The role of land use changes and rainfall on soil erosion rate in Evard watershed, Nekarood

Fateme Garshasbi [a], **Eisa Jokar Sarhangi** [b*]
[a]*Master's degree in environment hazards, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran*
[b]*Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar*

Research Full Paper
Article History (Received: 2023/06/4 Accepted: 2023/11/27)

Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion is very obvious and noticeable in Iran, where a large part of it is a desert and the soil does not have a suitable cover. In order to reduce soil erosion and control it, it is necessary to identify factors affecting soil erosion. Land exploitation methods, forest and pasture exploitation, creation of residential and urban areas, geological conditions, precipitation, weather factors, etc. are some of the factors that affect the intensity of erosion in the region. Therefore, knowing the quantitative values of soil erosion is effective in accurately estimating the adverse, hidden, and intangible effects of erosion

2- Methodology

In this research, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model has been used. The amount of soil erosion in the basin was calculated in two 20-year periods (1980-2000 and 2000-2020). This soil erosion model is calculated through six factors.

$$A=R\times K\times L\times S\times C\times P$$

(R) the Rainfall erosivity factor, (k) soil erodibility factor, (LS) are slope length and slope degree factors respectively, (c) vegetation management factor, and (P) soil protection factor. The data in this research for the implementation of this model including the rainfall erosivity factor (R), topography including slope length and slope degree (LS), and vegetation management (C) were prepared from the Google Earth Engine system. The soil erodibility factor (K) was obtained from the natural resources report. The BLM model was also used to estimate the evaluation of the RUSLE model. The Google Earth Engine system was used to prepare the land use maps of each of the 20-year periods. The land use map of the first period was prepared using the supervised classification method and calling Landsat 5 images, and The land use map of the second period was done using the CGLS-LC100 product, which is produced and updated at the Copernicus Global Earth Center and using Sentinel satellite images

3- Results

By analyzing the obtained maps, the rain erosion factor for the first period (1980-2000) has an average of 2.02, the minimum value is 1.80 and the maximum is 2.29, and the second period (2000-2020) is from 1.55 to 2.07 is variable, its average is 1.783. The erodibility factor of the region's soils varies from 0 to 0.349 and its average value is 0.0264. The topography factor of the studied basin varies from 0 to 250 and its average value is 8.77. The vegetation management factor varies between 0.181 and 0.505 and its average is 0.353. This factor varies between 0.315 and 0.494 in the second period, and its average is 0.429 and has an increasing trend compared to the first period, which indicates the decrease of vegetation in the study area compared to the first period. The ground protection factor is also considered to be 1. To calculate the annual average soil erosion rate of the Award Basin in the first period (1980-2000), the various factors of the RUSLE model were converted to the same raster format and cell size, and coordinate system. To determine the risk of soil erosion, the produced layers including

* **Corresponding Author: e.jokar@umz.ac.ir**

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

the rainfall erosivity layers, soil erodibility, topography, vegetation and soil protection factor were multiplied with the help of the Spatial Analyst extension of the ArcGIS program. The amount of annual loss of soil in terms of (tons per hectare per year) was obtained on a cell-by-cell basis. According to the results, the amount of erosion in the first period varies from 0 to 59.62 tons per hectare and its average is 1.64. The highest amount of soil erosion is in the middle and eastern regions with high slopes. In the second period, the layers of the soil erodibility factor, topography and soil protection factor are the same as in the first period because they are considered constant. The amount of erosion in the area in the second 20-year period varies from 0 to 63.38 tons per hectare, and its average is 1.75 and shows an increasing trend compared to the first period. The RMSE, MAE and MSE statistical indices were used to evaluate the accuracy of the RUSLE model and the degree of agreement of its erosion classes with the output of the BLM based on the map of sampling points. Examination of the values of the mentioned indicators showed that the root mean square error, mean absolute error and mean square error statistics in the RUSLE model have low values of 1.23, 0.96 and 1.52, respectively, as a result this model has It is a small error. After preparing the land use map for the first period, it was determined that in this period, the studied basin includes four land uses: forest, agriculture, pastures and woodlands, and residential. In the second period, there have been forest uses, destroyed forests, agriculture, pastures and woodlands, and residential areas. Then the land use maps prepared in the Google Earth Engine in two periods were transferred to the GIS environment system and the area of each of the above uses was obtained. The area of forests in the studied basin has decreased by 1590.956 hectares and 2014.827 hectares have been added to the area of degraded forests. Also, 2128/368 hectares have been added to the area of agriculture in this basin, and 2557/865 hectares have also decreased from the area of pastures in this area. It should be noted that 5.6266 hectares have been added to the area of residential areas of this basin.Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text. Click here and insert your abstract text.

4- Discussion & Conclusions

The findings of this research in two 20-year periods (1980 2000) and (2000 2020) in the studied area show that the amount of precipitation in the second period has decreased compared to the first period. The amount of Rainfall erosivity in the first period had a minimum value of 1.80 and a maximum value of 2.29. In the second period, its value varied between 1.55 and 2.07. Thus, the amount of precipitation in the second period did not greatly affect the process of increasing soil erosion. However, the examination of the pictures and maps prepared on the amount of land use changes shows that the amount of forest and pasture area in this region has decreased and the area of destroyed forests and agricultural and residential lands has been added. Therefore, the role of land use changes in increasing soil erosion is significant. The research results of Teimouri (2018), Mayahi (2021) and Arkhi (2022) also confirm that increasing rainfall, changing land use and reducing vegetation are effective in increasing soil erosion.

Key Words: Google Earth Engine, land use, rainfall erosivity, RUSLE

Cite this article: Garshasbi, F ., & Joker Sarhangi, E. (2024). The role of land use changes and rainfall on soil erosion rate in Evard watershed, Nekarood. *Journal of Environmental Erosion Research. 2024; 14 (1) :102-120.* http//doi.org/

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک در حوضه اوارد نکارود

فاطمه گرشاسبی: *دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر*
عیسی جوکار سرهنگی*: *دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۶)
DOI: http//doi.org/

چکیده

با توجه به اهمیت نقش خاک در تأمین نیازهای انسان، آگاهی از عوامل و روند فرسایش خاک به منظور مدیریت و جلوگیری از تخریب آن ضروری است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تلفیقی تاثیر کاربری اراضی و بارش در فرسایش خاک حوضه اوارد نکارود در دو دوره ۲۰ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰ و ۱۹۸۰-۲۰۰۰) انجام شد. برای این منظور از معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک ($RUSLE$)استفاده شده است. ارزیابی دقت این مدل با استفاده از شاخص‌های آماری و مدل BLMکه تمامی عوامل آن طی مشاهدات میدانی به دست آمد، انجام شد. داده‌های عوامل فرسایندگی باران(R)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و توپوگرافی (LS) از تصاویر ماهواره‌ای در گوگل ارث انجین به‌دست‌آمده‌اند. میانگین عامل R در دوره اول و دوم‌به ترتیب ۲/۰۲ و ۱/۷۸۳ $MJ\ mm\ ha^{-1}\ ha^{-1}\ y^{-1}$ و میانگین عامل Cبه ترتیب ۰/۳۵۳ و ۰/۴۲۹ به دست آمد که نشان‌دهنده تغییرات بارش و پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه است. نقشه طبقه بندی اراضی منطقه در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰) با استفاده از سنجنده TM و الگوریتم درخت طبقه بندی و رگرسیون تهیه شد. اعتبارسنجی با استفاده از نمونه‌های تعلیمی، ماتریس خطا و محاسبه شاخص‌های آماری انجام گرفت که صحت کلی ۰/۹۴ و ضریب کاپا ۰/۹۱ را نشان داد. برای دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰) از محصول جهانی پوشش زمین CGLS-LC100 با دقت ۸۰ درصد استفاده شد. تغییرات کاربری اراضی نیز در دو دوره با یکدیگر مقایسه شد که بر اساس آن مساحت جنگل‌ها و مراتع در این حوضه به ترتیب ۱۷ و ۲۷ درصد کاهش داشته و به مساحت جنگل‌های تخریبی، زمین‌های زراعی و مناطق مسکونی اضافه شده است. طبق نتایج به دست آمده میانگین سالانه فرسایش خاک در دوره اول ۱/۶۴ تن در هکتار در سال و حداکثر تا ۵۹/۶۲ تن در هکتار در سال و در دوره دوم ۱/۷۵ تن در هکتار در سال و حداکثر تا ۶۳/۳۸ تن در هکتار در سال متغیر است که بیانگر سیر افزایشی فرسایش خاک در حوضه اوارد است. این سیر افزایش فرسایش خاک بیشتر ناشی از کاهش پوشش گیاهی در منطقه است، بنابراین لازم است با قوانینی سختگیرانه و با مدیریتی اصولی مانع از تغییر کاربری‌ها و کاهش پوشش طبیعی سطح زمین در منطقه شد.

