

Effect of correction points of the erodibility factor map on soil erosion estimation in G2 model

Faezeh Kamari Yekdangi¹, Abdulvahed Khaledi Darvishan^{2*}, Soheila Aghabeigi Amin³

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

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

³ Assistant Professor, Department of Natural resources, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 03.10.2023; Accepted:04.03.2024

Abstract

Soil conservation requires a suitable model and framework to assess soil erosion and sediment yield based on land use scenarios. Therefore, the present study was conducted with the aim of investigating the sensitivity of the G2 model to the soil erodibility factor in the Kasilian representative watershed in the period of 2001-2021. Points such as the use of global soilgrid database and comparison with soil sampling data, removal of soil erodibility in rocky areas, and removal of outlier data created by systematic error were included in the current research. The results showed that qualitatively, the rate of soil erosion estimated based on each of the mentioned points was completely in the minimum category. The initial results of the soil erosion rate obtained from the global soilgrid database and the IDW method were 4.31 and 4.33 t ha⁻¹ y⁻¹, respectively, which were not significantly different based on the independent t test. But the effect of other changes, including removal of soil erodibility in rocky areas and removal of outlier data on the change of soil erosion estimates using one-way ANOVA and Duncan's tests were significant (P<0.01). The estimated average rate of soil erosion in the watershed after following the mentioned points was reduced by more than 65% compared to the initial results and became closer to the data of erosion plot.

Keywords: Sensitivity Analysis, Global Soilgrid Data, Specific Sediment Yield, Soil Erosion, Empirical Model

* Corresponding author, Email: a.khaledi@modares.ac.ir

Cite this article: Faezeh Kamari Yekdangi, Abdulvahed Khaledi Darvishan, Soheila Aghabeigi Amin. (2024). Effect of correction points of the erodibility factor map on soil erosion estimation in G2 model. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 158-169.
<https://doi.org/10.22034/nawee.2024.436707.1062>





تأثیر نکات اصلاحی نقشه عامل فرسایش پذیری بر برآورد فرسایش خاک در مدل G2

فائزه کمری یکدانگی^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^۲، سهیلا آقاییگی امین^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

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

^۳ استادیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵

چکیده

حفاظت خاک نیازمند یک مدل و چهارچوب مناسب در ارزیابی فرسایش خاک و رسوب تولیدی براساس سناریوهای کاربری اراضی است. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی حساسیت مدل G2 نسبت به عامل فرسایش پذیری خاک در حوزه آبخیز معرف کسلیان در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۱ انجام شد. نکاتی همچون استفاده از داده‌های پایگاه جهانی خاک و مقایسه با داده‌های نمونه برداری خاک، حذف فرسایش پذیری خاک در مناطق صخره‌ای و حذف داده‌های پرت ایجاد شده حاصل از خطای سیستماتیک در پژوهش حاضر لحاظ شد. نتایج نشان داد که به‌طور کیفی شدت فرسایش خاک برآوردی براساس هر یک از نکات مذکور، به‌طور کلی در طبقه کمینه قرار داشت. نتایج اولیه شدت فرسایش خاک حاصل از داده‌های پایگاه جهانی خاک و روش IDW به ترتیب ۴/۳۱ و ۴/۳۳ تن در هکتار در سال بود که بر اساس آزمون t مستقل، اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. اما اثر سایر تغییرات شامل حذف فرسایش پذیری خاک در مناطق صخره‌ای و حذف داده‌های پرت بر تغییر مقادیر برآوردی فرسایش خاک با استفاده از آزمون‌های تحلیل واریانس یکطرفه و دانکن معنی‌دار ($P < 0.01$) بود. شدت متوسط فرسایش خاک برآوردی حوزه آبخیز پس از رعایت نکات ذکر شده بیش از ۶۵ درصد نسبت به نتایج اولیه کاهش یافت و به داده‌های کرت‌های فرسایش نزدیک‌تر شد. بر همین اساس می‌توان جمع‌بندی نمود که در کاربری مدل‌های فرسایش خاک، دقت و حساسیت ویژه در نحوه اجرا و رعایت نکاتی ضروری در خصوص نقشه عامل فرسایش پذیری خاک به‌منظور دستیابی به نتایج مناسب ضروری است.

کلمات کلیدی: تحلیل حساسیت، داده‌های Soilgrid جهانی، رسوب‌دهی ویژه، فرسایش خاک، مدل‌های تجربی

*نویسنده مسئول: Email: a.khaledi@modares.ac.ir

استناد: کمری یکدانگی، فائزه؛ خالدی درویشان^۲، عبدالواحد؛ آقاییگی امین، سهیلا (۱۴۰۳). تأثیر نکات اصلاحی نقشه عامل فرسایش‌پذیری بر برآورد

فرسایش خاک در مدل G2. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۳ (۱)، ۱۶۹-۱۵۸.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2023.425409.1062>

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس. © نویسندگان



مقدمه

هدررفت خاک تهدید عمده و برجسته‌ای برای ثبات اقتصادی و محیط‌زیستی در سراسر جهان است (Rahman et al, 2009) زیرا اثرات منفی ناشی از فرسایش نه تنها در دامنه‌ها و اراضی زراعی محل وقوع خود، بلکه در محل خارج از وقوع آن نیز در قالب رسوب امروز بیش از هر زمان دیگری مشهود است (Karydas and Panagos, 2018) به موجب این امر هرگاه که به مطالعه رسوبات پرداخته می‌شود در کنار آن پدیده فرسایش نیز مطرح خواهد شد و در اصل فرآیندی پیوسته می‌باشند و تا حد زیادی نیز عوامل مؤثر در بروز و مهار آن‌ها مشترک است (Farajzadeh et al, 2017).

