



Print ISSN: 2251-7480  
Online ISSN: 2251-7400

Journal of  
**Water and Soil  
Resources Conservation  
(WSRCJ)**

**Web site:**

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

**Email:**

[iauwsrcj@srbiau.ac.ir](mailto:iauwsrcj@srbiau.ac.ir)  
[iauwsrcj@gmail.com](mailto:iauwsrcj@gmail.com)

**Vol. 14  
No. 2 (54)**

**Received:**  
2024-02-21

**Accepted:**  
2024-08-03

**Pages: 63-81**

## The Impact of Climate Change and Land use on Soil Erosion Risk using the RUSLE Model (Case Study: Gorganroud Watershed)

Saleh Arakhi<sup>1\*</sup>, Mohammad Baratzadeh<sup>2</sup> and Sayed Hussein Roshun<sup>3</sup>

- 1) Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Golestan, Gorgan, Iran.
- 2) MSc. Graduated in Surveying Engineering, Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering Lamei Gorgani Institute of Higher Education, Gorgan, Iran.
- 3) Ph.D. Watershed Management Science and Engineering, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Agricultural Sciences and Natural Resources of Sari University, Sari, Iran.

\*Corresponding author email: [arekhi6405@gmail.com](mailto:arekhi6405@gmail.com)

**Introduction:** Soil erosion and its impacts on the earth's resources are significant concerns in many countries. The most important effects of soil erosion are loss of soil fertility, water pollution, reduction of agricultural productions and reduction of dam's useful life. The present study aims to predict the future effects of climate change and land use change on the soil erosion intensity and potential in the Gorganroud watershed. The erosion rates were compared with the RUSLE model in three different scenarios: future climate change, future land use change, and a combination of climate and land use changes for erosion rates in base period.

**Methods:** Initially, weather data (temperature and precipitation) from existing stations in the catchment area were collected for a 20-year statistical period (2001-2020). The normality, homogeneity, and randomness of the data were examined using the Kolmogorov-Smirnov and run tests, respectively. To address statistical deficiencies, a regression method was employed in SPSS software. The statistical downscaled data from the general circulation model and synthetic data were generated for the future period (2021-2040) using the AIB, A2, and B1 scenarios (optimistic, pessimistic, and moderate, respectively) in the LARS-WG model based on the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, and two models, HADCM3 and GFCM21. Additionally, the land use map of the catchment area was prepared using Landsat 7 and 8 satellite images for the years 2001, 2010, and 2020 and evaluated through Google Earth. Finally, the CA-Markov model in the IDRISI Selva software was used to simulate future land use changes. Soil loss values for the current period and under climate and land use change scenarios were also calculated based on the RUSLE model.

**Results:** The results showed that soil erosion rates increase under climate change scenarios compared to the base period. Land use changes and coverage will also shift towards a decrease in dense and semi-dense forest areas and an increase in pastures and residential areas. The results indicated that the average annual soil erosion rate in the base period is 41.96 tons per hectare per year. With the consideration of A2, A1B, and B1 scenarios, the erosion rate will increase by 2-4% compared to the base period. By considering the simulated land use in 2040 and the A2, A1B, and B1 scenarios, the erosion rate will increase by 7.5%, 25.5%, and 73.1%, respectively, due to the reduction in natural coverage.

**Conclusion:** The results showed that land use changes have the most significant impact on soil erosion rates, and therefore, proper management of cover can mitigate the increasing trend of soil erosion in the Gorganroud catchment area. The largest share of land use in creating erosion is related to semi-dense forest use with an average of 115.04 ton/ha/year and dense forest use without considering residential areas has the lowest share with an average value of 51.39 ton/ha/year.

**Keywords:** Soil loss, land use changes, downscaling, LARS-WG model, Gorganroud watershed



# تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE

(مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود)

صالح آرخی<sup>۱\*</sup>، محمد براتزاده<sup>۲</sup> و سیدحسین روشان<sup>۳</sup>

(۱) دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

(۲) کارشناسی ارشد، مهندسی نقشهبرداری، گروه نقشهبرداری، دانشگاه لامعی گرگانی، گرگان، ایران.

(۳) دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

\*ایمیل نویسنده مسئول: arekhi6405@gmail.com

## چکیده:

**زمینه و هدف:** فرسایش خاک و اثرات ناشی از آن بر روی منابع کره زمین جزو موضوعات قابل توجه در بسیاری از کشورها می‌باشد. مهم‌ترین اثرات فرسایش خاک از دست رفتن حاصل‌خیزی خاک، آلودگی آب‌ها، کاهش تولیدات کشاورزی و کاهش عمر مفید سدها می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر پیش‌بینی اثرات آینده تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر شدت و پتانسیل خطر فرسایش در حوضه آبخیز گرگانرود می‌باشد. مقادیر فرسایش با مدل RUSLE در سه سناریوی مختلف تغییر اقلیم آینده، تغییر کاربری اراضی آینده و ترکیبی از تغییر اقلیم و کاربری اراضی با مقادیر فرسایش در دوره پایه مقایسه شد.

**روش پژوهش:** ابتدا آمار پارامترهای هواشناسی (دما و بارش) ایستگاه‌های موجود در حوضه در دوره آماری ۲۰ سال (۲۰۰۱-۲۰۲۰) تهیه شد و نرمال بودن، همگنی و تصادفی بودن داده‌ها برترتیب با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و ران تست بررسی شد. جهت رفع نواقص آماری نیز به روش رگرسیون در محیط نرم افزار SPSS اقدام گردید. ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) با استفاده از سه سناریوی AIB, A2, B1 (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) در مدل LARS-WG بر اساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و دو مدل HADCM3 و GFCM21 انجام شد. همچنین نقشه کاربری اراضی حوضه نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ برای سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ تهیه و از طریق پایگاه Google Earth ارزیابی شد. در نهایت با استفاده از مدل CA-Markov در نرم افزار ادریسی نسخه Selva تغییرات کاربری اراضی در آینده شبیه‌سازی گردید. مقادیر هدر رفت خاک برای دوره حال و تحت سناریوهای تغییرات اقلیم و کاربری نیز بر اساس مدل RUSLE محاسبه گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد میزان فرسایش باران تحت تأثیر سناریوهای تابشی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات کاربری اراضی و پوشش نیز به سمت کاهش سطح مناطق جنگل انبوه و جنگل نیمه انبوه و افزایش مرتع و بوت‌هزار و منطقه مسکونی خواهد بود. نتایج نشان داد که مقدار میانگین فرسایش سالانه خاک در دوره پایه ۹۶/۴۱ تن در هکتار در سال می‌باشد. مقدار فرسایش با در نظر گرفتن سناریوهای تابشی A2, A1B و B1 به ترتیب ۲ تا ۴ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. با در نظر گرفتن کاربری اراضی شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۴۰ میلادی و سناریوی‌های تابشی A2, A1B و B1 مقدار فرسایش نسبت به دوره پایه به دلیل کاهش پوشش طبیعی به ترتیب ۷/۵ درصد، ۵/۲۵ درصد و ۱/۷۳ درصد افزایش خواهد یافت.