واژگان کلیدی: کاربری اراضی؛ فرسایندگی باران؛ گوگل ارث انجین ؛ RUSLE

* نویسندهٔ مسئول: e.jokar@umz.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

۱ـ مقدمه

ایران، از جمله کشورهایی است که فرسایش خاک در آن به سرعت به یکی از چالش‌های جدی در زمینه حفاظت از محیط‌زیست تبدیل می‌شود. هر سال، میلیون‌ها تن از خاک‌های حاصلخیز به دلیل عدم مدیریت صحیح و مناسب غیرقابل استفاده می‌گردد (Khaledi Darvishan et al, 2021). میانگین سالانه فرسایش خاک در ایران برابر ۱۶/۵ تن در هکتار (معادل ۲/۷ میلیارد تن تلفات کل سالانه) است (Asadi et al, 2022). فرسایش خاک تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد؛ اما تغییرات اقلیمی، بارش، و کاربری اراضی به دلیل نقش مؤثر انسان در آن‌ها، می‌توانند اهمیت بیشتری داشته باشند. تغییرات کاربری اراضی، تغییرات اقلیمی و به ویژه افزایش قدرت فرسایندگی باران می‌توانند موجب شدت گرفتن فرسایش خاک شوند (Teimouri et al,2018, & Prashanth et al, 2023). از آنجایی که ارزیابی فرسایش خاک در مقیاس‌های بزرگ و منطقه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است (Choupanian et al 2023)، سنجش از دور ماهواره‌ای به دلیل محدودیت استفاده از روش‌های زمینی برای چنین ارزیابی‌هایی و همچنین پایش مداوم تغییرپذیری مکانی-زمانی فرآیندهای طبیعی و کمی‌سازی آن‌ها می‌تواند دارای اهمیت اساسی باشد (chupin et al, 2022, Khanyaghma et al, 2014 & Zerehi et al, 2023). فرسایش خاک و تخریب اراضی در بسیاری از کشورها مشکلات زیادی را ایجاد کرده است، از این رو تلاش‌های شایان توجهی در توسعهٔ مدل‌های ارزیابی فرسایش خاک صرف شده است (Ganasri & Ramesh, 2016). مدل‌های فیزیکی فرسایش خاک اغلب پیچیده هستند و به ورودی داده‌های بالایی نیاز دارند که کاربرد این مدل‌ها را در مناطق با مقیاس بزرگ دشوار می‌کند؛ اما مدل‌های تجربی مانند معادله جهانی از دست دادن خاک (RUSLE) یک روش نسبتاً ساده برای ارزیابی فرسایش خاک در مناطق با مقیاس بزرگ است و با ارائه نتایج مناسب، دقت و پتانسیل بالایی در ارزیابی فرسایش خاک در سطح جهانی و منطقه‌ای دارد. علاوه بر این، ترکیب تکنیک‌های سنجش‌ازدور و GIS با مدل RUSLE، یک رویکرد مؤثر برای تخمین بزرگی و توزیع فضایی فرسایش خاک است (Ma et al, 2023).

تاکنون مطالعات متعددی در رابطه با موضوع تغییر اقلیم، بارش و به ویژه تغییر کاربری اراضی و تأثیر آن‌ها بر فرسایش خاک در مناطق مختلف صورت گرفته است. Chen و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثرات پوشش گیاهی و بارندگی بر فرسایش خاک در دامنه‌های شیب‌دار در فلات لس چین پرداختند. نتایج نشان داد که زمین‌های چمنزار و بوته‌زارهای با پوشش بالا، رواناب و فرسایش خاک کمتری دارند. مقایسه میانگین ضریب رواناب و ازبین‌رفتن خاک در سه نوع بارندگی نشان داد که بارندگی با شدت زیاد و مدت‌زمان کوتاه باعث رواناب سطحی بیشتر و ازدست‌دادن خاک در همه انواع پوشش گیاهی می‌شود. Ouyang و همکاران (۲۰۱۸) تأثیرات ترکیبی کاربری زمین و تغییرات خاصیت خاک بر فرسایش خاک را در منطقه مولیزول تحت توسعه کشاورزی طولانی‌مدت بررسی کردند که نتایج نشان داد تغییرات کاربری اراضی تأثیر قابل‌توجهی نسبت به تغییرات خاصیت خاک بر فرسایش خاک داشته است. Stefanidis و Stathis (۲۰۱۸) به بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر فرسایش خاک در یک حوضه آبریز کوهستانی مدیترانه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد کاهش ۲۱/۲ درصد در بارندگی سالانه تا پایان قرن ۲۱ و تغییرات فوق احتمالاً منجر به کاهش جزئی (۹/۴- درصد) در پتانسیل فرسایش خاک می‌شود. Papaiordanidis و همکاران (۲۰۱۹) به پیش‌بینی فرسایش خاک با استفاده از معادله جهانی RUSLE در سامانه گوگل ارث انجین پرداختند که بر اساس نتایج

* نویسندهٔ مسئول: e.jokar@umz.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

استفاده از RUSLE و گوگل ارث انجین منجر به تولید نقشه‌های پیش‌بینی فرسایش خاک به روشی کارآمد شد؛ همچنین در آوریل و جولای، مقادیر فرسایش با بارندگی همبستگی مثبت کم و با مقادیر NDVI همبستگی منفی متوسط دارند. Wang و Zhao (۲۰۲۰) تغییرات دینامیکی فرسایش خاک در حوضه رودخانه تائوهه با استفاده از مدل RUSLE و گوگل ارث انجین را بررسی کرده و نشان دادند میانگین فرسایش خاک حوضه رودخانه تاوهه در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ به ترتیب ۱۴۲۴، ۱۱۹۵، ۱۱۲۹، ۱۰۹۹ و ۱۱۲۴ تن در هکتار در سال بوده و روند نزولی کلی دارد. Kumar و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده گوگل ارث انجین و GIS به ارزیابی خطر فرسایش خاک در رودخانه چامبال در مرکز هند پرداختند. این مطالعه نشان می‌دهد که نوع بسیار شدید فرسایش خاک در حوضه رودخانه چمبال در خندق‌ها، دره‌ها و زمین‌های بایر با بالاترین میانگین نرخ فرسایش خاک به میزان ۱۳/۴۴ تن در هکتار در سال مشاهده می‌شود. همچنین عامل توپوگرافی و مدیریت پوشش گیاهی به ترتیب تاثیرگذارترین عامل بر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه هستند. Zhao و همکاران (۲۰۲۲) به ارتباط بین بارش و تغییرکاربری زمین با فرسایش خاک در چین پرداختند و نشان دادند تاثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک از تاثیر بارش بیشتر است. Sathiyamurthi و همکاران (۲۰۲۳) به برآورد فرسایش خاک برای یک حوزه آبخیز در تامیل نادو در هند با استفاده از مدل RUSLE و تکنیک سنجش از دور و GIS پرداختند. ضریب فرسایش بارندگی تولید شده برای سال های ۲۰۰۴ (خشک)، ۲۰۰۹ (عادی) و ۲۰۱۰ (تر) بود. نتایج نشان داد که میانگین نرخ فرسایش سالانه خاک ۵۴/۵۰ تن در هکتار در سال ۲۰۰۴ بود و در سال ۲۰۰۹ به طور قابل ملاحظه ای به ۹۶ هکتار افزایش یافت. این میزان برای سال ۲۰۱۰ به ۸۷ هکتار رسید. فرسایش در منطقه از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ به میزان ۴۳ درصد افزایش یافته است در حالی که از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ به میزان ۲۵ درصد کاهش یافته است. در ایران، Saffari و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر تغییرات پوشش و کاربری زمین در فرسایش خاک حوضه قره‌سو گرگانرود را بررسی کردند. نتایج تغییرات پوشش زمین نشان‌دهنده کاهش پوشش‌های جنگل متراکم، جنگل با تراکم کم و باغ و مرتع در برابر افزایش سطوح کشاورزی، زمین‌های بدون پوشش و سکونتگاه‌های انسانی در طی بازه سی‌ساله است. همچنین، نتایج تحقیق آنها سیر افزایشی پتانسیل فرسایش خاک درحوضه آبخیز قره‌سو را نشان داد. Teimouri و همکاران (۲۰۱۸) اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک را با استفاده از روش RUSLE ارزیابی کردند. نتایج نشان داد فاکتور فرسایش باران (R) و عامل پوشش گیاهی (C) در مدل RUSLE تحت‌تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی و نیز تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی قرار دارند. Arkhi (۲۰۲۲) به ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر فرسایش و رسوب با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS در حوضه پایین‌دست سد ایلام پرداخت. نتایج نشان داد که میانگین فرسایش در سال ۱۳۸۳، ۴۹/۸۲ تن در هکتار در سال بوده است که در سال ۱۳۹۸ مقدار آن به ۶۲/۸۰ تن در هکتار در سال رسیده است. بر اساس نتایج، افزایش جزئی بارندگی نه‌تنها باعث افزایش پوشش گیاهی نشده بلکه به دلیل تخریب آن در طول دوره مطالعه باعث افزایش قدرت فرسایندگی باران و در مجموع باعث افزایش فرسایش و رسوب گردیده است. Saljughy و همکاران (۲۰۲۲) اثر تغییر کاربری اراضی بر روند فرسایش خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در شرق هرمزگان را در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، افزایش فرسایش خاک در منطقه، تحت تأثیر