بنابر اهمیت بحث فرسایش و رسوب، به‌منظور جلوگیری و کنترل فرسایش خاک، کاهش مقدار رسوب تولیدی و اجرای صحیح برنامه‌های حفاظت خاک، ارزیابی و برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب ضروری است (Refahi, 1996). در این خصوص با توجه به فقدان یا کمبود آمار و اطلاعات در برآورد مقدار فرسایش و رسوب تولیدی و همچنین مقرون به‌صرفه نبودن روش‌های سنتی و کلاسیک، به‌کارگیری روش‌های تجربی مناسب در این زمینه بسیار الزامی می‌باشد. معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) به‌عنوان پرکاربردترین روش تخمین فرسایش خاک (Arkhi and niazi, 2010; Ahmadabadi and Sadeghifar, 2017) با ترکیب فن‌سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی میزان فرسایش خاک حوزه‌های آبخیز به‌صورت توزیعی قابل برآورد است (Millward and Mersey, 1999). در ادامه همین تلاش‌ها با توجه به یافته‌های RUSLE و EPM در جهت توسعه مدل‌ها و رویکردهای مختلف، مدل تجربی فرسایش و رسوب G2 ارائه شد که شامل دو بخش تخمین فرسایش کمی (Karydas and Panagos, 2018) و برآورد مقدار رسوب تولیدی با استفاده از نسبت تحویل رسوب می‌باشد. مدل G2 قابل اجرا و هماهنگ با داده‌های ورودی جغرافیایی استاندارد از پایگاه‌های داده جهانی است.

همچنین کاربرد ویژه تصاویر ماهواره‌ای در این مدل در جهت برآورد مقدار فرسایش خاک و رسوب تولیدی باعث شده که قابلیت استفاده در مناطق وسیع برای سال‌های متوالی را داشته باشد (Panagos et al, 2014; Karydas and Panagos, 2018; Balouei, 2020; Karydas et al, 2020; Jeanneau et al, 2021; Polovina, 2021; Mohammadi et al, 2021; Han et al, 2023). با توجه به ضرورت برآورد نسبتاً دقیق مقادیر فرسایش و رسوب تولیدی در یک حوزه آبخیز به‌منظور بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت یکپارچه، نیاز است در اجرای مدل‌های تجربی همچون مدل G2 که بر پایه داده‌های ماهواره‌ای هستند، دقت و حساسیت ویژه‌ای به‌خرج داد که نتایج به واقعیت زمینی نزدیک باشد.

تحلیل حساسیت مدل تجربی که شامل مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی در یک مدل است، به‌عنوان رویکردی بهینه برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل به‌صورت سازمان‌یافته و پیش‌بینی مناسب نتایج می‌باشد. بررسی حساسیت در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات (Pandey et al, 2008; Liu and Liu, 2010; Cheviron et al, 2011; Odongo et al, 2013; Estrada et al, 2017) اشاره نمود. این در حالی است که تاکنون گزارشی در ارتباط با تحلیل حساسیت مدل تجربی G2 مستند نشده است.

حساسیت خاک در فرسایش به‌عنوان فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، شناخته می‌شود، که تابعی از ویژگی‌های خاک مانند بافت، ساختمان و میزان کربن آلی خاک است و همبستگی بالایی با نوع تیپ خاک دارد (Wischmeier et al, 1971). برای محاسبه این فاکتور از اطلاعات خاک حوزه که با حفر پروفیل به دست می‌آید و مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است، استفاده می‌شود. این در حالی است که اطلاعات خاک از پایگاه جهانی Soilgrid قابل دست‌یابی است و استفاده از آن برای حوزه‌های فاقد آمار بسیار کارا و با صرفه اقتصادی زیادی همراه

¹ Remote Sensing (RS)

² Geographic Information System (GIS)

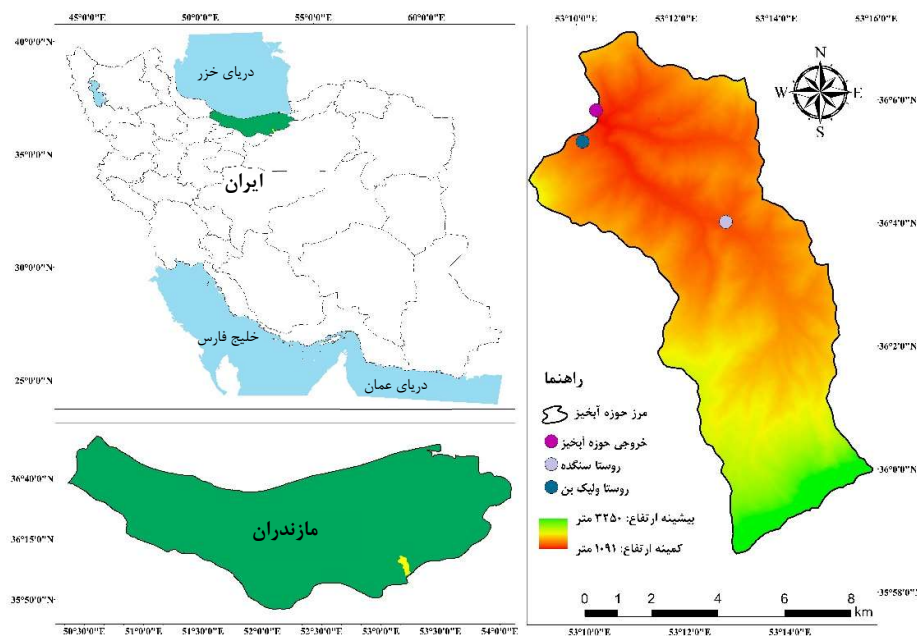
³ Sediment Delivery Ratio (SDR)

