۰	۸/۲۵	۱۵۲۹۳/۵۴	۰/۳۴	۵۴۷۹/۶۷۵	۴۵۲۵۲/۳۰
۵	۳۰۵۸/۵۰	۱/۴۱	۴۳۳۲/۵۹	۰/۲۰	۱۵۱۵۸/۴۶	۲۱۴۷۲/۷۰
۶	۵۵۹/۶۰	۸/۹۵	۵۰۱۲/۲۸	۰/۷۵	۷۴۳/۳۰	۶۶۵۷/۵۰
۷	۷۴۰/۱۰	۱۱/۸۲	۸۷۵۲/۸۲	۰/۵۱	۱۴۵۰/۲۴	۱۷۱۵۰/۲۰
۸	۱۴۸۰/۶۰	۱۳۵/۱۱	۲۰۰۰۵۰/۹۰	۰/۸۱	۱۸۲۷/۹۰	۲۴۶۹۷۶/۴۰
۹	۳۵۳۰/۹۰	۴۷/۰۷	۱۶۶۲۰۹/۵۰	۰/۸۷	۴۰۵۸/۵۴	۱۹۱۰۴۵/۴۰
۱۰	۵۳۵/۹۰	۱۲/۷۷	۶۸۴۷/۶۸	۰/۴۷	۱۱۳۱/۶۱	۱۴۴۶۰/۰۰
۱۱	۱۰۴۳/۱۰	۱/۴۱	۱۴۷۱/۵۳	۰/۳۱	۳۳۷۸/۸۲	۴۷۶۶/۶۰
۱۲	۲۱۹۰/۳۰	۰/۵۸	۱۲۷۴/۰۵	۰/۱۵	۱۴۸۷۰/۵۰	۸۶۴۹/۹۰
۱۳	۷۱۳/۲۰	۲/۳۹	۱۷۰۶/۳۵	۰/۵۸	۱۲۲۷/۳۲	۲۹۳۷/۶۰
۱۴	۱۸۴۴/۵۰	۲/۹۱	۵۳۸۴/۳۳	۰/۳۶	۵۱۳۶/۴۲	۱۴۹۹۴/۱۰
۱۵	۱۲۶۶/۰۰	۰/۴۰	۵۱۳/۷۶	۰/۱۵	۸۶۵۷/۸۲	۳۵۱۳/۶۰
میانگین	۱۵۰۲/۷۷	۵۸۳/۷۰	۸۷۷۱۷۴/۹۰	۰/۵۱	۲۹۵۶/۷۸	۱۱۹۱۰۰۲

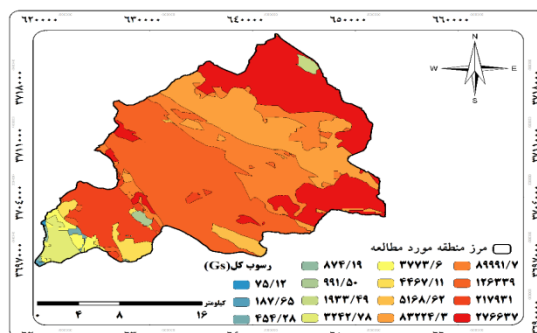


شکل ۲۱- ضریب رسوبدهی (RU)

Fig.21. Sedimentation coefficient (RU)

شکل ۲۲- رسوب ویژه

Fig.22. Special sediment



شکل ۲۳- رسوب کل

Fig.23. Total sediment

در جدول ۱۰، مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چمگردان استان ایلام را مشاهده می‌فرمایید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان رسوب برآوردی مدل $RUSLE$ ، $۱۶/۳۷$ تن در هکتار در سال و در روش EPM ، $۲۱/۴۹$ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی $RUSLE$ به مقدار رسوب مشاهده‌ای $۱۶/۵۸$ تن در هکتار در سال، کارایی مدل $RUSLE$ در برآورد رسوب منطقه مورد مطالعه بیشتر است. در نهایت توصیه می‌شود، برای فازهای اولیه مطالعات توجیهی، اجمالی و شناسایی از مدل EPM و برای مطالعات تفصیلی و دقیق‌تر برآورد فرسایش و رسوب حوضه از روش $RUSLE$ بهره گرفت.