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

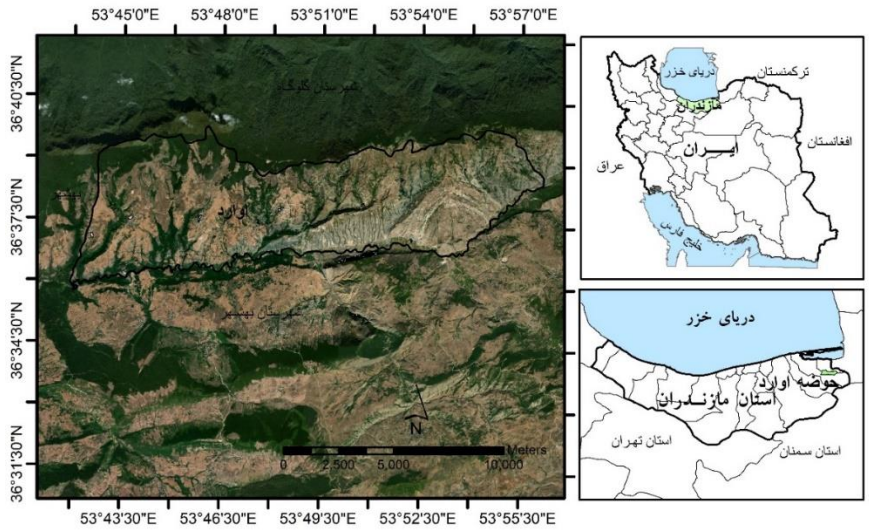
عوامل اقلیمی همچون خشکسالی و تغییرات بارش و عوامل انسانی از قبیل تغییرات غیراصولی کاربری اراضی و مدیریت نامناسب آب در حوضه‌های آبخیز بالا دست است.

در حوضه اوارد نکارود چندین روستای پرجمعیت وجود دارد که دخالت و بهره برداری‌های روز افزون از منابع طبیعی منطقه منجر به استفاده بیش از حد توان سرزمین، تغییر کاربری و کاهش پوشش گیاهی شده و تأثیر زیادی بر روند تخریب و فرسایش خاک گذاشته است. همچنین این منطقه با توجه به شیب زیاد و سازندهای سست شامل ماسه سنگ ضخیم همراه با شیل و نهشته‌های آبرفتی، نسبت به فرسایش بسیار حساس می‌باشد و پوشش گیاهی و خاک منطقه قدرت لازم برای نگهداری و جذب آب باران را ندارند (گزارش خاک‌شناسی اداره کل منابع طبیعی استان مازندران). پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک حوضه اوارد نکارود در دو دوره بیست ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۰ و ۲۰۰۰-۱۹۸۰)با استفاده از داده‌های گوگل ارث انجین و معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک انجام شد. تاکنون به بررسی صحت مکانی نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش حاصل از مدل RUSLE با استفاده از یک مدل پایه (BLM) و شاخص های آماری (RMSE، MAE و MSE) توجه چندانی نشده است. همچنین بررسی تلفیقی و تأثیر همزمان کاربری اراضی و مقادیر بارش بر فرسایش خاک با بهره‌گیری از فناوری سنجش ازدور و گوگل ارث انجین در منطقه انجام نشده است. مقایسه و تحلیل نتایج در دو دوره زمانی مختلف می‌تواند به ارتقاء درک از فرسایش خاک در منطقه و بهبود استراتژی‌های مدیریت محیطزیست و خاک کمک کند.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با نام حوضه اوارد نکارود در موقعیت جغرافیایی″۳۸ ′ ۴۲ °۵۳ تا ″۱۱ ′۵۷ °۵۳ طول شرقی و″۴۰ ′۳۵ °۳۶ تا ″۲۰ ′۳۹ °۳۶ عرض شمالی واقع شده است (نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ به شماره ۲-۶۷۶۳ سازمان نقشه‌برداری کشور). این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی جزء حوزه استحفاظی شهرستان بهشهر می‌باشد و در محدوده شرقی استان مازندران قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت حوضه اوارد ۹۴۱۰/۷ هکتار می‌باشد. حداقل ارتفاع حوضه ۸۰۲ متر و حداکثر ارتفاع آن ۱۷۳۵ متر است. واحدهای سنگی موجود در حوضه از قدیم به جدید متعلق به دوران پالئوزوئیک، مزوزوئیک و کواترنر است که سطوح وسیعی از آن‌ها را رخساره‌های آهکی، فیلیتی، مارنی و کنگلومرایی پوشانده است (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش بهشهر، سازمان زمین‌شناسی کشور). بر اساس اقلیم نمای آمبروژه، حوضه اوارد آب و هوای مدیترانه‌ای سرد و با توجه به روش دومارتن، آب و هوای نیمه مرطوب دارد. بر اساس نقشه همباران و دوره‌های آماری باران‌سنجی، میانگین سالانه بارندگی در حوضه حدود ۴۵۹ میلیمتر است. میانگین سالانه درجه حرارت منطقه ۱۱/۴۶ درجه سانتی‌گراد است که پایین‌ترین میانگین دما در ماه دی ۵/۲ درجه و بالاترین آن نیز در ماه تیر ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد است (گزارش هواشناسی اداره کل منابع طبیعی استان مازندران).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضهٔ اوارد

۳ـ مواد و روش

۳ـ۱ـ داده‌ها و مراحل اجرای پژوهش

در این پژوهش به‌منظور برآورد فرسایش و ارزیابی آن از مدل های RUSLE و BLM استفاده شده است. برای استخراج داده‌های موردنیاز و تهیه ورودی‌های مدل RUSLE از گوگل ارث انجین استفاده شد. استفاده ترکیبی از مدل RUSLE که یک روش دقیق برآورد فرسایش خاک است و داده‌های ماهواره‌ای برای تعیین مقدار فرسایش خاک بسیار کمک کننده است (Saljuqi et al ,2023). برای عامل فرسایندگی باران از ماهواره TerraClimate، برای عامل طول و درجه شیب از ماهواره MERIT Hydro، برای عامل مدیریت پوشش گیاهی از سنجنده‌های TM[1]، ETM+[2] و OLI [3]ماهواره لندست (جدول ۱) و برای عامل فرسایش‌پذیری خاک از گزارش منابع طبیعی استان مازندران استفاده شد.

جدول ۱: باندها و محدوده‌های طیفی سنجنده‌های مورد استفاده (میکرومتر)

باندها	ETM+	OLI	Tm
B۱	۰/۴۵ –۰/۵۲	۰/۴۳ –۰/۴۵	۰/۴۵ –۰/۵۲
B۲	۰/۵۲ –۰/۶۰	۰/۴۵ –۰/۵۱	۰/۵۲ –۰/۶۰
B۳	۰/۶۳ –۰/۶۹	۰/۵۲ –۰/۶۰	۰/۶۳ –۰/۶۹
B۴	۰/۷۷ –۰/۹۰	۰/۶۳ –۰/۶۸	۰/۷۶ –۰/۹۰
B۵	۱/۵۵ –۱/۷۵	۰/۸۴ –۰/۸۸	۱/۵۵ –۱/۷۵
B۷	۲/۰۹ –۲/۳۵	۲/۱۰ –۲/۳۰	۲/۰۸ –۲/۳۵

جهت ارزیابی نتایج و تعیین میزان دقت مدل RUSLEبا توجه‌به اینکه تمامی عوامل مدل BLM از طریق بازدید صحرایی و مشاهده میدانی به دست می‌آیند (Bayat et al, 2020)، در این پژوهش به‌عنوان نقشه واقعیت زمینی طبقات فرسایش مورد استفاده قرار گرفت و نقشه طبقه‌بندی‌شده مدل RUSLE با آن تلاقی داده شد. همچنین یک نقشه نقطه‌ای

[1] Thematic Mapper
[2] Enhance Thematic Mapper
[3] Operational Land Imager

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

به صورت شبکه‌بندی منظم برای نمونه‌برداری در ۱۴۴۳ نقطه از نقشه‌های حاصل از مدل‌ها تهیه شد. الگوی نمونه برداری شبکه بندی منظم نیز با فواصل ۲۵۰ متر بود. بر اساس نقاط نمونه‌برداری نقشه مذکور، میزان هر یک از آماره‌های RMSE[1] (جذر میانگین مربعات خطا)، MAE[2] (میانگین خطای مطلق) و MSE[3] (میانگین مربعات خطا) محاسبه گردید و میزان دقت نقشه پهنه‌بندی فرسایش به دست آمد.