خواهد بود. به همین منظور در پژوهش حاضر حساسیت نتایج مدل فرسایش و رسوب G2 به نحوه اجرا و رعایت نکات ضروری در پارامتر فرسایش پذیری خاک در مدل برای بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۰۱ در حوزه آبخیز معرف کسلیان واقع در استان مازندران پرداخته شده است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز معرف کسلیان که از سرشاخه‌های رودخانه تالار در استان مازندران است، در محدوده جغرافیایی $53^{\circ}08'$ تا $53^{\circ}15'$ طول شرقی و $35^{\circ}58'$ تا $36^{\circ}07'$ عرض شمالی با وسعت $68/75$ کیلومتر مربع واقع شده است (Saadati et al, 2006). حداقل ارتفاع آن 1091 و حداکثر ارتفاع آن 3250 متر از سطح دریاست و دارای سه ایستگاه کلیماتولوژی و نه ایستگاه باران سنجی است. همچنین ایستگاه هیدرومتری حوزه در ارتفاع 1200 متر از سطح دریا و در نزدیکی روستای ولیک بن قرار دارد. متوسط بارندگی در حوزه آبخیز حدود 791 میلی‌متر (Janizadeh and vafakhah, 2021) و مطابق با طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌مرطوب تا بسیار مرطوب می‌باشد (Sadeghi et al, 2017). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز معرف کسلیان در استان مازندران و ایران

جمع‌آوری شد.

کاربست مدل G2: یک مدل تجربی جهت برآورد میزان فرسایش خاک در فواصل زمانی مختلف است و یک ابزار کمی با دو قسمت مجزا، برآورد فرسایش خاک (با عنوان G2loss) و دیگری تخمین بار رسوب می‌باشد (با عنوان G2sed) (Karydas and Panagos, 2018). پارامترهای ورودی مدل G2 برای تخمین فرسایش کمی در یک معادله جبری به شرح رابطه (۱) می‌باشد (Panagos et al, 2012).

روش پژوهش

داده‌های مورد نیاز پژوهش: برای انجام پژوهش حاضر اطلاعات پایه مورد نیاز شامل نقشه توپوگرافی و آبراهه‌ها، مدل رقومی ارتفاعی با دقت مکانی $12/5$ متر، تصاویر ماهواره‌های Landsat، MODIS، Sentinel_2 و داده‌های Soilgrid جهانی با دقت مکانی 200 متر از پایگاه‌های اطلاعاتی مربوطه تهیه شد. همچنین داده‌های مربوط به بارندگی ایستگاه‌های داخل و حومه حوزه آبخیز معرف کسلیان از ادارات آب منطقه‌ای ساری و هواشناسی

عامل فرسایش پذیری خاک محاسبه شد اما در روش دوم با استفاده از بازدید میدانی ۳۷ نمونه خاک با پراکنش مناسب در همه کاربری‌ها برداشت شد که در شکل (۲) نقشه کاربری اراضی و نقاط نمونه برداری ارائه شد. در نهایت پس از اندازه‌گیری بافت خاک با روش هیدرومتری و تعیین مقدار ماده آلی خاک با استفاده از روش درون‌یابی عکس فاصله وزنی (IDW) نقشه فرسایش پذیری خاک حوزه آبخیز مطالعاتی تهیه شد. معادله مشترک مورد استفاده در هر دو روش به شرح رابطه (۴) می‌باشد.

(۴)

$$S = 0.1317 * \left\{ \frac{2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - OM) + 3.25 * (P - 3)}{100} \right\}$$

که در آن S عامل فرسایش پذیری خاک برحسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، M عامل بافت خاک به صورت (درصد رس - ۱۰۰) - (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز)، OM محتوای ماده آلی (درصد)، S وضعیت ساختمان خاک (S=۱) دانه‌بندی بسیار ریز، S=۲ دانه‌بندی ریز، S=۳ دانه‌بندی متوسط، S=۴ دانه‌بندی به صورت قطعات صفحه‌ای و مشخص) و P وضعیت نفوذپذیری (P=۱) بسیار سریع تا P=۶ خیلی کند) می‌باشد (Mohammadi et al, 2021).

عوامل توپوگرافی و تعدیل شیب: عامل توپوگرافی به‌منظور برآورد تأثیر خصوصیات توپوگرافی زمین روی خطر فرسایش مشخص شده است (Karydas et al, 2020). عامل تعدیل شیب نیز منجر به کاهش اثر نسبی عامل توپوگرافی در خطر فرسایش می‌شود (Rahmani et al, 2018). روابط (۵) و (۶) به ترتیب برای محاسبه عوامل توپوگرافی و تعدیل شیب ارائه شده است (Karydas and Panagos, 2016).

$$T = \left(\frac{A_S}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (5)$$

که در آن T عامل توپوگرافی (بدون بعد)، A_S تجمع جریان (متر) و β شیب (رادیان) می‌باشد.

$$I = 1 + \sqrt{\frac{S_F}{DN_{Max}}} \quad (6)$$

S_F مقدار فیلتر سوبل تصویر در محدوده صفر تا DN_{Max} است.

$$E = \left(\frac{R}{V} \right) \cdot S \cdot \left(\frac{T}{I} \right) \quad (1)$$

که در آن E مقدار خاک برداشت شده (تن بر هکتار)، R عامل فرسایش پذیری باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت)، V عامل نگهداشت پوشش گیاهی (بدون بعد)، S عامل فرسایش پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر)، T عامل توپوگرافی (بدون بعد) و در آخر I عامل تضعیف شیب (بدون بعد). (Karydas and Panagos, 2016). که نحوه محاسبه هریک از عوامل ورودی مدل به صورت ذیل است. عامل فرسایش پذیری باران: این عامل با ایجاد روابط رگرسیونی با بهترین پردازش بین داده‌های بارندگی ۱۱ ایستگاه، پیش‌بینی شد (Silva, 2004; Khaledi, 2021). در پژوهش حاضر روابط (۲) بهترین پردازش بین متوسط داده‌های بارندگی سالانه و ارتفاع از سطح دریا را نشان دادند.