**نتایج:** نتایج نشان داد که تغییرات کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در تغییرات میزان فرسایش ایفا نموده است و لذا با مدیریت صحیح پوشش می‌توان روند افزایشی فرسایش حوضه آبخیز گرگانرود را مدیریت کرد. بیشترین سهم کاربری در ایجاد فرسایش مربوط به کاربری جنگل نیمه انبوه با میانگین ۱۱۵/۰۴ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل انبوه بدون در نظر گرفتن مناطق مسکونی با مقدار میانگین ۵۱/۳۹ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد.

**کلید واژه‌ها:** هدر رفت خاک، تغییرات کاربری، ریزمقیاس‌نمایی، مدل LARS-WG، حوضه گرگانرود

## مقدمه

فرسایش خاک یکی از مشکلات محیط زیست در سرتاسر جهان است که در کشورهای در حال توسعه از شدت بالایی برخوردار است (Moisa et al., 2021). اگرچه فرسایش خاک یک فرآیند طبیعی تخریب شکل زمین است (Smoot and Smith, 1999) اما این فرآیند طبیعی مستقیماً به دلیل شدت بالای بارندگی در مناطق با پوشش گیاهی کم ایجاد می‌شود. میزان فرسایش خاک در مقیاس حوضه آبخیز به عنوان مانعی برای مدیریت پایدار خاک و کاربری اراضی عمل می‌کند (Roy, 2019). در سطح جهانی، سالانه ۷۵ میلیارد تن خاک بر اثر فرسایش از بین می‌رود (Dabral et al., 2008). فرسایش خاک ارتباط مستقیمی با میزان رواناب دارد که به عنوان یک مشکل عمده اکولوژیکی در نظر گرفته می‌شود که تقریباً ۵۶ درصد از سطح جهان را اشغال کرده است (Gelagay and Minale, 2016). در ایران تقریباً ۳۵ میلیون مترمربع از اراضی تحت تأثیر فرسایش آبی هستند (Zakerinejad and Maerker, 2015). به‌طوریکه فرسایش متوسط خاک ایران ۳ برابر سایر کشورهای آسیایی و ۲۰ برابر میانگین جهانی می‌باشد (Sadeghi et al., 2015). فرسایش خاک یک واقعیت قابل مشاهده در سراسر جهان است که می‌تواند با افزایش اتلاف مواد مغذی و رواناب سطحی و کاهش دسترسی به آب ضروری گیاهان از زیر خاک، زمین‌های کشاورزی را تخریب کند (Ganasri and Ramesh, 2016). از اینرو فرسایش خاک به عنوان یک تهدید جدی برای امنیت و ثبات اجتماعی-اکولوژیکی شناخته شده است. مسائل متعدد مربوط به سلامت خاک شامل جنبه‌هایی اساسی مانند امنیت غذایی، انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات آب و هوایی و کاربری اراضی است (Marzen et al., 2017). اگرچه فرسایش خاک یک پدیده طبیعی است اما نوع و شدت آن در یک منطقه تابع عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی، توپوگرافی، نوع خاک و کاربری زمین می‌باشد که اهمیت تغییر اقلیم و کاربری اراضی بدلیل اثر مستقیم فعالیت‌های بشری نسبت به بقیه عوامل می‌تواند بیشتر باشد (Mondal et al., 2015). تغییر کاربری و پوشش زمین به عنوان یکی از نیروهای محرک اصلی تغییرات محیطی جهانی مورد بررسی قرار گرفته است و آنرا به یک عامل مهم برای ارزیابی در سطوح مختلف مکانی-زمانی تبدیل می‌کند (Lambin, 1997; Islam et al., 2018). تغییر کاربری اراضی یک فرآیند گسترده، شتاب‌دهنده و قابل توجه است که توسط اعمال انسان هدایت می‌شود، و در بسیاری از موارد، تغییراتی را نیز به وجود می‌آورد که بر فعالیت‌های انسانی تأثیر می‌گذارد (Agarwal, 2002). از آنجایی که تغییر کاربری زمین یک روند اکولوژیکی محلی فراگیر و مهم در سطح جهانی است، این تغییرات پیامدهای مهمی برای تغییرات آبی در محیط زیست