جدول ۱۰- مقایسه مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چمگردان استان ایلام

Table 10- Comparison of the observed and estimated values in Chamgardan aquifer basin of Ilam province

مقدار مشاهده شده (تن در هکتار درسال)	مقدار برآورد شده با مدل $RUSLE$ (تن در هکتار درسال)	مقدار برآورد شده با مدل EPM (تن در هکتار درسال)
۱۶/۵۸	۱۶/۳۷	۲۱/۴۹

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مقدار فرسایش و رسوب به دلایل فنی، حفاظتی و اقتصادی در تمامی نقاط امکان‌پذیر نیست. از این رو مناسب‌ترین راهکار، برآورد مقدار فرسایش و تولید رسوب با مدل‌های تجربی است که لازمه آن آگاهی از مکانیسم‌های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن است. از طرفی انتخاب مدل مناسب برای هر منطقه مستلزم ارزیابی دقت مدل‌های مختلف از طریق مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری آن‌ها به ضریب رسوبدهی واقعی در یک حوضه آبخیز می‌باشد. بر این اساس، در این تحقیق، میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز

چم‌گردلان ایلام با استفاده از دو مدل **EPM** و **RUSLE** مورد بررسی قرار گرفت، از طرفی میزان رسوب مشاهده‌ای با استفاده از روش منحنی سنج رسوب (حدواسط دسته‌ها) برآورد گردید و در نهایت مؤثرترین و کاراترین روش معرفی گردید.

در این مطالعه به منظور بررسی میزان فرسایش و برآورد مقدار رسوب در حوضه آبخیز چم‌گردلان استان ایلام، پس از امتیازدهی و تلفیق عوامل مؤثر به صورت لایه‌های رقومی در محیط نرم‌افزار **ArcGIS**، با استفاده از مدل‌های تجربی نقشه میزان فرسایش و رسوب حوضه مورد نظر تعیین گردید.

نتایج برآورد معیارهای مورد بررسی در روش **RUSLE** در حوضه آبخیز مورد مطالعه نشان داد، فاکتور فرسایش‌پذیری از ۰/۲۸ تا ۰/۶۶ و معیار پوشش گیاهی از ۰/۳۵ تا ۰/۶۰ متغیر بوده که نشان‌دهنده تفاوت در ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در مناطق مختلف حوضه است. نقشه فاکتور پوشش گیاهی نشان می‌دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش مترکم وجود دارد. نتایج حاصل از فاکتور فرسایش‌پذیری در حوضه چم‌گردلان نشان داد، میزان این فاکتور از ۱۳۶ در پایین‌دست تا ۳۹۶ مگاژول در میلی‌متر در سال در هکتار در بالادست حوضه در نوسان است و میزان فاکتور فرسایش‌پذیری باران در نقطه خروجی حوضه به حداقل می‌رسد. [Miguel, Samuel-Rosa, Simao \(2011\)](#)؛ [Dennis Dalmolin, Arajo Pedron, & Moura Bueno \(2011\)](#)؛ [Bahrawi et al. \(2016\)](#) و [Rezaee, Faridi, Ghorbani, & Kazemi \(2018\)](#) معتقدند افزایش ارتفاع از سطح دریا سبب افزایش فاکتور فرسایش‌پذیری باران می‌گردد، چون که میزان بارش زیاد می‌شود. فرسایش‌پذیری باران در شمال‌شرقی و جنوب‌غربی حوضه مورد مطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیش‌تر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به عبارت دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور **R** دارد. بررسی همبستگی آماری بین فاکتورهای **RUSLE** و مقدار فرسایش سالیانه خاک در منطقه مورد مطالعه نیز نشان داد که فاکتور **LS** با ضریب همبستگی ۰/۸۱ بیشترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل **RUSLE** دارد.