$$P = (-0.2276 \times DEM) + 981.31 \quad (2)$$

$$R = (0.38 \times P_{i=1}^{20}) + 81.5$$

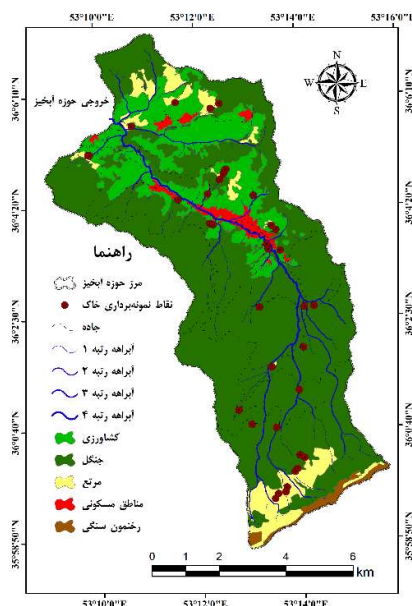
که در معادلات فوق P نشان دهنده نقشه متوسط بارندگی سالانه، DEM مدل رقومی ارتفاعی منطقه، $P_{i=1}^{20}$ نقشه بارندگی سالانه در طول دوره آماری مورد پژوهش و در آخر R عامل فرسایش پذیری باران بر حسب مگاژول میلی‌متر بر هکتار سال.

عامل نگهداشت پوشش گیاهی: عامل نگهداشت پوشش گیاهی یک عامل پویا بوده و به‌صورت رابطه (۳) ارائه شده است (Karydas and Panagos, 2018; Mohammadamini et al, 2015).

$$V = e^{(LU * F_{cover})} \quad (3)$$

که در آن V عامل نگهداشت پوشش گیاهی می‌باشد و برای زمین‌های لخت و مدیریت بسیار ضعیف برابر با یک و برای زمین‌های با شرایط مدیریتی بهتر بیشتر از یک است (بی‌بعد)، F_{cover} پوشش گیاهی جزء که از NDVI تصاویر MODIS استخراج شد و در نهایت LU یک پارامتر تجربی که بر اساس طبقات پوشش گیاهی است (Panagos et al, 2012).

عامل فرسایش پذیری خاک: در پژوهش حاضر عامل فرسایش پذیری خاک به دو روش محاسبه شد. در روش اول با استفاده از داده‌های جهانی Soilgrid در عمق سطحی،



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی و نقاط نمونه برداری خاک در حوزه آبخیز معرف کسلیان

نقشه های توزیعی باعث ایجاد داده های پرت و نتایج غیرمنطقی می شود که در این مطالعه نیز حدود دو درصد داده پرت و غیر قابل قبول وجود داشت که تغییر گردید. سپس مدل، در هر دو حالت مقدار فرسایش صخره ای برابر با صفر و تغییر داده های پرت اجرا گردید. در آخر جهت بررسی اختلاف آماری نتایج به دست آمده از هر دو روش Soilgrid و IDW، بعد از احراز نرمال بودن و یکسان بودن واریانس داده‌ها، با استفاده از آزمون های آماری ANOVA، دانکن و t مستقل مورد مقایسه قرار گرفت.

بحث و نتایج

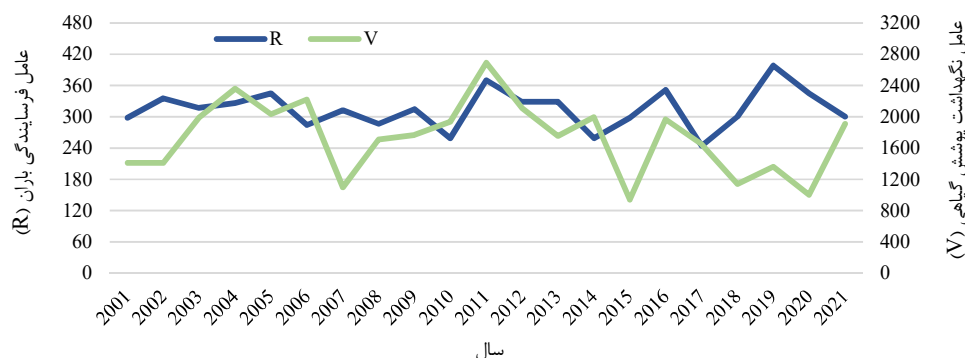
نتایج عوامل ورودی مدل G2: با تهیه نقشه‌ها و تصاویر مورد نیاز، عوامل ورودی مدل G2 محاسبه شد. دو عامل فرسایش‌دهی باران و نگهداشت پوشش گیاهی به‌عنوان عوامل پویا برای بازه زمانی مورد مطالعه در مقیاس زمانی سالانه محاسبه شد که در تمام سال‌ها عامل فرسایش‌دهی باران در بالادست حوزه آبخیز به دلیل نوع نزولات کمینه و در پایین‌دست حوزه آبخیز در بیشینه مقدار خود بود. بیشینه مقدار عامل نگهداشت پوشش گیاهی در بازه زمانی مورد بررسی نیز در بخش جنگلی حوزه آبخیز و کمینه مقدار آن در مراتع قسمت مرتفع و جنوبی حوزه آبخیز که دارای