۳-۱- عوامل مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک در منطقه

در معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (رابطه۱) از شش عامل استفاده می‌شود (Renard et al, 1997).

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$ **رابطهٔ ۱**

R عامل فرسایندگی باران است و منعکس‌کننده اثر بالقوه تغییرات اقلیم و بارش بر فرسایش خاک است (Li et al, 2014). برای تهیه داده‌های اقلیمی منطقه تصاویر ماهواره TerraClimate که مجموعه داده اقلیمی ماهانه در جهان با قدرت تفکیک ۴۶۳۸ متر است در گوگل ارث انجین فراخوانی و نقشه بارندگی ماهیانه و سالیانه در حوضه اوارد و در دو دوره زمانی ۲۰ ساله تهیه شد. فاکتور فرسایندگی باران (R) برحسب $\mathrm{MJ\ mm\ ha^{-1}\ ha^{-1}\ y^{-1}}$ از طریق شاخص فورنیر به دست آمد (رابطه۲). رابطه شاخص فورنیر به‌صورت زیر است:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P}$$ **رابطهٔ ۲**

که در آن F شاخص فورنیر، P_i میانگین بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر و P میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر است. سپس با جای گذاری شاخص فورنیر در روابط ۳ و ۴ که توسط رنارد و فریموند برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار فاکتور R برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد.

رابطهٔ ۳

$$R - Factor = \frac{\left(\frac{0}{07397} * F^{\frac{1}{847}}\right)}{\frac{17}{2}} \qquad F < 55$$

رابطهٔ ۴

$$R - Factor = \frac{\left(\frac{95}{77} - \frac{6}{081} * F + \frac{0}{477F^2}\right)}{\frac{17}{2}} \qquad F \geq 55$$

K عامل فرسایش‌پذیری خاک است و مقدار تأثیرپذیری خاک نسبت به عامل‌های فرساینده را بیان می‌کند. این عامل به خصوصیات خاک و حساسیت طبیعی آن نسبت به عامل فرسایش بستگی دارد. از نظر کمّی فرسایش‌پذیری خاک تابعی از عامل فرسایندگی بوده و میزان تلفات خاک به‌ازای واحد فرسایندگی را نشان می‌دهد (Khosravi-

[1] Root Mean Square Error
[2] Mean Absolute Error
[3] Mean Square Error

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

Aghdam et al, 2018). برای تعیین میزان فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در حوضه اوارد و محاسبه مقدار K از رابطه (۵) استفاده شد (گزارش خاک‌شناسی اداره کل منابع طبیعی استان مازندران)

$$K = 2/8 \times 10^{-7} M^{1/14}(12-a) + 4/3 \times 10^{-3}(b-2) + 3/3 \times 10^{-3}(C-3)$$ **رابطهٔ ۵**

که در آن: M = پارامتر اندازه ذرات خاک (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) (درصد رس− ۱۰۰)، a= درصد مواد آلی، b= پارامتر ساختمان خاک (دانه‌بندی خیلی ریز (۱)، دانه‌بندی ریز (۲)، دانه‌بندی متوسط یا درشت (۳) و برای ساختمان‌های بلوکی یا صفحه‌ای و یا توده‌ای (۴))، C= کلاس نفوذپذیری خاک که برای نفوذپذیری سریع (۱) نفوذپذیری متوسط تا سریع (۲) نفوذپذیری متوسط (۳) نفوذپذیری کند تا متوسط (۴) نفوذپذیری کند (۵) و نفوذپذیری خیلی کند (۶).

LS طول و تندی شیب است. به‌عنوان عامل توپوگرافی، اثر میزان، سرعت و پتانسیل فرسایندگی رواناب را نشان می‌دهد (Ahmadabadi & Seddighi Far, 2016). برای به‌دست‌آوردن نقشه شیب در سامانه گوگل ارث انجین از باند Elevation (ارتفاع) ماهواره MERIT Hydro استفاده شد که یک نقشه جهت جریان با وضوح (۹۰ متر) است و از نسخه ۱/۰/۳ داده‌های ارتفاعی MERIT DEM مشتق شده است. در این تحقیق برای برآورد فاکتور توپوگرافی از رابطه ۶ استفاده شده است.

$$LS = \left(\frac{AS}{22/13}\right)^{0/4} \left(\frac{\sin\theta}{0/0896}\right)^{1/3}$$ **رابطهٔ ۶**

دراین‌رابطه (θ) درجه شیب زمین است که برای محاسبه آن از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد. مقادیر سطح ویژه حوضه (AS) معادل مساحت سلول‌هایی است که آب آن‌ها به داخل سلول موردنظر جاری می‌شود. AS از حاصل‌ضرب جریان تجمعی در اندازهٔ ابعاد سلول با استفاده از رابطه ۷ به دست آمد. به منظور دستیابی به نقشه جریان تجمعی، نقشه جهت جریان حوضه (FLOW DIRECTION) از گوگل ارث انجین و با استفاده از باند dir ماهواره MERIT Hydro تهیه شد. پس از تهیه نقشه جهت جریان، نقشه جریان تجمعی (FLOW ACCUMULATION) در محیط ArcMap تهیه شد.

$$AS = FLOW\ Accoumulation \times Cell\ Size$$ **رابطهٔ ۷**

C عامل پوشش گیاهی است که نشان‌دهنده میزان خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مکرر و خالی از پوشش و بقایای گیاهی است. پرکاربردترین معیار رویش گیاه، عامل تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با فناوری سنجش‌ازدور محاسبه می‌شود (Habashi et al, 2018). معیار پوشش گیاهی که بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرد، شاخص گیاهی متمایز نرمال شده (NDVI) است و با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور به دست می‌آید. این شاخص نشان‌دهنده انعکاس انرژی خورشیدی از زمین است که انواع پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین ۱- و ۱+ در نوسان است و برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد بود. مناطق کم

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

پوشش گیاهی یا مناطق بدون پوشش گیاهی، مانند مناطق شهری و زمین‌های بایر معمولاً مقادیری بین ۰/۱- و ۰/۱+ نشان می‌دهند (Li et al, 2014). این شاخص به‌صورت (NIR –Red) / (NIR + Red) تهیه می‌شود. بین شاخص NDVI و ضریب C یک رابطه کامل معکوس وجود دارد. بدین معنی که با افزایش شاخص NDVI ضریب C کاهش می‌یابد (رابطه ۸).

$$C = \frac{1 - NDVI}{2}$$ **رابطهٔ ۸**

نقشه موضوعی NDVI با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین در دو دوره ۲۰ساله محاسبه شد. در سال‌های قبل از ۲۰۰۰ بخش‌هایی از منطقه موردمطالعه زمین بایر بوده است که بعد از ۲۰۰۰ تبدیل به زمین کشاورزی شده است. به همین دلیل مقادیر NDVI در تصاویر لندست مربوط به تابستان در سال‌های بعد از ۲۰۰۰ بالاتر خواهد بود که این موضوع به دلیل افزایش بارندگی نیست، بلکه به‌خاطر تغییر کاربری زمین از بایر به کشاورزی است. برای حل این مشکل در این تحقیق از تصاویر آبان‌ماه که زمان کشت و زراعت به اتمام می‌رسد، استفاده شد تا نمایانگر حالت طبیعی زمین باشد. برای خنثی‌کردن اثر خشکسالی، NDVI در پنج سال مختلف از هر دوره به دست آمد. برای دوره اول نقشه میانگین NDVI در سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۵-۱۹۹۲-۱۹۸۸-۱۹۸۴ از سنجنده TM لندست تهیه شد و در دوره دوم نیز نقشه میانگین NDVI برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵-۲۰۱۰-۲۰۰۵-۲۰۰۱ از سنجنده‌های +ETM و OLI تهیه شد (جدول ۲). لندست۸ (OLI) در مقایسه با سری‌های قبلی ماهواره‌های لندست، باندهای طیفی باریک‌تر، ویژگی‌های سیگنال به نویز بهبودیافته، قدرت تفکیک رادیومتریکی و هندسه دقیق‌تری دارد. به همین دلیل برای کالیبراسیون و انطباق تصاویر لندست ۵ و ۷ با لندست ۸ (OLI) از رابطه ۹ استفاده شد (Roy et al, 2016).