در انجام محاسبات مربوط به مدل **EPM**، میانگین ضرایب فرسایش حوضه (Ψ)، استفاده از زمین (Xa)، حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط (I) محاسبه و با مقایسه با جدول استاندارد، میزان فرسایش و کلاس فرسایش برای هرکدام از واحدهای همگن و در نهایت در کل حوضه برآورد گردید. چنانچه در جدول مربوطه مشاهده می‌فرمایید، ضریب شدت فرسایش (Z)، به جز ۶ واحد از ۱۵ واحد در کلاس شدت فرسایش شدید تا خیلی شدید قرارداد شده و میانگین آن در کل حوضه ۰/۸۹ برآورد گردید. همچنین میزان فرسایش ویژه و رسوب ویژه کل حوضه به ترتیب ۱۵۰۲/۷۷ و ۲۹۵۶/۷۸ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال برآورد گردید. نتایج حاصل از کاربرد **EPM** در برآورد فرسایش نشان داد که میزان ۶۵ درصد از مساحت حوضه در کلاس فرسایشی شدید (زیاد) و خیلی شدید (زیاد) دارد (شرقی و میانی

حوضه) و حدود ۳۵ درصد حوضه در کلاس فرسایش کم تا متوسط است. با استفاده از روش فوق، مقدار رسوب سالانه ۲۱/۴۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید.

بر اساس نتایج حاصل از روش **RUSLE** بیشترین وسعت حوضه مربوط به کلاس فرسایشی خیلی کم، کم و متوسط است که عموماً در کل حوضه پراکنش دارد و کمترین مساحت حوضه در کلاس فرسایشی زیاد تا خیلی زیاد (۲۰ درصد) قرار می‌گیرد و بر این اساس مقدار رسوب سالانه در این روش ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال برآورد گردید. بنابراین، نتایج حاصل از **EPM**، غالب فرسایش را در کلاس شدید تا خیلی شدید و مدل **RUSLE** در کلاس خیلی کم تا متوسط برآورد نموده‌اند، بدین معنی که مدل **EPM** دچار پیش‌برآورد و مدل **RUSLE** دچار کم‌برآورد شده است. نتایج حاصل از بررسی نقشه فرسایش در هر دو مدل نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و میانه حوضه قرار دارد. چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدود بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است. مقدار **Z** برای این مناطق بیش از ۱ است که نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری شدید این منطقه می‌باشد.

یکی از عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب، رژیم بارندگی و اقلیم حوضه است که با بررسی آن مشخص شد که قسمت عمده ریزش‌های جوی در حوضه آبخیز چم‌گردلان از نوع باران است و در فصل زمستان با برف همراه می‌شود ولیکن بارندگی به‌خصوص با شدت‌های بالا و زمان کم، باعث جریان سریع و شدت رواناب شده که با خود مقدار زیادی از خاک سطحی را تخریب و به‌صورت رسوب و بار معلق به مناطق پایین‌دست و خروجی حوضه حمل می‌کند.

از دیگر عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب و ایجاد سیلاب حوضه، خصوصیات فیزیوگرافی و توپوگرافی از جمله شیب و ارتفاع است. شیب حوضه آبخیز چم‌گردلان در اکثر قسمت‌های آن چشمگیر است به‌طوری‌که در بیشتر قسمت‌های این حوضه شیب بیشتر از ۲۰ درصد است که در سرعت بخشیدن به فرسایش و پارامترهای مؤثر در آن از جمله رواناب تأثیرگذار است. به‌طورکلی در حوضه‌های با شیب ملایم به دلیل اینکه قدرت آب جاری کاهش پیدا می‌کند، بنابراین اشکال مختلف فرسایش نیز کمتر دیده می‌شود؛ درحالی‌که در حوضه آبخیز چم‌گردلان به دلیل کوهستانی بودن قسمت‌های زیادی از آن، عکس این حالت اتفاق می‌افتد.