حساسیت‌های اجرا مدل: با توجه به این که مدل‌ها

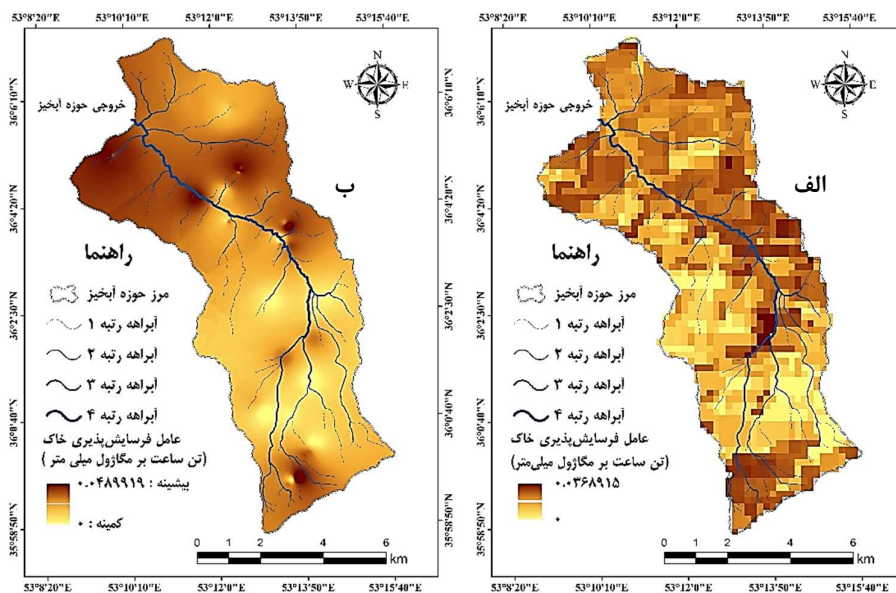
بر مبنای روابط ریاضی بوده است، دقت و حساسیت در برآورد عوامل ورودی و همچنین شناخت منطقه مورد مطالعه به جهت اینکه نتایج به واقعیت زمینی نزدیک باشد، بسیار ضروری است. عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز به عنوان یکی از پارامترهای اصلی و تاثیرگذار بر فرسایش، به عنوان پایداری و ایستادگی خاک در مقابل گسیختگی و انتقال ذرات گفته می شود (Bryan, 2000) و تحت تاثیر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به بافت خاک، مقاومت سنگدانه‌ها و نفوذپذیری خاک اشاره کرد (Jain and Singh, 2003; Benselama et al, 2018). در مطالعه حاضر عامل فرسایش پذیری خاک (S) در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۰۱ ابتدا با استفاده از داده‌های Soilgrid جهانی و بار دیگر با استفاده از داده‌های نمونه‌های خاک برداشت شده در منطقه و نقشه فرسایش خاک حاصل از روش IDW به دست آمد. سپس مدل G2 را با هر دو S به دست آمده اجرا و نتایج آن مقایسه گردید. علاوه بر این بخش قابل توجهی از حوزه دارای کاربری صخره است که سهمی در ایجاد فرسایش منطقه نداشت، و به همین دلیل مقدار فرسایش صفر در نظر گرفته شد. همچنین در برخی موارد خطای محاسباتی نرم‌افزار در

همچنین عامل توپوگرافی در بخش‌های مختلف این آبخیز تغییرات متفاوتی داشته اما بخش عظیمی از مناطق کم‌شیب آن دارای عامل توپوگرافی نزدیک به صفر است. عامل تعدیل شیب نیز با استفاده از تصویر Sentinel_2 در بازه بین ۱ تا ۲ تهیه شد.

پوشش گیاهی ضعیف و فرسایش شیاری است، قرار داشت. تغییرات دو عامل پویای مدل در بازه زمانی مورد مطالعه در شکل (۳) ارائه شد. عامل فرسایش‌پذیری خاک حاصل از روش‌های داده‌های Soilgrid جهانی و IDW به طور متوسط در حوزه آبخیز معرف کسلیان به ترتیب برابر ۰/۰۲۴ و ۰/۰۲۰ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر بود (شکل ۴).



شکل ۳- متوسط مقدار عوامل فرسایش‌پذیری باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت) و نگهداشت پوشش گیاهی (بی‌بعد) در ۲۰ سال اخیر در حوزه آبخیز معرف کسلیان



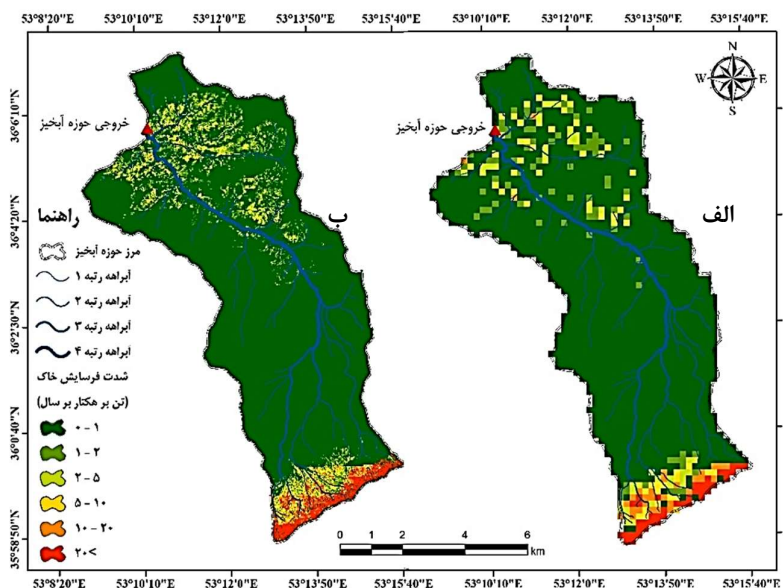
شکل ۴- نقشه‌های فرسایش‌پذیری خاک حاصل از روش‌های الف) داده‌های Soilgrid جهانی و ب) IDW حوزه آبخیز معرف کسلیان

داده‌های Soilgrid جهانی و IDW برآورد شد (شکل ۵ و ۶). نتایج برای تمام سال‌ها و روش‌ها نشان داد که در حوزه آبخیز معرف کسلیان مقدار فرسایش به صورت کیفی در طبقه کمینه قرار داشت و بیشینه مقدار آن در مراتع بخش

نتایج برآورد مقدار فرسایش خاک سالانه حوزه آبخیز معرف کسلیان با استفاده از مدل G2: پس از تهیه عوامل ورودی مدل، مقدار فرسایش خاک در پایه زمانی مورد پژوهش با هر دو عامل S حاصل از روش