$$NDVI_{OLI} = 0/0235 + 0/9723 * NDVI_{TM/ETM+}$$ **رابطهٔ ۹**

جدول ۲: ویژگی و سال ماهواره مورد استفاده برای محاسبات NDVI

	محاسبه میانگین NDVI دردوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰)	محاسبه میانگین NDVI دردوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰)
ماهواره	Landsat	Landsat
سنجنده	Tm	ETM+,OLI
قدرت تفکیک مکانی	۳۰ متر	۳۰ متر
سال مورد بررسی	۱۹۹۹-۱۹۹۵-۱۹۹۲-۱۹۸۸-۱۹۸۴	۲۰۲۰-۲۰۱۵-۲۰۱۰-۲۰۰۵-۲۰۰۱

P عامل حفاظت خاک است که از نسبت میزان خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده به زمینی که لخت بوده و در جهت بالا و پایین تندترین شیب، شخم زده شود به دست می‌آید. منظور از فعالیت‌های حفاظتی، بیشتر کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس‌بندی، درختکاری، جلوگیری از قطع بی‌رویه درختان و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام است (Wischmeier & Smith, 1987). اگر هیچ‌گونه عملیات حفاظتی انجام نگیرد P برابر با یک خواهد بود. ازآنجاکه در حوضه اوارد اقدامات حفاظتی قابل‌ذکری انجام نشده مقدار P برابر با یک در نظر گرفته شد.

۳-۲ تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی در منطقه

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

در پژوهش حاضر طبقه‌بندی پوشش اراضی در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰) با استفاده از روش نظارت شده و با فراخوانی تصاویر سنجنده TM ماهواره لندست، با قدرت تفکیک ۳۰ متر انجام شد. برای روش طبقه بندی از الگوریتم درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (Cart)[1] در گوگل ارث انجین استفاده و نقاط آموزش به طور دقیق انتخاب و به سامانه معرفی شد. برای طبقه بندی در دوره دوم نیز از محصول CGLS-LC100 که در مرکز زمین جهانی کوپرنیک و با استفاده از تصاویر ماهواره سنتیل تولید و به روزرسانی می‌شود استفاده شد؛ این محصول با قدرت تفکیک ۱۰۰ متر و دقت ۸۰ درصد است که برآوردهای متناسبی را برای انواع پوشش زمین ارائه می‌دهد.

۳-۲-۱ ارزیابی صحت طبقه‌بندی نقشه کاربری اراضی

نتایج طبقه بندی تا وقتی که دقت آن ارزیابی نشود قابل اطمینان نیست و از این‌رو برای صحت نقشه‌های طبقه‌بندی باید دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج طبقه‌بندی معمولا به صورت ماتریس خطا ارائه می‌شوند. این ماتریس حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل، پیکسل‌های معلوم با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی است (Soltani & Mohammadnejad, 2021). از تصاویر نرم‌افزار گوگل ارث که دقت مکانی بالایی دارند، به منظور ارزیابی صحت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود (Kiyani et al, 2014). پس از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای دردوره اول مطالعه، ارزیابی صحت طبقه‌بندی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و نمونه‌های تعلیمی که در جریان طبقه‌بندی دخالت داده نشده‌اند، انجام گرفت. با استفاده از ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا، محاسبه و صحت طبقه بندی ارزیابی شد. صحت کلی میانگینی از دقت طبقه‌بندی است که نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده به جمع کل پیکسل‌های معلوم را نشان میدهد و با رابطه ۱۰ محاسبه شد (Fatemi & Rezaei, 2016).

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^{c} E_{ii}}{N}$$ **رابطهٔ ۱۰**

که در آن C تعداد کلاس‌ها، N تعداد کل پیکسل‌های معلوم، E_{ii} تعداد اعضای قطری ماتریس خطا، و OA صحت کلی طبقه‌بندی است. ضریب کاپا دقت طبقه‌بندی را نسبت به حالتی که یک تصویر کاملا به صورت تصادفی طبقه‌بندی شود به دست می‌دهد و از طریق رابطه ۱۱ محاسبه شد (Fatemi & Rezaei, 2016).

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} X_{ii} - \sum^{r} X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum^{r} X_{i+} X_{+i}}$$ **رابطهٔ ۱۱**

$$x_{+j} = \sum_{i=1}^{r} x_{ij}$$ **رابطهٔ ۱۲**

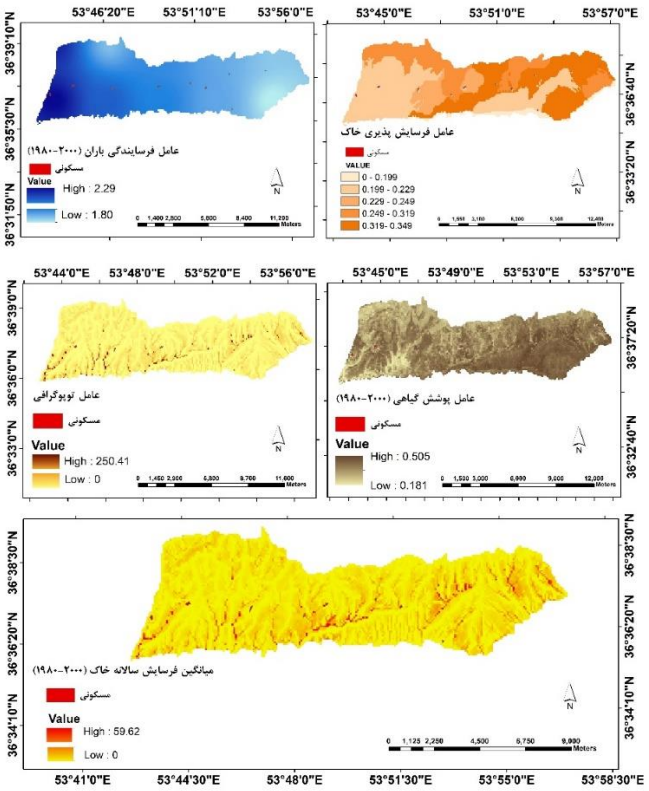
۴-یافته‌ها

[1] Classification and Regression Tree

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

۴-۱ برآورد فرسایش خاک در دو دوره ۲۰ ساله

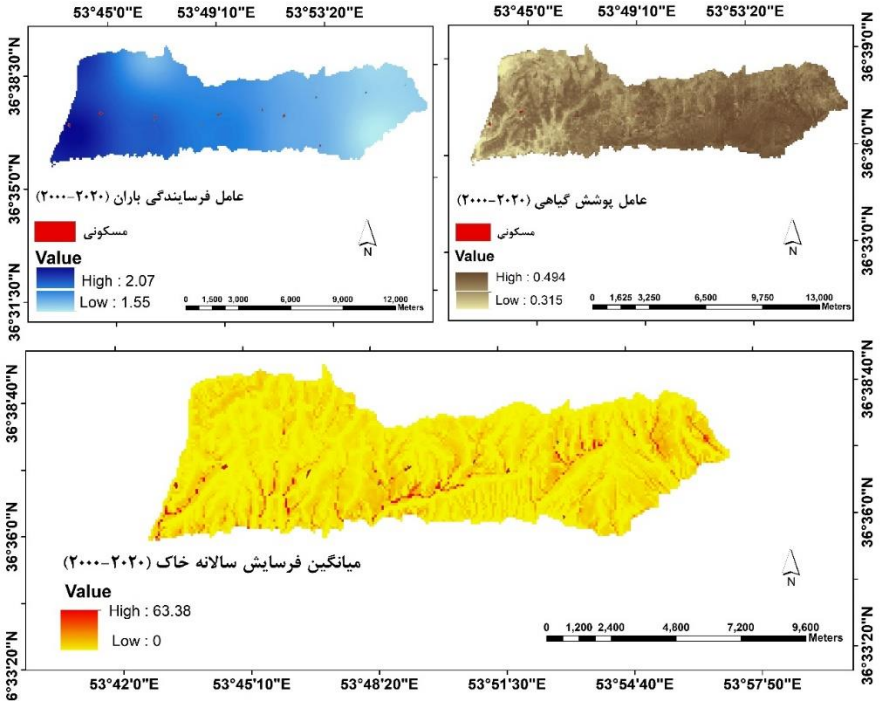
در پژوهش حاضر به منظور برآورد فرسایش خاک حوضه اوارد در هر دو دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰) و دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰) از معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک و داده‌های سامانه گوگل ارث انجین استفاده شده است. عامل فرسایندگی باران در حوضه برحسب $MJ\ mm\ ha^{-1}\ ha^{-1}\ y^{-1}$ با فرمول شاخص فورنیر (رابطه ۲) محاسبه گردید که میانگین این عامل ۲/۰۲، حداقل ارزش ۱/۸۰ و حداکثر آن ۲/۲۹ به دست آمد. بررسی عامل فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه نشان داد که میزان آن از ۰ تا ۰/۳۴۹ متغیر و میانگین آن ۰/۰۲۶۴ است. همچنین میزان عامل توپوگرافی حوضه موردمطالعه از ۰ تا ۲۵۰ برآورد شد و میانگین آن ۸/۷۷ به دست آمد. برای محاسبه عامل مدیریت پوشش گیاهی از رابطه ۸ استفاده شد و نقشه این عامل با استفاده از میزان میانگین شاخص NDVI در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ تهیه شد. نتایج نشان داد میزان این عامل بین ۰/۱۸۱ و ۰/۵۰۵ متغیر و میانگین آن ۰/۳۵۳ است و عامل حفاظت زمین نیز ۱ در نظر گرفته شد. برای محاسبه میزان میانگین فرسایش سالیانه خاک حوضه اوارد در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰) عوامل مختلف مدل RUSLE به فرمت رستری و اندازه سلول و سیستم مختصات یکسان تبدیل شد. برای تعیین میزان فرسایش خاک، لایه‌های تولید شده شامل لایه‌های فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی به کمک الحاقیه Spatial Analyst برنامه ArcGIS در همدیگر ضرب شده است (رابطه۱) و میزان هدررفت سالانه خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال بر اساس سلول به سلول به دست آمد. طبق نتایج مقدار فرسایش خاک در دوره اول از ۰ تا ۵۹/۶۲ تن در هکتار در سال متغیر و میانگین آن ۱/۶۴برآورد شد. بیشترین میزان فرسایش خاک در مناطق میانی و شرقی با شیب بالاست (شکل۲).