پوشش گیاهی و کاربری اراضی یکی دیگر از عوامل مؤثر در فرسایش و رسوب حوضه به شمار می‌رود. طبیعی است مناطقی که دارای پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی مناسب باشد، کمتر در معرض تخریب و فرسایش قرار می‌گیرند. در حوضه آبخیز چم‌گردلان که حدود ۷۰ درصد از مساحت حوضه را جنگل و مرتع با تراکم‌های مختلف پوشانده است، انتظار می‌رود، وضعیت کنترل فرسایش در سطح حوضه آبخیز مناسب و

میزان ضریب فرسایش در حد کم باشد؛ لیکن به دلایل مختلف از جمله چرای مفرط و دائم مرتع توسط دام-های منطقه، عدم رعایت تعادل دام و مرتع توسط دامداران، اعمال روش‌های غلط شخم اراضی، قطع بی‌رویه درختان، درختچه‌ها و بوته‌ها، عدم رعایت اصول بهره‌برداری صحیح از اراضی، تبدیل جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی، خاک و زمین‌شناسی و تأثیر عوامل اقلیمی به‌خصوص پراکنش و شدت بارندگی، باعث شده است که وضعیت فرسایش حوضه آبخیز در حد شدید و بسیار شدید قرار گیرد. لذا اعمال روش‌های مختلف کنترل فرسایش در سطح حوضه ضروری است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میزان رسوب برآوردی در روش **RUSLE** ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال و در روش **EPM** ۲۱/۴۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی **RUSLE** به مقدار مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال، کارایی مدل **RUSLE** در برآورد رسوب منطقه مورد مطالعه بیشتر است. محققینی چون (Bahrawi et al., 2016)؛ (Miguel et al., 2011)؛ (Vaezi, Bahrami, Teimourri & Rezaee, Faridi, Ghorbani, & Kazemi, 2018)؛ (Sadeghi, & Mahdian 2010)؛ (Bazrafshan 2018)؛ (Rafahi & Nemeti 1995)؛ (Abedini, Shabrang, & Esmaeli 2014)؛ (Shabrang, & Esmaeli 2014)؛ (Sadog, Hoseinzadeh, & Azadi 2015)؛ (Khodabakhsh, Mohammadi, Rafie, & Bozorg Zadeh, 2010) و (Sadog, Hoseinzadeh, & Azadi 2015) کارایی نامناسب مدل **EPM** را در برآورد فرسایش و رسوب در مطالعات تفصیلی تأیید نموده‌اند.

References

- Abedini, M., Shabrang, S., & Esmaeli, A. (2014). Review on Soil Erosion and Sedimentation in Meshkin Chai Catchment Area by EPM Method. *Geography and Development*, 11(30), 87-100. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.245>
- Amiri, F., Arzani, H., Farahpour, M., Chaeichi, M.R., & Khajeh Aldin, S.J.A.D. (2009). Efficiency of Mpsiac and EPM Models for Assessment Soil Erosion in Range Suitability. *Rangeland*, 3(1), 138-154. [In Persian] <https://sid.ir/paper/136360/en>
- Ansari Lari, A., & Ansari, M. (2017). Evaluation of soil erosion risk and sedimentation potential by using EPM model in Gabric basin- SE Hormozgan- Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(11), 1-14. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2965>
- Asgari, S.A., Servati, M.R., & Jafari, M.R. (2008). Estimating the Oil Erosion and Production of Sediment in the Basin of the Ilam Dam by using MPSIAC Model. *Physical Geography Research*, 40(64), 29-35. [In Persian] <https://www.sid.ir/paper/5427/en>
- Azami, A. (2001). Comparison of Various Methods for Estimating Sediment Yield in Ilam Dam Watershed. (published M.sc. thesis). Gorgan University. (in persian).
- Azimi Sardari, M.R., Bazrafshan, O.A., Panagupulus, T., & Rafiei Sardoei, E. (2019). Current and Future Assessment of Soil Erosion in the Catchment Area of Esteghlal Dam