زمین و تغییرات بعدی کاربری زمین دارد (Agarwal, 2002). به‌طور کلی تغییرات در پوشش سطح منجر به تغییر در تعادل انرژی، آب و شارهای ژئوشیمیایی در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌شود و این تغییرات به‌طور اجتناب ناپذیری بر پایداری منابع طبیعی و فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی تأثیر می‌گذارد (Vescovi et al., 2002). از طرفی، تغییرات جهانی در دما و الگوهای بارش بر فرسایش خاک از طریق مسیرهای متعدد، از جمله تغییرات بارندگی و فرساینده‌گی آن تأثیر خواهد گذاشت (Solomon, 2007). انتظار می‌رود تغییرات آب و هوایی بر فرسایش خاک بر اساس عوامل مختلفی از جمله میزان و شدت بارش، تأثیر دما بر رطوبت خاک و رشد گیاه تأثیر بگذارد (Nearing, 2001). تغییر اقلیم ناشی از بارش یکی از متغیرهای غالب مهمی است که روند هدر رفت خاک در دوره آبی را تعیین می‌کند (Pal and Chakraborty, 2019). بارندگی شدید هم از طریق تأثیر قطرات باران بر خاک و هم از طریق روانابی که ذرات خاک را جدا می‌کند بر فرسایش خاک تأثیر می‌گذارد (Eekhout and De Vente, 2020). تغییرات آب و هوایی سبب افزایش نفوذ و رواناب بیش از حد سطحی، احتمال فرسایش شیاری و خندقی را افزایش می‌دهد، که موجب تولید حجم بالایی از رسوب می‌شود (Anderson et al., 2020). مدل‌های تجربی مختلفی برای اندازه‌گیری تلفات خاک وجود دارد مانند ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) (Halecki et al., 2021; Shi & Huang, 2021; et al., 2018)، روش پتانسیل فرسایش (Tangestani, 1995; Refahi and Nematti, 2006)، معادله جهانی تلفات خاک (RUSLE) (Wischmeier and Smith, 1978; Meinen and Robinson, 2021) و ارزیابی خطر فرسایش خاک در سراسر اروپا (Fernández and Vega, 2016)، که برای مناطق جغرافیایی بزرگ بسیار کاربردی هستند. از بین مدل‌های تجربی موجود، مدل RUSLE به دلیل اثربخشی آن در مناطق مرتفع (Hurni, 1985; Maronedze and Schutt, 2020) و عملیاتی‌تر بودن آن برای تخمین میزان تلفات خاک به صورت سالانه با داده‌های میدانی کمتر، قابل استفاده می‌باشد (Renard, 1997; Fernández and Vega, 2016). علاوه بر این، مدل RUSLE در مقیاس حوضه قابل استفاده است. بدیهی است که مقادیر RUSLE به دلیل شرایط محیطی مانند مدیریت پوشش و توپوگرافی دارای عدم قطعیت هستند. به منظور به حداقل رساندن عدم قطعیت مورد انتظار از مدل RUSLE از طریق پارامترسازی عوامل توپوگرافی و مدیریت پوشش و در عین حال اجتناب از تلفات شدید خاک با هدف قرار دادن اقدامات حفاظتی خاک در مناطقی که هر دو عامل بر هم اثر می‌گذارند و تلفات خاک را افزایش می‌دهند (Estrada-Carmona et al.,

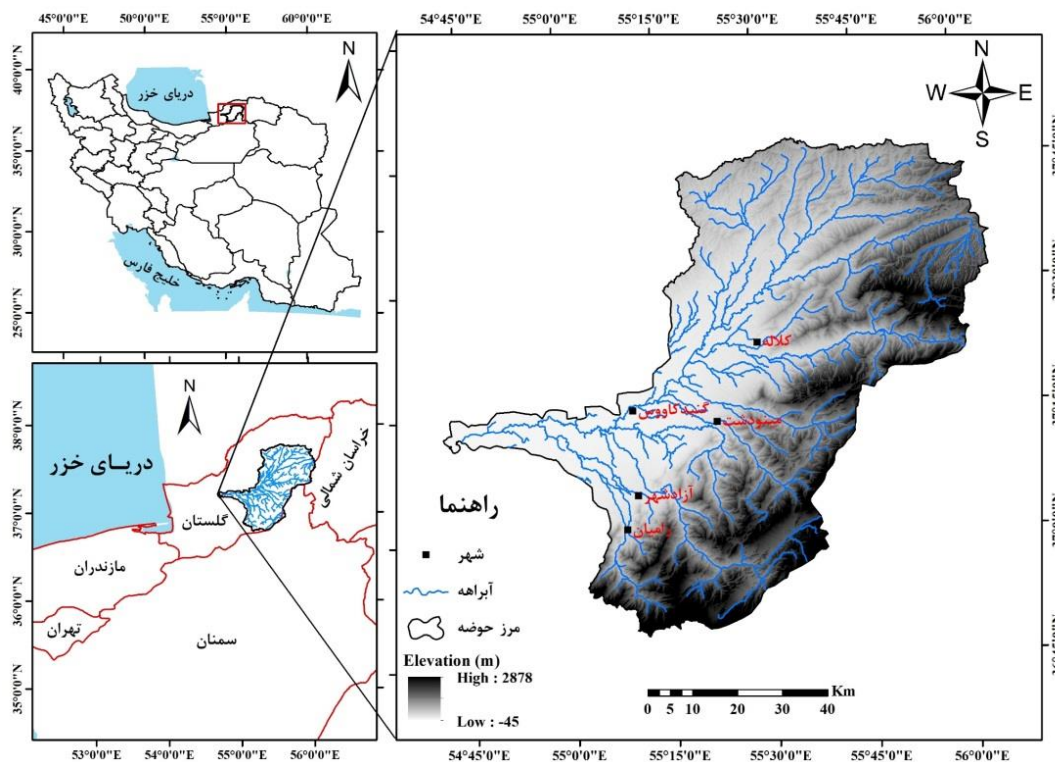
هواشناسی در این حوضه غیرقابل اجتناب است. بنابراین بر اساس اهمیت موضوع در این مقاله سعی بر آن است که اثرات توأمان تغییرات کاربری اراضی و اقلیم بر روی میزان تلفات خاک بر اساس مدل جهانی فرسایش خاک تجدید نظر شده (RUSLE) در حوضه گرگانرود بررسی شود.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گرگانرود با مساحت ۶۰۵۵/۸۳ کیلومترمربع بین ۱۵' ۳۶° تا ۱۵' ۳۷° شمالی و ۱۰' ۵۴° تا ۲۶' ۵۶° شرقی در استان گلستان واقع شده است. این حوضه از مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز دریای خزر است و از جنوب مشرف به سلسله جبال البرز شرقی، از شرق به کوه‌های آلاداغ و گلی‌داغ، از شمال به حوضه آبخیز اترک و از غرب به دریای خزر و حوضه آبخیز قره سو محدود می‌شود. گرگانرود با طول ۳۵۰ کیلومتر از شمال شرقی به جنوب غربی در جریان است و از ارتفاعات جنگل گلستان، کوه‌های گلی‌داغ، آلاداغ و قلعه ماران سرچشمه گرفته که پس از دریافت شاخه‌های متعددی وارد خلیج گرگان می‌شود. متوسط آبدهی سالانه آن حدود ۴۲۰ میلیون مترمکعب آن به مصرف کشاورزی می‌رسد. موقعیت حوضه آبخیز گرگانرود در استان گلستان و ایران در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در تحقیقی که در شمال چین انجام شد مشخص گردید که تحت سناریوهای تغییر اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 میانگین تلفات سالانه خاک به ترتیب ۲۱/۲۰ و ۳۳/۰۶ درصد در آینده افزایش پیدا خواهد کرد و تغییرات کاربری از اراضی با پوشش طبیعی به زمین‌های قابل ساخت نیز حدود ۷ درصد فرسایش را زیاد خواهد کرد (Weng et al., 2023). در مطالعه‌ای که با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر فرسایش خاک در حوضه آبخیز کندران استان هرمزگان انجام شد، نتایج نشان داد که میانگین فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE در دوره پایه ۹/۸ تن در هکتار در سال بوده که طی دو دهه آینده (۲۰۳۰-۲۰۱۶) با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 به‌طور متوسط ۱۶ درصد و طی پنج سال آینده ۲۰ درصد بر میزان فرسایش افزوده می‌گردد (Teimori et al., 2019). با توجه به اینکه امروزه ارزیابی فرسایش خاک مورد توجه قرار گرفته است می‌توان از آن به عنوان پایه‌ای برای توسعه برنامه‌های موثر حفاظت از خاک و آب استفاده کرد و ارائه اطلاعات به تصمیم‌گیرندگان و مدیران خاک در مورد فرآیندهای فرسایش خاک بر اساس ارزیابی قابل اعتماد از آسیب‌پذیری و سطوح خطر، گامی ضروری برای کنترل فرسایش خاک است. حوضه گرگانرود از مهم‌ترین حوضه‌های شمال کشور که تغییرات کاربری از جنگل به مسکونی در آن به طور زیاد در حال انجام است. همچنین با توجه به تغییرات جهانی تغییر اقلیم، تغییرات متغیرهای