شکل۲: عوامل مدل RUSLE در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰)

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

برای برآورد میزان فرسایش خاک حوضه اوارد در دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰) نیز از مدل RUSLE استفاده شده و بر اساس پنج عامل اجرا گردید. سه عامل این مدل در این دوره ثابت هستند (Rahimi & Mazbani, 2013). با ثابت درنظرگرفتن میزان ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول شیب و ضریب شیب (LS) و ضریب عمل حفاظتی(P) در این دوره، تنها ضرایب عوامل فرسایش بارندگی (R) و مدیریت پوشش گیاهی (C) تغییر خواهند کرد و در نتیجه می‌توان تأثیر تغییرات این عوامل را در میزان فرسایش بررسی نمود. تهیه نقشه عامل فرسایندگی باران (R) در دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰) نیز با فرمول شاخص فورنیر (رابطه ۲) انجام شد. شاخص‌های فورنیر برای منطقه موردمطالعه در دوره دوم همگی کمتر از ۵۵ به‌دست‌آمده‌اند؛ بنابراین برای محاسبه مقادیر عامل فرسایندگی باران (R) از رابطه ۳ استفاده شد. مقدار این عامل در دوره دوم از ۱/۵۵ تا ۲/۰۷ متغیر است و میانگین آن ۱/۷۸۳ برآورد شد که نسبت به دوره اول کاهش جزئی را دارا است. برای محاسبه عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) در دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰) از همان رابطه دوره اول (رابطه ۸) استفاده شد و نقشه این عامل با استفاده از میزان میانگین شاخص NDVI در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵-۲۰۱۰-۲۰۰۵-۲۰۰۱ تهیه شد. میزان این عامل در این دوره بین ۰/۳۱۵ و ۰/۴۹۴ متغیر است و نسبت به دوره اول روند افزایشی داشته که این موضوع نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی در منطقه موردمطالعه نسبت به دوره اول است. میانگین این عامل ۰/۴۲۹ به دست آمد. محاسبه میانگین فرسایش سالیانه خاک حوضه اوارد در دوره دوم نیز با استفاده از روش دوره اول و با استفاده از رابطه ۱ انجام شد. میزان فرسایش منطقه در دوره ۲۰ ساله دوم از ۰ تا ۶۳/۳۸ تن در هکتار متغیر است و میانگین آن ۱/۷۵ به دست آمد که نسبت به دوره اول روند افزایشی را نشان داد (شکل۳).

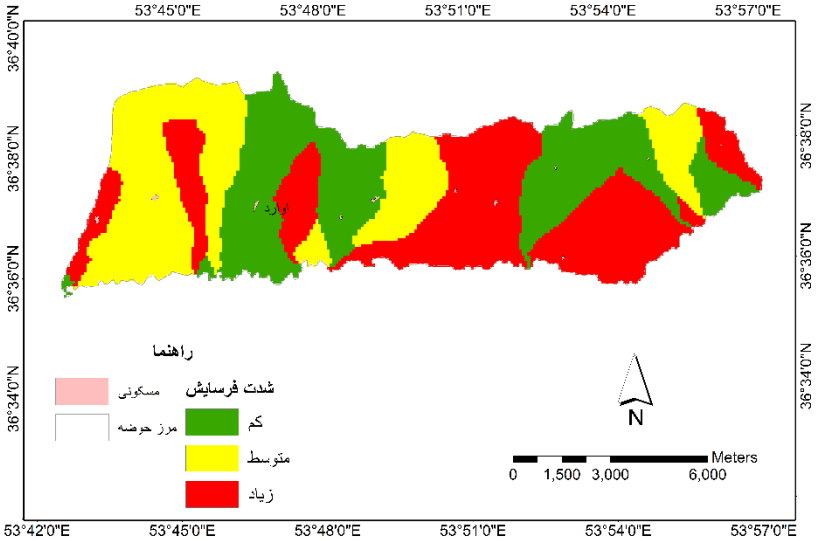


شکل۳: عوامل مدل RUSLE در دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰)

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

۴-۱-۱ ارزیابی مدل

برای بررسی دقت مکانی نقشه فرسایش حاصل از مدل RUSLE از خروجی مدل BLM استفاده شده است. دراین مدل وضعیت فرسایش برحسب جمع نمرات عوامل هفت گانه مشخص شده و هفت عامل از طریق مشاهده و بازدید صحرایی مورد ارزیابی مستقیم قرار گرفت که عبارتند از: وضعیت حرکت خاک، لاشبرگ سطحی، پوشش سنگی سطح زمین، موانع فرسایشی، شیارهای سطحی، فرم آبراهه‌ها و فرسایش خندقی. برای بدست آوردن داده‌های آن با در دست داشتن شرایط طبیعی استانداردی که برای هر کدام از عوامل هفت‌گانه مشخص شده است به منطقه مراجعه و با مقایسه وضع موجود و شرایط استاندارد ارزش عددی هر عامل تعیین گردید. نقشه شدت فرسایش حوضه با روش BLM در شکل ۴ ارائه شده است. در این نقشه طبقه شدت فرسایش زیاد ۳۶ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داد.



شکل ۴: شدت فرسایش خاک در حوضه اوارد با مدل BLM

برای ارزیابی صحت مدل RUSLE و میزان تطابق طبقات فرسایش آن با خروجی BLM از شاخص‌های آماری RMSE، MAE و MSE بر اساس نقشه نقاط نمونه‌برداری استفاده شد. بررسی مقادیر شاخص‌های مذکور نشان داد که آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین مربعات خطا در مدل RUSLEبه ترتیب ۱/۲۳، ۰/۹۶ و ۱/۵۲ دارای مقادیر پایین هستند، درنتیجه این مدل دارای خطای کمی است.