- in Minab Using RUSLE-3D Model and Climate Change Scenarios. *Desert Management*, 7 (14), 132-119. [In Persian].
<https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38480>.
- Bahrawi, A.J., Elhag, M., Aldhebiani, A.Y., Galal, H.K., Hegazy, A.K., & Alghailani, E. (2016). Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia. *Advances in Materials Science and Engineering*.
<https://doi.org/10.1155/2016/9585962>.
 - Bartsch, K.P., Van Miegroet, H., Boettinger, J., & Dobrowolski, J.P. (2002). Using Empirical Erosion Models and GIS to Determine Erosion Risk at Camp Williams. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(1), 29-37.
<https://www.jswconline.org/content/57/1/29/tab-references>.
 - Benkobi, L., Trlica, M.J., & Smith, J.L. (1994). Evaluation of a Refined Surface Cover Subfactor for Use in RUSLE. *Journal of Range Manage* 47(1),74-78.
<https://doi.org/10.2307/4002845>
 - Biesemans, J., Meirvenne, M.V., & 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.
<https://www.jswconline.org/content/55/1/35>
 - Bagio, á., Bertol, I., Wolschick, N.H., Schneiders, D., & Aparecida, M. (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. DOI: 10.1590/18069657rbcs20160132
 - Boggs, G., Devonport, C., Evans, K., & Puig, P. (2001). GIS-Based Rapid Assessment of Erosion Risk in a Small Catchment in the Wet/Dry Tropics of Australia. *Land Degradation and Development*, 12(5), 417-434. <https://doi.org/10.1002/ldr.457>
 - Boyce, R. C. (1975). Sediment Routing with Sediment Delivery Ratios. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, US Dept. Agric. Publ. ARS-S-40, 61-65.
 - Deore, S.J. (2006). *Prioritization of Micro-watersheds of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Using Remote Sensing and GIS Technology*. (published doctoral. dissertation). University of Pune, Department of Geography.
 - Elirehema, Y. (2001). Soil Water Erosion Modeling in Selected Watersheds in Southern Spain. IFA, ITC, Enschede. <https://doi.org/10.1002/ldr.457>
 - Ferro, V., Giordano, G., & Lovino, M. (1991). Isoerosivity and Erosion Risk Map for Sicily. *Hydrological Science Journal*, 36(6),549-564.
<https://doi.org/10.1080/02626669109492543>.
 - Gavrilovic, Z. (1988, May). The Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential streams. Paper presented at the International Conference of River Regime, Wallingford. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1840329>.
 - Haan, C.T., Barfield, B.J., & Hayes, J.C. (1994). *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. San Diego, Academic Press.
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1687737>
 - Khodabakhsh, S., Mohammadi, A., Rafie, B., & Bozorg Zadeh, I. (2010). Comparison of erosion and sediment yield estimation in Sezar sub-basin (Dez drainage basin) by MPSIAC and EPM empirical methods, using GIS. *Iranian Journal of Geology*, 3(12), 51-61. [In Persian] <https://www.magiran.com/p886221>
 - Lal, R. (1990). *Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management*. New York, McGraw-Hill. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2193850>

- Lin, C.Y. (1997). A Study on the Width and Placement of Vegetated Buffer Strips in a Mudstone-Distributed Watershed. *Journal of China. Soil Water Conserve*, 29 (3), 250-266 [In Chinese with English abstract].
- McCool, D.K., Brown, L.C., & Foster, G.R. (1987). Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 30, 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>.
- Miguel, P.A., Samuel-Rosa, R., Simao Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., & Moura Bueno, A. (2011). The USLE Model for Estimating Soil Erosion in Complex Topography Areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil*, 85, 9227-9230.
- Milevski, I. (2008, July). Estimation of Soil Erosion Risk in the Upper Part of Bregalnica Watershed-Republic of Macedonia, Based on Digital Elevation Model and Satellite Imagery. Paper presented at the 5th International Conference on Geographic Information Systems (ICGIS-)(Turkey), Istanbul, (pp.351-358). <https://www.researchgate.net/publication/265012436>
- Mokhtari, L.G., Shafiei, N., & Rahmani, A. (2019). Estimation of Soil Erosion Using RUSLE Model, A Case Study of Noorabad Mamasani Basin. *Hydrogeomorphology*, 5(17), 1-21. [In Persian]. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_8601_en.html?lang=en
- Moore, I.D., & Wilson, J.P. (1993). Length-Slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47(4),423-428. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=674926>.
- Moradi, M., Ghonchepour, D., Nohegar, A., & Mahmoudi Nejad, V. (2012). A Comparison of the MPSIAC and EPM Models for Estimating Erosion and Sediment in the Poorahmadi Catchment. *Environmental Erosion Researches*, 1(4), 54-68. [In Persian] <https://www.sid.ir/paper/223084/en>
- Morgan, R.P.C. (1995). *Soil Erosion and Conservation*. London, Longman. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=117218>
- Noori, H., Siadatmousavi, S. M., & Mojaradi, B. (2017). Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Based on Satellite Imagery Using the GIS Technique and Employing Erosion Potential Method (EPM) on Watersheds (Case study: the Dez Watershed). *Water Resources Engineering*, 10(32), 45-54. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1396.10.32.6.2>
- Nouwakpo, S.K., Williams, C.J., Al-Hamdan, O.Z., Weltz, M.A., Pierson, F. & Nearing, M. (2016). A Review of Concentrated Flow Erosion Processes on Rangelands: Fundamental Understanding and Knowledge Gaps. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.003>
- Rafahi, H., & Nemeti, M. (1995). Application of EPM Method in Studying Rate of Erodibility and Sedimentation in Alamut-Rud Watershed. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 26(1), 33-46. [In Persian] https://journal.ut.ac.ir/article_16105_601401dd19a510faf4563182d15e1ac5.pdf
- Renard, K.G., & Freimund, J.R. (1994). Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook, 703, USDA-ARS. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/ruslech2.pdf>