شکل ۱. نقشه موقعیت حوضه آبخیز گرگانرود در استان گلستان و ایران

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبخیز گرگانرود

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (درجه و دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه و دقیقه)
۱	گنبد کاووس	سینوپتیک	۳۷/۲	۵۵° ۱۷'	۳۷° ۲۵'
۲	کلاله	سینوپتیک	۱۲۸/۸	۵۵° ۴۸'	۳۷° ۳۷'
۳	گلیداغ	کلیماتولوژی	۹۵۰	۵۵° ۵۶'	۳۷° ۳۸'
۴	آزاد شهر	سینوپتیک	۹۴۶	۵۵° ۱۷'	۳۷° ۰۵'
۵	باقرآباد	کلیماتولوژی	۳۰۰	۵۵° ۱۲'	۳۶° ۹۵'
۶	دوزین	سینوپتیک	۱۰۱۰	۵۵° ۳۴'	۳۷° ۰۷'
۷	گالیکش	کلیماتولوژی	۲۰۰	۵۵° ۴۳'	۳۷° ۲۷'

## روش تحقیق

## پیش‌بینی تغییرات اقلیمی حوضه

به منظور بررسی تغییرات اقلیمی آمار پارامترهای هواشناسی (دما و بارش) ایستگاه‌های موجود در حوضه در دوره آماری ۲۰ سال (۲۰۲۰-۲۰۰۱) از سازمان هواشناسی کشور و شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ گردید. سپس نرمال بودن داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و آزمون همگنی و تصادفی بودن داده‌ها با آزمون ران تست بررسی شد. جهت رفع نواقص آماری نیز به روش رگرسیون در محیط نرم افزار SPSS اقدام گردید. همچنین ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) با استفاده از سه سناریوی A1B, A2, B1 (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) در مدل LARS-WG<sup>۱</sup> بر اساس گزارش پنجم هیئت بین الدول تغییر اقلیم و دو مدل HADCM3<sup>۲</sup> و GFCM21<sup>۳</sup> انجام شد. مشخصات ایستگاه‌های موجود در حوضه در جدول (۱) اشاره شده است.

جهت ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG و اطمینان از توانایی آن در پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش، علاوه بر آزمون‌های آماری (Chi-square و t-test, F-test) که در خود مدل در مرحله اعتبارسنجی صورت می‌گیرد، شاخص‌های عملکردی، ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به کار گرفته شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_y)^2} \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

در روابط فوق  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب  $i$  امین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل هستند.  $\mu_x$  و  $\mu_y$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در جامعه آماری و  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

## پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی حوضه

کاربری اراضی یکی از مهمترین فاکتورهایی است که مقادیر رواناب، تبخیر و تعرق و فرسایش سطحی حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ (جدول ۲) مربوط به اواخر مرداد ماه به دلیل کاهش خطاهای ناشی از وجود پوشش‌های گیاهی زودرس با عمر کوتاه استفاده شد. نقشه کاربری اراضی حوضه برای سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال<sup>۴</sup> تهیه گردید و از طریق پایگاه Google Earth و ضریب کاپا ارزیابی شد. همچنین شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov در نرم‌افزار ادیسی نسخه Selva انجام شد.

جدول ۲. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

ردیف	تاریخ تصویر	ماهواره سری سنجنده	قدرت تفکیک (متر)	تعداد باندها
۱	۲۰۰۱	۵ TM	۳۰	۷
۲	۲۰۱۰	۷ Landsat ETM+	۳۰	۸
۳	۲۰۲۰	۸ OLI	۳۰	۱۱

## تخمین فرسایش و رسوب با مدل RUSLE

ویشمایر و اسمیت در سال ۱۹۷۸، پس از حدود ۳۰ سال مطالعه در مورد فرسایش آبی، در ۴۶ ایستگاه تحقیقاتی در ۲۶ ایالت مختلف آمریکا با شرایط مختلف آب و هوایی و با در نظر

گرفتن نتایج بررسی‌های دیگران، فرمول (۱) را معرفی کردند (Renard, 2003)

شده USLE، یعنی RUSLE توسط رینارد و همکاران در سال ۱۹۹۷ معرفی شد. رابطه کلی این مدل به صورت زیر می‌باشد (Renard et al., 1997).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

که در آن؛  $A$ : میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)،  $R$ : عامل فرساینده‌گی باران،  $K$ : عامل فرسایش‌پذیری خاک،  $L$ : عامل طول شیب،  $S$ : عامل درجه

### عامل درجه شیب (S) و طول شیب (L)

فاکتورهای L و S در مدل RUSLE، بیانگر تأثیر توپوگرافی بر روی فرسایش خاک است. با افزایش در طول شیب و درجه شیب، سرعت جریان آب در سطح زمین افزایش می‌یابد که باعث تشدید فرسایش خاک می‌شود. به طور کلی، می‌توان هریک از عوامل طول شیب و درجه شیب را با هم در نظر گرفت که آن را با علامت LS نشان می‌دهند (Rahimi and Mezbaani, 2013). برای بدست آوردن ضریب LS از رابطه زیر استفاده گردید.