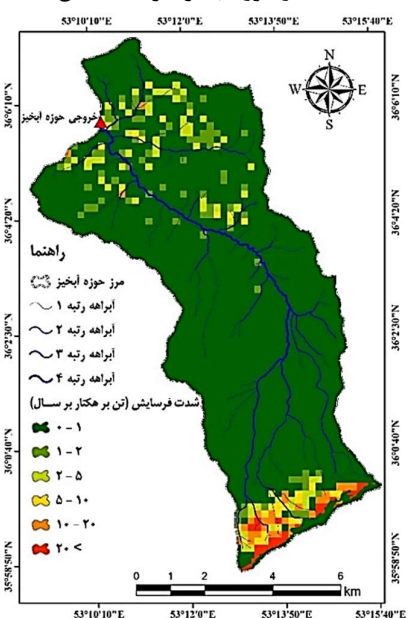
هکتار بر سال و مقدار فرسایش ۱/۴۳ تن بر هکتار بر سال با نسبت تحویل رسوب ۰/۳۴۲ گزارش شده است که با نتایج بدست آمده، مطابقت دارد. همچنین نتایج پژوهش حاضر با پژوهش اسمعیلی قلمز و همکاران در سال ۱۴۰۰ که با استفاده از مدل ICONA شدت فرسایش خاک را به تفکیک کاربری مشخص کرد، همخوانی دارد

مرتفع حوزه آبخیز که دارای پوشش گیاهی ضعیف است، رخ داده است. قابل ذکر است در پایین دست نیز به دلیل دخالت‌های انسانی لکه‌هایی با فرسایش بالا مشاهده شد. براساس مطالعات تلفیق طرح آبخیزداری (توجهی) حوزه آبخیز سنگده (مازندران) کسلیان، در حوزه آبخیز معرف کسلیان میزان رسوب‌دهی ویژه کل آبخیز ۰/۴۹ تن بر



شکل ۵- نقشه‌های نتایج اولیه برآورد شدت فرسایش خاک مربوط به سال ۲۰۲۱ با عامل S حاصل از الف) داده‌های Soilgrid جهانی و ب) روش

IDW در حوزه آبخیز معرف کسلیان



شکل ۶- نقشه نهایی شدت فرسایش خاک مربوط به سال ۲۰۲۱ با استفاده از عامل S حاصل از روش Soilgrid در حوزه آبخیز معرف کسلیان

بررسی میزان دقت نتایج:

گرفتن فرسایش صفر برای کاربری صخره، مقدار فرسایش متوسط حوزه بیش از یک تن بر هکتار در سال کاهش یافت این در حالی است که تنها ۱/۳ درصد از سطح حوزه را کاربری صخره تشکیل داده است. همچنین با تغییر داده‌های پرت مقدار فرسایش در روش داده‌های Soilgrid جهانی از ۲/۷۹ به ۱/۴۴ تن بر هکتار در سال کاسته شد (جدول ۱). تحلیل آماری نتایج مذکور با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یکطرفه، بیانگر آن است که بین سه مرحله مذکور در روش Soilgrid اختلاف معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. همچنین نتایج مقایسه میانگین با آزمون دانکن نشان داد که هر سه گروه داده (نتایج اولیه، اصلاح صخره و تغییر داده‌های پرت) (جدول ۲ و ۳) با همدیگر از نظر آماری دارای اختلاف معنی دار می‌باشند.

داده‌های به دست آمده از اجرای مدل بعد از رعایت نکات مذکور در روش کار، نشان داد که با وجود اختلاف کم در نتایج اما مقدار فرسایش در همه حالات مورد بررسی به طور متوسط در طبقه کمینه (بین بازه ۰-۵) است؛ مقایسه برآورد مقادیر فرسایش خاک مدل با استفاده از داده‌های Soilgrid جهانی با نتایج مدل حاصل از روش IDW مورد بررسی بیانگر این است که نتایج بسیار نزدیک به هم و به‌طور متوسط مقدار فرسایش خاک در هر دو روش حدوداً ۴/۳ تن بر هکتار در سال است. همانطور که گفته شد برای مقایسه میانگین مقادیر اولیه فرسایش، پس از احراز نرمال بودن داده‌ها و همچنین فرض یکسان بودن واریانس‌ها از آزمون t مستقل استفاده شد. نتایج این آزمون حاکی از آن بود که بین مقادیر فرسایش برآورد شده از دو روش Soilgrid و IDW اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. با در نظر

جدول ۱- مقدار برآوردی فرسایش خاک سالانه بر حسب تن بر هکتار با استفاده از مدل G2 و با رعایت نکات اجرایی در حوزه آبخیز معرف کسلیان