۴-۲ نتایج طبقه بندی کاربری اراضی

باتوجه‌به نتایج ارائه شده در جدول ۳، در دوره اول چهار کاربری جنگل، زراعت دیم، مراتع و مسکونی وجود داشته است و دوره دوم نیز شامل کاربری‌های جنگل، جنگل‌های تخریبی، زراعت دیم، مراتع و بیشه‌زار و مسکونی است. مساحت جنگل‌ها در حوضه موردمطالعه ۱۵۹۰/۹۵ هکتار کاهش داشته و ۲۰۱۴/۸۲ هکتار به مساحت جنگل‌های تخریبی اضافه شده است. همچنین ۲۱۲۸/۳۶ هکتار به مساحت زراعت در این حوضه اضافه شده و ۲۵۵۷/۸۶ هکتار نیز از

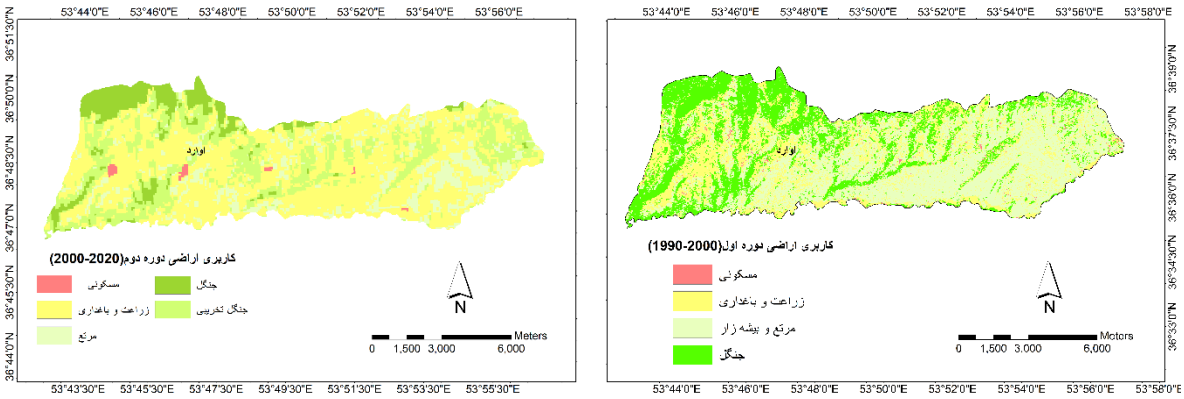
[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

مساحت مراتع این منطقه کاهش‌یافته است. لازم به ذکر است که ۵/۶۲ هکتار به مساحت مناطق مسکونی این حوضه اضافه شده است.

جدول ۳: تغییرات کاربری اراضی حوضه اوارد در دو دوره

کاربری اراضی	مساحت به هکتار در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰)	مساحت به هکتار در دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰)
جنگل	۲۶۷۱/۴۸	۱۰۸۰/۵۲
زراعت دیم	۲۴۹۸/۴۳	۴۶۲۶/۷۹
مراتع	۴۱۸۹/۴۳	۱۶۳۱/۵۷
مسکونی	۵۱/۳۶	۵۶/۹۹
جنگل تخریبی	-	۲۰۱۴/۸۳

دقت طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از نمونه‌های تعلیمی، ماتریس خطا و محاسبه شاخص های آماری صحت کلی و ضریب کاپا انجام شد. با استفاده از نتایج به دست آمده صحت کلی و ضریب کاپا برای طبقه بندی انجام شده به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۱ به دست آمد. در شکل ۵ نقشه کاربری اراضی تهیه شده بر اساس طبقه بندی در دوره اول و نقشه پوشش جهانی زمین، محصول کوپرنیک در دوره دوم ارائه شده است.



شکل ۵– نقشه های کاربری اراضی حوضه اوارد در دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۰) و دوره دوم (۲۰۲۰-۲۰۰۰)

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

با فرض ثابت بودن عوامل طبیعی از جمله جنس سنگ و توپوگرافی حوضه‌ها، آنچه که بیش از هر عاملی بر شدت فرسایش می‌افزاید، استفاده غیراصولی از زمین و تغییرات کاربری و همچنین تغییرات اقلیم و بارش است. به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش مقادیر عوامل فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، مدیریت پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی حوضه اوارد با استفاده از گوگل ارث انجین در دو دوره ۲۰ساله (۲۰۰۰-۱۹۸۰) و (۲۰۲۰-۲۰۰۰) تعیین شد. ارزیابی نقشه حاصل از مدل RUSLE و تعیین دقت آن با استفاده از مدل BLM به‌عنوان مقادیر مشاهده‌ای و آماره‌های RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، MAE (میانگین خطای مطلق) و MSE (میانگین

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

مربعات خطا) در نقاط نمونه‌برداری شده انجام پذیرفت. مقادیر شاخص‌های آماری برای مدل RUSLE به ترتیب ۱/۲۳، ۰/۹۶ و ۱/۵۲ به دست آمد که نشان دادند مدل برای حوضه مورد مطالعه کارایی دارد. بر این اساس میزان فرسایش خاک حوضه اوارد در دوره اول از ۰ تا ۵۹/۶۲ تن در هکتار در سال و میانگین سالانه فرسایش در این دوره ۱/۶۴ تن در هکتار در سال است. در دوره دوم نیز این میزان از ۰ تا ۶۳/۳۸ تن در هکتار در سال و میانگین آن ۱/۷۵ تن در هکتار در سال به دست آمد؛ بنابراین میزان فرسایش خاک در بیست‌ساله دوم این حوضه افزایش یافت. مناطق میانی، جنوب شرقی و شمال غربی منطقه به دلیل دارا بودن بیشترین سهم از تغییرات کاربری اراضی، بیشترین آسیب را متحمل شده‌اند. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات Gitima و همکاران (۲۰۲۳)، Moisa و همکاران (۲۰۲۳) و Weng و همکاران مبنی بر تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر افزایش فرسایش خاک مطابقت دارد. یکی از عوامل مورد مطالعه در این تحقیق عامل فرسایندگی باران است. میانگین فرسایندگی باران (R) در دوره اول ۲/۰۲ و در دوره دوم ۱/۷۸ $MJ\ mm\ ha^{-1}\ ha^{-1}\ y^{-1}$ به دست آمد. همچنین این عامل در دوره اول دارای حداقل ارزش ۱/۸۰ و حداکثر ۲/۲۹ و در دوره دوم نیز بین ۱/۵۵ و ۲/۰۷ متغیر بوده است که نشان از کاهش نسبی میزان بارندگی در دوره دوم دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل فرسایندگی باران در دوره دوم به دلیل کاهش جزئی تأثیر زیادی در روند افزایش فرسایش خاک نداشته است که با نتایج پژوهش Teimouri و همکاران (۲۰۱۸)، Stefanidis و Stathis (۲۰۱۸)، Arkhi (۲۰۲۲) و Lins و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر افزایش یا کاهش نقش عامل فرسایندگی باران با افزایش یا کاهش بارش در فرسایش خاک مطابقت دارد. استخراج شاخص NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ نشان داد که میزان پوشش گیاهی در دوره دوم نسبت به دوره اول روند کاهشی را داراست؛ بر این اساس میانگین عامل C برای دوره اول ۰/۳۵۳ و برای دوره دوم ۰/۴۹۲ به دست آمد که این نشان‌دهنده کاهش میزان پوشش گیاهی در دوره دوم است. بر اساس نتایج پژوهش مشابهی که توسط Saljuqi و همکاران (۲۰۲۲) انجام گرفت، کاهش پوشش گیاهی منجر به افزایش هدررفتن خاک شد. همچنین بررسی تصاویر و نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده از سنجنده TMماهواره لندست و نقشه پوشش جهانی زمین، محصول کوپرنیک در گوگل ارث انجین نشان داد که میزان مساحت جنگل در این حوضه ۱۵۹۰/۹۶ هکتار (۱۶درصد) کاهش‌یافته و در عوض ۲۰۱۴/۸۲ هکتار (۲۱درصد) از مساحت منطقه تبدیل به جنگل‌های تخریبی شده‌است. از طرف دیگر ۲۱۲۸/۳۶ هکتار (۲۲درصد) از مساحت منطقه تبدیل به زمین‌های زراعی شده و ۲۵۵۷/۸۶ هکتار (۲۷درصد) از مساحت مراتع این منطقه کاهش‌یافته است. میزان ۵/۶۳ هکتار (۰/۰۶درصد) نیز به مناطق مسکونی اضافه شده که نتیجه این تغییرات منجر به روند افزایشی فرسایش خاک در منطقه شده است. این موضوع با نتایج پژوهش Mayahi و همکاران (۲۰۲۱)، Abiyat و همکاران (۲۰۲۱) و Arkhi (۲۰۲۲) مبنی بر تاثیر کاهش پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی بر افزایش فرسایش خاک مطابقت دارد.

نتایج این پژوهش تأکید می‌کند، دلیل اصلی که باعث شده است میزان فرسایش خاک در دوره بیست ساله دوم (۲۰۰۰-۲۰۲۰) نسبت به دوره بیست ساله اول (۱۹۸۰-۲۰۰۰) در حوضه اوارد افزایش داشته باشد، کاهش پوشش گیاهی بوده است؛ بنابراین تدابیر مدیریتی برای بهبود کاربری اراضی و افزایش پوشش گیاهی اجتناب‌ناپذیر هستند. علاوه براین، به‌کارگیری گوگل ارث انجین و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند در پایش و ارزیابی سریع و دقیق تغییرات کاربری

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

اراضی و پوشش گیاهی و فرسایش خاک ناشی از این تغییرات مفید واقع شود. تحقیقات آتی می‌توانند به ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش‌ها بر کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک بپردازند.