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{22.13} (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2) \quad (7) \text{ رابطه}$$

که در آن؛ S، درصد شیب زمین و L، طول شیب بر حسب متر.

### عامل حفاظت خاک (P)

عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک که در آن، میزان خاک فرسایش یافته از منطقه با کشت نوار و بر روی خطوط موازی تراز یا ترانس‌بندی شده به خاک از دست رفته با کشت خطی موازی جهت شیب (از بالا به پایین) است. چنانچه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد، مقدار آن یک در نظر گرفته می‌شود. در بعضی مواقع در صورت نبود اطلاعات کافی در مورد نحوه مدیریت اراضی، از معادله حذف می‌شود.

### عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور پوشش گیاهی به همراه درجه شیب و طول شیب در فرسایش خاک و تولید رسوب حساسیت بیشتری دارند. اما پر کاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فناوری سنجش از دور بر مبنای رابطه ۸ بدست می‌آید.

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (8) \text{ رابطه}$$

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. بعد از انجام تبدیل خطی معکوس از نمونه‌های تعلیمی، رابطه بین C و NDVI می‌تواند به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C = ((1 - NDVI) * 2) \quad (9) \text{ رابطه}$$

بنابراین مقدار C در هر سلول بدست می‌آید. از آنجایی که مقادیر فاکتور C بین صفر و یک می‌باشد، مقدار صفر به پیکسل‌های با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌هایی با مقدار بیشتر از یک اختصاص یافت.

شیب، C: عامل پوشش گیاهی، P: عامل اقدامات حفاظتی و مقادیر C، S، L و P بدون واحد می‌باشند. هر کدام از این فاکتورها بترتیب زیر تهیه شدند:

### عامل فرساینده‌گی باران (R)

این عامل بیانگر فاکتور فرساینده‌گی باران یا معیار فرسایش برای مدت بارندگی مورد نظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند. این شاخص (EI30) از ترکیب انرژی جنبشی باران (E) و بیشترین شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای منطقه (I30) به دست می‌آید (Salehi et al., 2014). برای مناطقی که جزئیات داده‌های اقلیمی وجود ندارد، R را می‌توان با استفاده از اصلاح شده شاخص فورنیر تخمین زد. رابطه شاخص فورنیر F به صورت زیر می‌باشد.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad (5) \text{ رابطه}$$

در آن  $P_i$ : متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر)، P: متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است. با جایگذاری شاخص فورنیر در روابط زیر که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است (Renard and Freidmund, 1994)، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌ها برآورد می‌شود.

$$R\text{-Factor} = (0.07397 * F1.847) * 17.2 \quad F < 55\text{mm}$$

$$R\text{-Factor} = (95.77 - 6.081 * F + 0.4770 * F^2) * 17.2 \quad F \geq 55\text{mm}$$

### عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

سرعت فرسایش‌پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. فاکتور K با بافت، میزان ماده آلی، نفوذپذیری ساختمان خاک رابطه دارد، اما با نوع تیپ خاک همبستگی بالایی دارد (Wischmeier et al., 1971). فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نمودار و در برخی خاک‌ها از رابطه جبری زیر استفاده می‌شود (Wischmeier and Smith, 1978).

رابطه (۶)

$$K = \frac{2}{73} * 10^{-6} M^{1/4} (12 - a) + \frac{3}{25} * 10^{-2} (b - 2) + \frac{2}{5} 10^{-2} (c - 3)$$

در این رابطه، M: قطر ذره (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) × (درصد رس - ۱۰۰)، a: درصد ماده آلی، b: کد ساختمان خاک و c: کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک می‌باشند.

جدول ۳. شیب روند دما و بارش سالانه در ایستگاه آزادشهر طی دوره

۲۰۲۰-۲۰۰۱			
پارامتر اقلیمی	بارش (mm)	دمای حداکثر (C°)	دمای حداقل (C°)
شیب روند	-۳/۳۹۵	۰/۱۶۰	۰/۰۳۲

### نتایج ارزیابی مدل LARS-WG

اعتبارسنجی مدل LARS-WG با داده‌های تولیدی در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱) با داده‌های واقعی (مشاهده شده) مقایسه و ارزیابی مدل با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R<sup>2</sup>), جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام شد (جدول ۴). با توجه به جدول شماره ۴ مدل در دوره واسنجی از عملکرد خوبی برخوردار بوده و دقت آن در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

### ریز مقیاس نمایی داده‌ها بزرگ مقیاس و تولید داده برای آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰)

داده‌های دمای حداکثر و دمای حداقل در ایستگاه آزادشهر با سه سناریو در دوره آتی شبیه‌سازی گردید (جدول ۵). تمامی سناریوها دمای بیشتری را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند. به طوری که انتظار می‌رود دمای منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد.

### مقادیر شدت و پتانسیل خطر فرسایش

پس از تهیه نقشه فاکتورهای مدل RUSLE همه آنها در نرم افزار ArcGIS وارد و در بخش Raster calculator مطابق رابطه (۱) ضرب شدند. به منظور شبیه‌سازی مقادیر شدت فرسایش در آینده پارامترهای K, LS و P برای شبیه‌سازی ثابت فرض شدند. به منظور برآورد فرساینده‌گی باران آینده با توجه به بارش پیش‌بینی شده با مدل گردش عمومی از طریق مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG در سه سناریوی مختلف و هر کدام از این مقادیر پس از تبدیل به مقادیر فرساینده‌گی باران به مدل RUSLE وارد شدند. پارامتر C نیز از طریق مدل CA-Markov شبیه‌سازی کاربری اراضی برای سال ۲۰۳۰ انجام گرفته در نهایت نقشه C وارد مدل RUSLE شد. با تغییر پارامترهای R و C به همراه پارامترهای K, LS و P مقادیر شبیه‌سازی شده شدت خطر فرسایش آینده تخمین زده شد.