نکات	نتایج اولیه حاصل از روش Soilgrid	نتایج اولیه حاصل از روش IDW	اصلاح صخره در روش Soilgrid	تغییر ٪ داده‌های پرت در روش Soilgrid	نکات	نتایج اولیه حاصل از روش Soilgrid	نتایج اولیه حاصل از روش IDW	اصلاح صخره در روش Soilgrid	تغییر ٪ داده‌های پرت در روش Soilgrid
۲۰۰۱	۴/۶۳	۴/۲۴	۳/۱۹	۱/۴۷	۲۰۱۲	۴/۳۱	۴/۶۷	۲/۸	۱/۲۴
۲۰۰۲	۵/۰۶	۴/۵۸	۳/۴۲	۱/۹۹	۲۰۱۳	۴/۳۴	۴/۷۴	۲/۸۴	۱/۲۴
۲۰۰۳	۴/۷۸	۴/۳۱	۳/۲	۱/۷۹	۲۰۱۴	۳/۵۲	۳/۷۳	۲/۳۴	۱/۳۸
۲۰۰۴	۴/۶	۴/۱۱	۳/۰۲	۱/۵	۲۰۱۵	۳/۹۳	۴/۱۲	۲/۶	۱/۲۶
۲۰۰۵	۵/۳۳	۴/۸	۳/۵۹	۱/۷۷	۲۰۱۶	۴/۳۵	۴/۵۴	۲/۸۴	۱/۵۷
۲۰۰۶	۴/۳۵	۳/۹	۲/۸۹	۱/۳۹	۲۰۱۷	۳/۲۲	۳/۴۳	۲/۱۱	۱/۱۹
۲۰۰۷	۴/۵۱	۴/۸۹	۳/۰۶	۱/۵۶	۲۰۱۸	۴/۲۲	۴/۵۶	۲/۸۵	۱/۴۳
۲۰۰۸	۴/۰۹	۴/۴۷	۲/۸۵	۱/۶۹	۲۰۱۹	۴/۷۲	۴/۵۱	۲/۵۳	۱/۲۲
۲۰۰۹	۴/۳۲	۴/۶۶	۲/۸۹	۱/۵۷	۲۰۲۰	۴/۵۷	۴/۵۳	۲/۵۳	۱/۳۸
۲۰۱۰	۳/۶۶	۳/۹۸	۲/۴۶	۱/۱۶	۲۰۲۱	۳/۶۳	۳/۴۳	۱/۸۸	۰/۹۷
۲۰۱۱	۴/۳۹	۴/۶۵	۲/۷۹	۱/۴۳	میانگین	۴/۳۱	۴/۳۳	۲/۷۹	۱/۴۴

جدول ۲- نتایج بررسی مقادیر برآوردی فرسایش خاک با استفاده از آزمون‌های آماری

نوع آزمون	F	Sig.	آماره t
آزمون t مستقل	۰/۰۵۶	۰/۹۱۷	-۰/۱۰۵
تجزیه واریانس یکطرفه	۲۶۹/۰۷۵	۰/۰	-

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین مقادیر فرسایش خاک حاصل از روش Soilgrid با آزمون دانکن

گروه داده	تعداد داده	زیرگروه اول	زیرگروه دوم	زیرگروه سوم
تغییر داده‌های پرت	۲۱	۱/۴۳۸	-	-
اصلاح صخره	۲۱	-	۲/۷۹۴	-
نتایج اولیه	۲۱	-	-	۴/۳۱۱

نتیجه‌گیری

روش IDW و نبود اختلاف آماری معنی‌دار بین این نتایج، تاییدی بر صحت داده‌های Soilgrid جهانی است. به عبارت دیگر با توجه به سهولت دسترسی و کم هزینه‌تر بودن داده‌های جهانی، می‌توانند با اطمینان بالایی به جای داده‌های صحرایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین رعایت نکات اصلاحی مانند؛ برابر صفر قرار دادن مقدار فرسایش خاک در کاربری صخره حدود ۳۵ درصد و تغییر مقادیر داده‌های پرت با استفاده از انحراف معیار، بیش از ۵۰ درصد متوسط مقدار فرسایش خاک نسبت به حالت قبل کاهش داد. تحلیل‌های آماری معنی‌دار بودن این کاهش مورد تایید قرار داد. نتایج این مطالعه بیانگر دقت کافی داده‌های پایگاه جهانی خاک در برآورد مقدار فرسایش خاک با استفاده از مدل G2 است، که با توجه به عدم صرف هزینه و دسترس بودن به ویژه در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار قابلیت استفاده را دارا می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از داده‌های جامع و کامل و نیز با استفاده از رویکردهای تکمیلی، فرسایش خاک براساس حساسیت‌پذیری این پدیده‌ها نسبت به سایر عوامل نیز مورد بررسی قرار گیرد.

مدل G2 یک الگوریتم کمی، برای نقشه‌برداری از هدررفت خاک و نرخ رسوب در فواصل زمانی ماهانه، فصلی و سالانه و طراحی شده برای اجرا در محیط GIS، با گرفتن ورودی از پایگاه‌های جغرافیایی موجود توسط موسسات اروپایی یا دیگر پایگاه‌های بین‌المللی می‌باشد. به دلیل اینکه بخش زیادی از حوزه آبخیز معرف کسپیلیان دارای پوشش جنگلی است، مقدار فرسایش خاک آن با استفاده از داده‌های Soilgrid جهانی با مدل G2 برابر ۱/۴۴ تن بر هکتار در سال می‌باشد، که بیانگر این است که در دامنه کم قرار می‌گیرد.

در مطالعه حاضر سعی بر آن شد که حساسیت مدل به داده‌های پایگاه جهانی خاک در تهیه پارامتر فرسایش پذیری خاک سنجیده و میزان دقت آن در مقایسه با داده‌های نمونه‌های خاک حوزه آبخیز مورد مطالعه مورد بررسی قرار گیرد.

اختلاف ناچیز بین نتایج اولیه مقدار فرسایش خاک بدست آمده از عامل S حاصل از روش Soilgrid در مقایسه با مقدار فرسایش خاک بدست آمده از عامل S حاصل از

سپاسگزاری

نمونه‌برداری صحرایی و همچنین آقای دکتر وحید موسوی برای مشاوره در بخش سنجش از دور قدردانی نمایند.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از آقای وحید بیرانوندی و خانم فاطمه اکبری برای کمک‌هایشان در

منابع

Ahmadabadi A., Sedighifar Z. 2017. Estimating the rate of erosion and sediment production with the help of modified global soil erosion equation (RUSLE) in the Hable River catchment. *Natural Geography*, 10 (37), pp.83-103. (In Persian)

Arkhi S., Niazi Y. 2010. Investigating application of GIS and RS to estimate Soil Erosion and Sediment Yield Using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran). *J. of Water and Soil Conservation*, 17(2), pp.1-27. (In Persian)

Balouei F. 2020. Simulation of soil erosion in Ilam province using G2 model. The third international conference of biology and earth sciences. (In Persian)

Benselama O., Mazour M., Hasbaia M.,

Djoukbal O., Mokhtari S. 2018. Prediction of water erosion sensitive areas in Mediterranean watershed, a case study of Wadi El Maleh in north-west of Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12), pp.1-15.