منابع

1. Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2021). Investigation of Land-Use Changes and their Impacts on Soil Erosion in Baghmalek Basin using Artificial Neural Network and RUSLE Model. *Journal of Environmental Studies*, 47(1), 89-110. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jes.2021.324250.1008180
2. Ahmadabadi, A., & Seddighi Far, Z. (2016). Estimating the rate of erosion and sediment production with the help of the revised global soil erosion equation (RUSLE) in Hableroud watershed. *Natural Geography Journal*, 10(3), 83-103.(In Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7
3. Asadi, H., & Gorji, M. (2022). Challenges and Limitations of Soil and Land Resources in Iran. *Land Management Journal*, 10(1), 111-134. (In Persian). https://doi.org/10.22092/lmj.2022.358760.309
4. Arkhi, S. (2022). Assessing effect of land use and rainfall changes on Soil Erosion and Sediment Yield using RS and GIS (Case study: Lower part of Ilam Dam Watershed, Iran). *Quantitative geomorphology research*.11(1).62-81. (In Persian).
5. Bayat R., Arabkhedri M., Behnam N., & Gerami Z. (2020). Performance evaluation of EPM and MPSIAC Models for determination of Erosion Status of Shahriari Watershed. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7 (3) :1-16. (In Persian).
6. Chen, H., Zhang, X., Abla, M., Lü, D., Yan, R., Ren, Q., ... & Yang, X. (2018). Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, *170*, 141-149. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.006
7. Choupanian, A., Rezai, M., Mahdavi, R., & Nafarzadegan, A. R. (2023). Application of Land Measurements for Detection the Climate Changes Impact on Vegetation Dynamics, Kermanshah Province, Iran. *Journal of Rangeland Science*, 12 (1), 1617. https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.289985.1279
8. Chupin, V., Dolgikh, G., Gusev, E., & Timoshina, G. (2022). Remote Sensing of Infrasound Signals of the “Voice of the Sea” during the Evolution of Typhoons. *Remote Sensing*, 14(24), 6289. https://doi.org/10.3390/rs14246289
9. Fatemi, S. B., & Rezaei, Y. (2016). *Basics of remote sensing*. Fifth Edition. Tehran: Azadeh Publications. (In Persian).
10. 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. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007
11. Gitima, G., Teshome, M., Kassie, M., & Jakubus, M. (2023). Quantifying the impacts of spatiotemporal land use and land cover changes on soil loss across agroecologies and slope categories using GIS and RUSLE model in Zoa watershed, southwest Ethiopia. *Ecological Processes*, 12(1), 24. https://doi.org/10.1186/s13717-023-00436-x
12. Habashi, Kh., Mohammadi, S., Karimzadeh, H., & Pourmanafi, S. (2018). Assessment soil erotion risk in kohpayeh - segzi plain using Revised Universal Soil Loss Equation (RSLE). *Journal of Natural Environment Hazards*,7(15) 161-178. (In Persian). https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3216
13. Kiyani, V., Alizade Shaabani, A., & Nazari Samani, A. (2014). Assessing the Classification accuracy of LISS-III Sensor Image of IRS-P6 Satellite using Google

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

Earth'sDatabase to provide land coverage/ Land use maps (Case study: Taleghan Watershed). *Quarterly of Geographical Data*, 23(90), 51-59. (In Persian). https://doi.org/10.22131/sepehr.2014.12167

14. Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, SHR., Homaee, M., & Arabkhedri M. (2021). Sediment budgeting in laboratory plots under rainfall simulation. *Watershed Management Research Journal*, 34(2), 15–31 .(In Persian). https://doi.org/10.22092/wmej.2020.123819.1164
15. Kumar, R., Deshmukh, B., & Kumar, A. (2022). Using Google Earth Engine and GIS for basin scale soil erosion risk assessment: A case study of Chambal river basin, central India. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 228. https://doi.org/10.1007/s12040-022-01977-z
16. Khosravi-Aghdam, K., Mumtaz, H., & Asadzadeh, F. (2018). Estimation of Soil erodibility factor of USLE model and its relationship with landscape features in some parts of Nazzlo-Chay basin, Iran. *Journal of applied soil research*,7(1), 31-43. (In Persian).
17. Li, L., Wang, Y., & Liu, C. (2014). Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(6), 1549-1562. https://doi.org/10.1007/s13762-013-0341-x
18. Mayahi, J., Eskandari dameneh, H., & Zarasvandi, A. (2021). Assessments Land Cover change Effects on Soil Erosion Trend in Hoor al-Azim wetland, Southwestern of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*.10(27), 107-122. (In Persian). https://doi.org/10.22111/jneh.2020.33269.1626
19. Ma, S., Wang, L. J., Wang, H. Y., Zhao, Y. G., & Jiang, J. (2023). Impacts of land use/land cover and soil property changes on soil erosion in the black soil region, China. *Journal of Environmental Management*, 328, 117024. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117024
20. 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. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00805-y
21. Ouyang, W., Wu, Y., Hao, Z., Zhang, Q., Bu, Q., & Gao, X. (2018). Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science of the total environment*, 2018(613), 798-809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.173
22. Papaiordanidis, S., Gitas, I. Z., & Katagis, T. (2019). Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform. *Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева*, (100), 36-52.
23. Prashanth, M., Kumar, A., Dhar, S., Verma, O., Rai, S. K., & Kouser, B. (2023). Land use/land cover change and its implication on soil erosion in an ecologically sensitive Himachal Himalayan watershed, Northern India. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*, 1124677. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1124677
24. Rahimi, Kh., & Mazbani, M. (2013). Evaluation of Sivand Basin Erosion by RUSLE Model During 1998 to 2009. *Environmental Erosion Research Journal*, 3(1), 1-18. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1392.3.1.1.3
25. Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D & Yoder D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE).* US Department of Agriculture (Ed.). Agricultural Handbook. US Department of Agriculture, Washington. 1–251.
26. Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]

normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185, 57-70. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024

27. Saffari, A., Nouri, A & Karmi, J. (2018). Investigation about the influence of land-cover and land use changes on soil erodibility potential, case study: Gharesou, Gorganrood. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards*, 5(1), 83-96. (In Persian). http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.1.83
28. Saljughy, M., Rezai , M & Esmaiilpoor, Y. (2022). Monitoring the Effect of Land Use Change on Soil Erosion Process Using Satellite Data in the East of Hormozgan. *Environmental Erosion Research Journal*, 12(4), 54-78. (In Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1401.12.4.3.4
29. Sathiyamurthi, S., Ramya, M., Saravanan, S., & Subramani, T. (2023). Estimation of soil erosion for a semi-urban watershed in Tamil Nadu, India using RUSLE and geospatial techniques. *Urban Climate*, 48, 101424. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101424
30. Soltani, N., & Mohammadnejad, V. (2021). Efficiency of Google Earth Engine (GEE) system in land use change assessment and predicting it using CA-Markov model (Case study of Urmia plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, *12*(3), 101-114. https://dorl.net/dor/http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.3.6.1
31. Stefanidis, S., & Stathis, D. (2018). Effect of climate change on soil erosion in a mountainous mediterranean catchment (Central Pindus, Greece). *Water* 10 (10), 1469. https://doi.org/10.3390/w10101469
32. Teimouri, F., Bazrafshan, O., & Rafii-Sardoi, A. (2018). Assessment of Climate Change and Land Use Change on Soil Erosion (Case study: Kondaran watershed). *Ecohydrology magazine*, 6(2), 353-368. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ije.2019.274886.1038
33. Wang, H., & Zhao, H. (2020). Dynamic changes of soil erosion in the taohe river basin using the RUSLE model and google earth engine. *Water*, 12(5), 1293. https://doi.org/10.3390/w12051293
34. Weng, X., Zhang, B., Zhu, J., Wang, D., & Qiu, J. (2023). Assessing Land Use and Climate Change Impacts on Soil Erosion Caused by Water in China. *Sustainability*, 15(10), 7865. https://doi.org/10.3390/su15107865
35. Wischmeier, W.H., & Smith. D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. epartment of Agriculture, Science and Education Administration*. Handbook. 537, 1-58
36. Zerehi, F., & Rezai, M. (2022). Changes in sand dune expansion and wind surface cover in deserts adjacent to wetland ecosystems. *Journal of Environmental Erosion Research*, 12 (1), 95- 112. http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1401.12.1.6.1
37. Zhao, J., Wang, Z., Dong, Y., Yang, Z & Govers, G. (2022). How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. *Science of The Total Environment*, 802, 149665. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149665

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.102]