### نتایج

#### پیش‌بینی تغییرات اقلیمی حوضه

ایستگاه آزادشهر در خروجی حوضه آبخیز گرگانرود واقع است که به عنوان ایستگاه مبنا برای بررسی تغییرات رواناب حوضه در نظر گرفته شد. مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه آزادشهر برای پارامترهای بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر دو ساعت آفتابی را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۴. نتایج ارزیابی واسنجی مدل LARS-WG در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱)

پارامترهای آماری	بارش (mm)	دمای حداقل (C°)	دمای حداکثر (C°)	ساعت آفتابی (h)
MAE	۴/۶	۰/۱۷۳	۰/۲۶۵	۰/۱۳۹
RMSE	۶/۸	۰/۴۱۶	۰/۵۱۴	۰/۳۷۳
R <sup>2</sup>	۰/۸۶۲	۰/۸۲۶	۰/۸۴۵	۰/۷۲۳

جدول ۵. مقادیر دمای حداکثر و حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

ماه	دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱			دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱			دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱		
	A2	A1B	B1	دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱	A2	A1B	B1	دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱	
ژانویه	۲/۹۷	۲/۸۹	۲/۸۶	۳/۱۹	۲/۸۶	۲/۸۹	۲/۹۷	۳/۶۸	
فوریه	۵/۳۶	۵/۹۱	۵/۵۱	۶/۸۸	۵/۵۱	۵/۹۱	۵/۳۶	۱/۴۶	
مارس	۹۳/۱۰	۱۰/۱۱	۱۱/۲۶	۱۲/۱۸	۱۱/۲۶	۱۰/۱۱	۹۳/۱۰	۳/۲۵	
آوریل	۱۸/۰۲	۱۷/۶۶	۱۸/۸۱	۱۶/۷۹	۱۸/۸۱	۱۷/۶۶	۱۸/۰۲	۹/۲۸	
می	۲۳/۵۳	۲۲/۴۷	۲۵/۰۲	۲۱/۷۷	۲۵/۰۲	۲۲/۴۷	۲۳/۵۳	۱۳/۳۱	
ژوئن	۲۹/۶۵	۲۷/۰۱	۳۱/۲۵	۲۶/۷۱	۳۱/۲۵	۲۷/۰۱	۲۹/۶۵	۱۹/۷۸	
ژولای	۳۳/۰۸	۳۰/۸۷	۳۴/۰۰	۲۹/۰۳	۳۴/۰۰	۳۰/۸۷	۳۳/۰۸	۲۲/۸۲	
اگوست	۳۲/۷۶	۲۹/۴۶	۳۳/۵۰	۲۹/۶۷	۳۳/۵۰	۲۹/۴۶	۳۲/۷۶	۲۱/۱۹	
سپتامبر	۲۸/۶۴	۲۸/۳۱	۲۹/۴۲	۲۶/۷۵	۲۹/۴۲	۲۸/۳۱	۲۸/۶۴	۱۶/۹۶	
اکتبر	۲۱/۲۲	۲۰/۶۱	۲۱/۴۰	۲۲/۹۷	۲۱/۴۰	۲۰/۶۱	۲۱/۲۲	۱۰/۰۳	
نوامبر	۱۲/۰۱	۱۱/۳۱	۱۲/۶۱	۱۳/۰۴	۱۲/۶۱	۱۱/۳۱	۱۲/۰۱	۴/۳۷	
دسامبر	۱۰/۴۹	۱۰/۲۲	۱۱/۱۳	۱۰/۰۳	۱۱/۱۳	۱۰/۲۲	۱۰/۴۹	۳/۰۳	
سالانه	۱۹/۰۶	۱۸/۰۷	۱۹/۷۳	۱۸/۲۵	۱۹/۷۳	۱۸/۰۷	۱۹/۰۶	۹/۹۱	

A2، A1B و B1 پیش‌بینی شد. لازم به ذکر است مقادیر NCEP در ایستگاه‌هایی که طول دوره آماری کافی نبود، از NCEP‌های منتخب نزدیک‌ترین ایستگاه استفاده شد. سپس با توجه به فرمول شاخص فرساینده‌ی باران برای تمام ایستگاه‌ها در دوره پایه و تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 محاسبه شد. میزان تغییرات شاخص فرساینده‌ی باران بر اساس رابطه آن برای ایستگاه‌های حوضه بدست آمد (جدول ۷).

جدول ۷. فاکتور فرساینده‌ی باران ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ) در دوره پایه و سه سناریوی اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	دوره پایه			دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
گنبد کاووس	۴۴۷/۶۶۰	۴۶۷/۴۴۴	۴۶۷/۴۷۳۶	۴۶۵/۱۶۱	۴۴۷/۴۴۴	۴۶۷/۴۷۳۶
گلیداغ	۵۰۳/۸۹۶	۵۲۰/۸۳۴	۵۲۰/۸۳۴	۵۲۴/۴۳۳۵	۵۳۳/۶۸۵	۵۲۰/۸۳۴
کلاله	۴۵۲/۰۷۳	۴۶۵/۴۹۳	۴۶۵/۴۹۳	۴۵۸/۸۰۹	۴۶۵/۴۹۳	۴۶۵/۴۹۳
دوزین	۴۴۵/۸۸۶	۴۶۲/۵۵۸	۴۶۲/۵۵۸	۴۵۰/۵۴۸	۴۴۴/۹۷۱	۴۶۲/۵۵۸
آزادشهر	۴۸۳/۵۴۹	۴۴۵/۳۷۰	۴۴۵/۳۷۰	۴۴۵/۲۲۸	۴۵۵/۸۴۶	۴۴۵/۳۷۰
باقرآباد	۴۸۷/۷۹۰	۴۵۰/۲۶۴	۴۵۰/۲۶۴	۵۲۶/۹۵۶	۴۹۵/۱۶۵	۴۵۰/۲۶۴
گالیکش	۵۱۱/۸۵۱	۵۱۷/۸۹۶	۵۱۷/۸۹۶	۵۳۰/۶۳۳	۵۲۰/۲۷۳	۵۱۷/۸۹۶