- Rezaee, P., Faridi, P., Ghorbani, M., & Kazemi, M. (2018). Estimation of Soil Erosion Using the RUSLE Model and Identification of its Most Effective Factor in the Gabrik Watershed-South-Eastern Hormozgan Province *Quantitative Geomorphological Research*, 3(1), 97-113. [In Persian]
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3>
- Sadog, H., Hoseinzadeh, M.M., & Azadi, F. (2015). Determining the Erosion in Kahman Drainage Basin Using EPM, BLM and Fargas Models. *Hydrogeomorphology*, 2(2), 137-154. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.8.7>
- Shahbazi, K. (1999). Estimation of Erosion and Sediment by Qualitative Geomorphology (Homogenous Units) and EPM Methods and Comparing them with Outlet Sediment Data in Ilam Dam Basin. (published MS.c thesis). Tarbiat Modarres University, School of Natural Resources. [In Persian].
- Tazioli, A. (2009). Evaluation of Erosion in Equipped Basins: Preliminary Results of a Comparison Between the Gavrilovic Model and Direct Measurements of Sediment Transport. *Environmental Geology*, 56(5), 825-831.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-1183-y>
- Teimourri, F., & Bazrafshan, O. (2018). Comparison of the Efficiency the RUSLE and EPM Models in Estimating Soil Erosion and Sediment Yield According to the Sediment Rating curve (case study :Jask-Gabrik watershed). *New Findings in Applied Geology*, 12(23), 50-62. [In Persian]
https://journals.basu.ac.ir/article_2278_101b5eaf999bfabc46cbcf8240155c1e.pdf
- USDA. (1975). Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.
https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part632_SedimentationGeology/NEH3_06.PDF
- Vaezi, A.R., Abasi, M., & Abd Haji Maleki, K.H. (2017). Evaluation of RUSLE Model Combined with Remote Sensing and GIS in Small Drainage Areas in the Semi-Arid Region, Northwestern Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11 (38), 1-10. [In Persian].
<https://www.sid.ir/paper/134808/en#downloadbottom>.
- Vaezi, A.R., Bahrami, H.A., Sadeghi, S.H.R., & Mahdian, M.H. (2010). Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 241-252. [In Persian].
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2010.12.2.11.9>
- Vanoni, V.A. (1975). Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y. https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASCE/preview_9780784471340.pdf.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion. Losses: A Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, 537. US Department of Agriculture, Washington, DC,.
https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf
- Yu, B., & Rosewell, C.J. (1996). A Robust Estimator of the R Factor for the Universal Soil Loss Equation. American Society of Agricultural Engineers, 39(2), 559-561.
<https://typeset.io/pdf/a-robust-estimators-of-the-r-reaction-for-the-universal-soil-7rxy1i22im.pdf>
- Yue-Qing, X., Shao, X-M., & Kong, X-B. (2008). Adapting the RUSLE and GIS to Model Soil Erosion Risk in a Mountain Karst Watershed, Guizhou Province, China, *Environment Monitoring and Assessment*, 141, 275-286.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9894-9>.