Bryan R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3-4), pp.385-415.

Chevron B., Le Bissonnais Y., Desprats J.F., Couturier A., Gumière S.J., Cerdan O., Darboux F., Raclot D. 2011. Comparative sensitivity analysis of four distributed erosion models. *Water Resources Research*, 47(1).

Construction Jihad Organization of Mazandaran Province. 1996. Studies on the integration of the watershed management plan (justification) of the

Sangde watershed (Mazandaran), Kesilian. pp.53. (In persian)

Esmacili Gholzom H., Ahmadi H., Moeini A., Motamed Vaziri B. 2021. Water erosion risk assessment in the Kasilian watershed with ICONA model and GIS/RS techniques. *Researches in Earth Sciences*, 12(3), pp.144-163. (In persian)

Estrada-Carmona N., Harper E.B., DeClerck F., Fremier A.K. 2017. Quantifying model uncertainty to improve watershed-level ecosystem service quantification: a global sensitivity analysis of the RUSLE. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(1), pp.40–50.

Farajzadeasal M., Hedaei A.A., Molashahi M., Rajabi Rostamabadi N. 2017. Analysis and comparison of suspended sediment in the Caspian and Central Iran watersheds. *Hydrogeomorphology*, 11, pp.82-59. (In persian)

Han Y., Zhao W., Zhou A., Pereira, P. 2023. Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands. *Geoderma*, 435, 116514.

Jain, S. K., Singh, V.P. 2003. *Water resources systems planning and management*. Elsevier.

Janizadeh S., Vafakhah M. 2021. Flood hydrograph modeling using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system based on rainfall components. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, pp.1-14.

Jeanneau A., Herrmann T., Karydas C.G., Bouarour O., Zdruli P. 2021. Mapping spatio-temporal soil erosion patterns in the Candelaro river basin, Italy, using the G2 Model with sentinel 2 imagery. *Geosciences*, 10(89), pp.1-22.

Karydas C.G., Panagos P. 2018. The G2 erosion model: An algorithm for month-time step assessments. *Environmental Research*, 161(November 2017), pp.256-267.

Karydas C.G., Bouarour O., Zdruli P. 2020. Mapping spatio-temporal soil erosion patterns in the Candelaro river basin, Italy, using the G2 Model with sentinel 2 imagery. *Geosciences*, 10(89), pp.1-22.

Karydas, C.G., Panagos, P. Karydas, C.G., Panagos, P. 2016. Modelling monthly soil losses and sediment yields in Cyprus. *International Journal of Digital Earth*, 9(8), pp.766-787.

Khaledi Darvishan A., Seddiqi F., Azami N.,

Mahmoudi B., Fathi Dareniche A., Khodamoradi H. 2021. Experiences of measuring and modeling soil erosion in the Khamsan Jovi watershed. The 17th Iranian Congress of Soil Sciences and the 4th National Conference on Water Management in the Farm of Wise Soil Regeneration and Wise Water Governance. (In persian).

Liu L., Liu X.H. 2010. Sensitivity analysis of soil erosion in the northern Loess Plateau. *Procedia Environmental Sciences*, 2, pp.134–148.

Millward A.A. Mersey J.E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in amountainous tropical watershed. *Catena*, 38, pp.109-129.

Mohammadamini H., Khalidi Darvishan A., Katbikord A. 2015. Introducing the G2 model with the ability to provide a map of spatial and temporal changes in soil loss as a basic tool for watershed management. *Watershed Promotion and Development*, 3(11), pp.27-23. (In persian)

Mohammadi S., Balouei F., Haji Kh., Khaledi Darvishan A., Karydas, C.G. 2021. Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. *International Journal of Digital Earth*, 14(8), pp.1019-1039.

Odongo V.O., Onyando J.O., Mutua B.M., Becht R. 2013. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa catchment, Kenya. *International Journal of Sediment Research*, 28(3), pp.368–383.

Panagos P., Karydas C.G., Cristiano B., Ioannis G. 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in crete focusing on agricultural land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27(PARTB), pp.147-155.

Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. 2012. Monthly soil erosion monitoring based on remotely sensed biophysical parameters: a case study in strymonas river basin toward a functional pan-European service. *International Journal of Digital Earth*, 5(6), pp.461-487.

Pandey A., Chowdary V.M., Mal B.C., Billib M. 2008. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *Journal of Hydrology*, 348(3–4), pp.305–319.

Polovina S., Radić B., Ristić R., Kovačević J., Milčanović V., Živanović N. 2021. Soil erosion

assessment and prediction in urban landscapes: A new G2 model approach. Applied Sciences (Switzerland), 11(9), 4154.

Rahman M.R., Shi Z.H., Chongfa C. 2009. Soil erosion hazard evaluation-an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. Ecological Modelling, 220(13), pp.1724-1734.

Rahmani A., Haqizadeh A., Tahmasabipour N., Zainivand H. 2018. Introduction of USPED and G2 erosion models with the ability to estimate the amount of soil erosion in different time frames for watershed management. The 13th National Watershed Science and Engineering Conference and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment. (In persian)

Refahi, H. (1996). Water erosion and its control. Tehran University Press.167P. (InPersian).

Saadati H., Gholami S., Sharifi F., Ayubzadeh S.A. 2006. Investigating the effects of land use change on the surface runoff of the simulation model. Natural Resources of Iran, 59(2), pp.313-301. (In persian) Sadeghi S.H.R., Mazin M., Moradi H.R. 2017. Preparation of hydrograph using different components of rainfall in Kesilian watershed. Natural Resources of Iran, 60(1), pp.33-43. (In persian)

Silva A.M.D. 2004. Rainfall erosivity map for Brazil. Catena 57, pp.251-259.

Wischmeier W.H., Johanson c.b., Cross B.V. 1971. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal Soil and Water Conservation, 26: 189-193.