مطابق جدول فوق مشاهده می‌شود حداکثر میزان فرساینده‌ی باران در دوره پایه مربوط به ایستگاه گالیکش ( $۵۱۱/۸۵۱\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ) و حداقل میزان فرساینده‌ی باران به ایستگاه دوزین ( $۴۴۵/۸۸۶\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ) می‌باشد. همچنین حداکثر و حداقل میزان فرساینده‌ی باران در دوره پایه و سه سناریوی مورد بررسی به ترتیب در ایستگاه گالیکش (دوره پایه) و ایستگاه دوزین (سناریوی A1B) می‌باشد. توزیع مکانی عامل فرساینده‌ی باران در دوره پایه و سه سناریو به صورت زیر بدست آمد (شکل ۲). با توجه به شکل شماره ۲، در دوره پایه مناطق پایین‌دست، میانی و شرق و جنوب شرقی حوضه بترتیب دارای حداکثر، متوسط و حداقل فرساینده‌ی باران می‌باشد. در دوره شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف A2، A1B و B1 اغلب فرساینده‌ی باران در مناطق مختلف حوضه اختلاف چندانی ندارد بطوریکه مقادیر متوسط، حداکثر و حداقل فرساینده‌ی باران بترتیب در مناطق میانی، پایین‌دست و شرق حوضه قرار می‌گیرند.

#### عامل پوشش گیاهی (C)

شاخص NDVI به دلیل کارایی بهتر به عنوان شاخص استاندارد پوشش گیاهی حوضه آبخیز گرگانود برای بررسی انتخاب گردید و تغییرات آن در سه دوره مورد نظر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بدست آمد (شکل ۳ و ۴). همچنین نرخ تغییرات در سه دوره مورد بررسی به صورت جدول (۸) قابل مشاهده است.

نتایج حاکی از افزایش دما در همه ماه‌ها برای تمامی سناریوهای اقلیمی می‌باشد. به‌طور کلی دمای سالانه نیز افزایش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود بالاترین مقدار افزایش دما و سناریو B1 که سناریو خوشبینانه معرفی شده کمترین مقدار افزایش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه، افزایش دما در حد متوسط را نشان می‌دهد. داده‌های بارش نیز برای دوره آتی شبیه‌سازی و با دوره پایه مقایسه شد (جدول ۶).

جدول ۶. نتایج بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه و آینده تحت سه سناریو

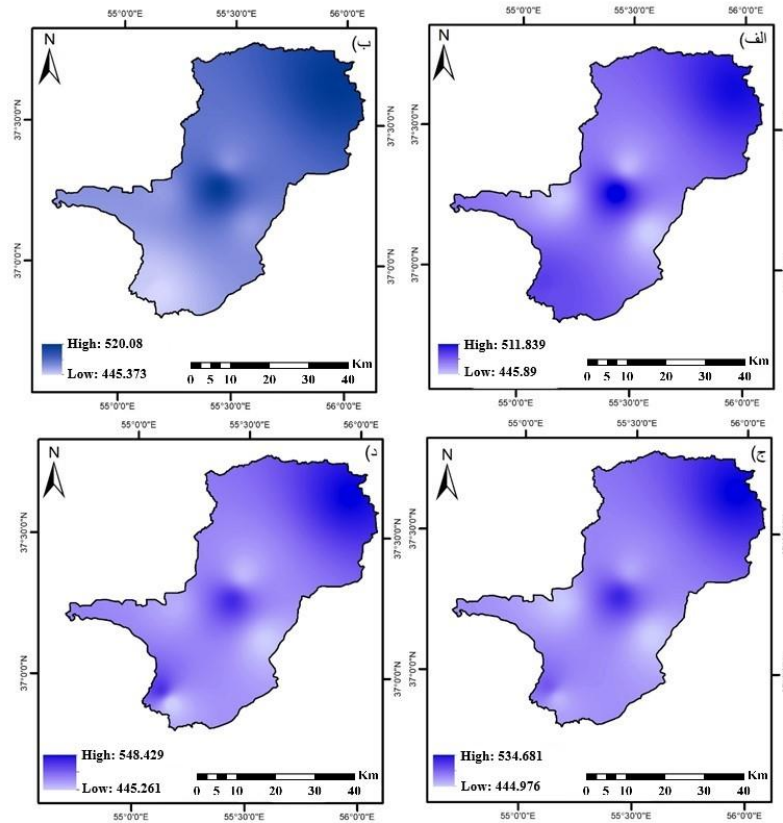
ماه	مقدار بارش دوره پایه (میلی‌متر)			مقدار بارش دوره آینده (میلی‌متر)		
	۲۰۲۰-۲۰۲۱	A2	A1B	B1	A1B	A2
ژانویه	۴/۵۵	۴/۳۵	۴/۷۵	۵/۶۱	۴/۷۵	۴/۳۵
فوریه	۴/۷۲	۴/۷۳	۴/۸۲	۴/۲۲	۴/۸۲	۴/۷۳
مارس	۳/۲۴	۳/۸۹	۳/۰۲	۳/۶۲	۳/۰۲	۳/۸۹
آوریل	۱/۳۲	۱/۷۱	۱/۸۱	۱/۹۱	۱/۸۱	۱/۷۱
می	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۳
ژوئن	۰/۱۶	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۲۹
ژولای	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۷
آگوست	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۲۱
سپتامبر	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۸
اکتبر	۴/۷۹	۵/۱۶	۴/۵۰	۴/۸۸	۴/۵۰	۵/۱۶
نوامبر	۴/۹۵	۵/۲۵	۵/۳۳	۵/۸۲	۵/۳۳	۵/۲۵
دسامبر	۵/۷۴	۶/۳۱	۵/۸۸	۶/۵۵	۵/۸۸	۶/۳۱
سالانه	۲/۵۰	۲/۷۰	۲/۵۷	۲/۷۷	۲/۵۷	۲/۷۰

مطابق جدول فوق بارش در اکثر ماه‌ها کاهش پیدا کرده است. میزان بارندگی منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۴ تا ۶ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. به‌طور کلی بارندگی سالانه نیز کاهش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود، بالاترین مقدار کاهش بارش و سناریو B1 که سناریو خوشبینانه معرفی شده کمترین مقدار کاهش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه کاهش بارش در حد متوسط را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش باران در سناریو A2 در ماه مارس بیش از سایر ماه‌ها و حدود ۶۵ درصد بوده و در سناریو B1 میزان بارش در ماه فوریه بیشتر از ماه‌های دیگر و حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش که در اکثر ماه‌ها مشاهده می‌شود، در برخی ماه‌ها نیز شاهد افزایش بارش در دوره آتی هستیم. افزایش بارش در ماه‌های خشک سال معنی‌دار نیست.

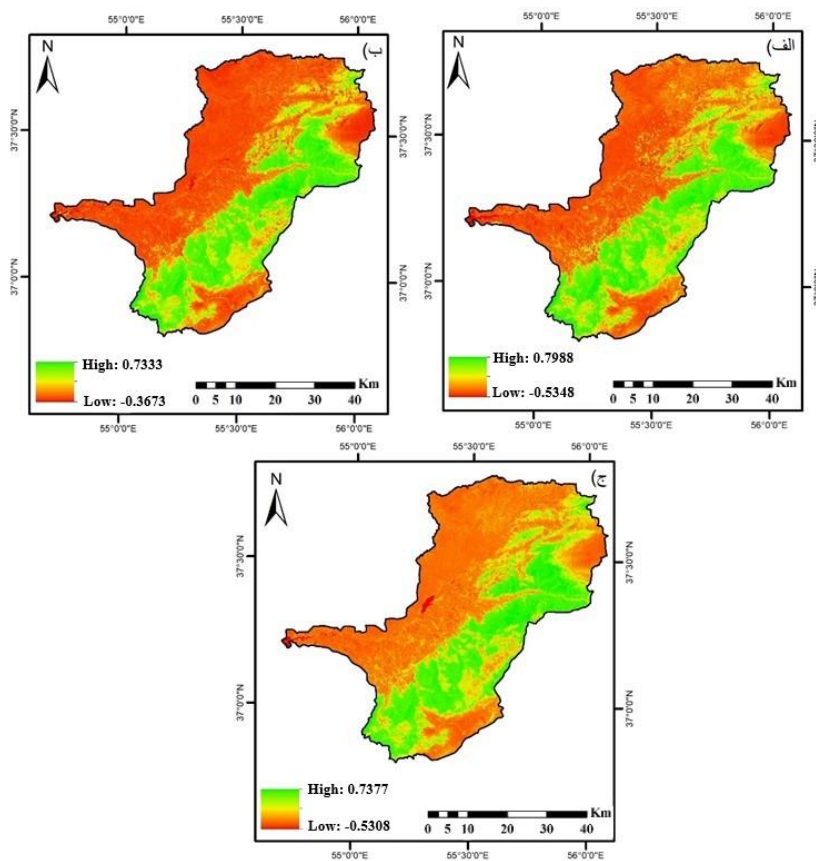
#### نتایج حاصل از برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل RUSLE توزیع مکانی عامل فرساینده‌ی باران (R)

مقدار بارندگی روزانه برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ میلادی برای تمام ایستگاه‌های حوضه بر مبنای گزارش پنجم IPCC و مدل‌های اقلیم جهانی HADCM3 تحت سناریوهای انتشار





شکل ۲. نقشه توزیع مکانی عامل فرسایش‌دگی باران با روش IDW. دوره پایه، (ب) سناریوی A2، (ج) سناریوی A1B، (د) سناریوی B1



شکل ۳. شاخص NDVI در سه دوره زمانی. (الف) ۲۰۰۱، (ب) ۲۰۱۰، (ج) ۲۰۲۰

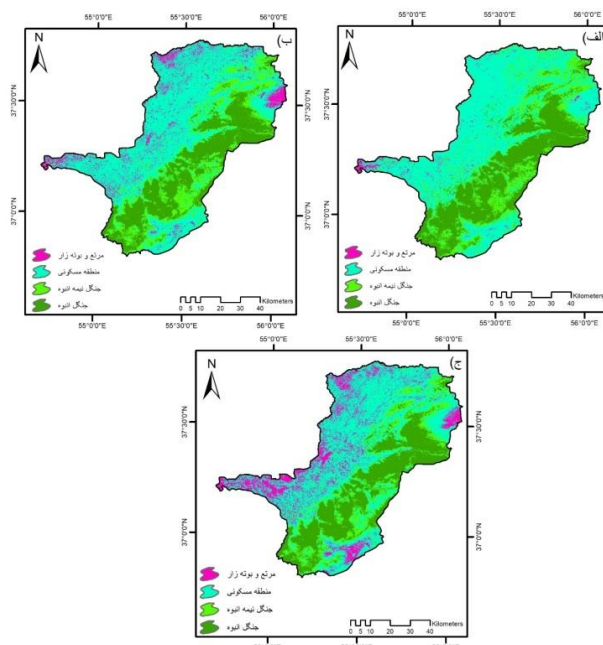
نتایج حاصل از پیش بینی کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov با مینا قرار دادن نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ و با استفاده از ماتریس احتمال انتقال به روش خودکار، نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۴۰ میلادی به دست آمد (شکل ۵) که مساحت طبقات آن در سال‌های مورد مطالعه در جدول (۹) نشان داده شده است.

جدول ۸. نرخ تغییرات شاخص NDVI در سه دوره زمانی

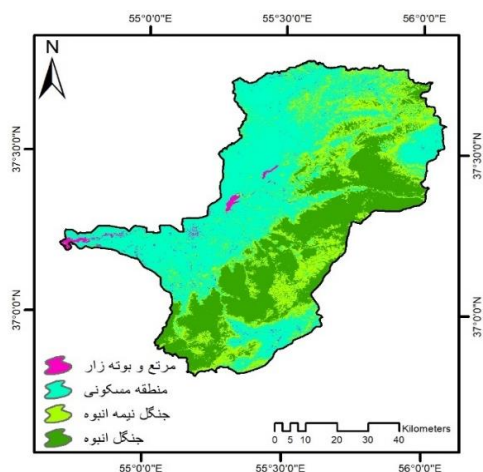
سال	وسعت پوشش (هکتار)	درصد	شاخص
۲۰۰۱	۱۷۸۹۴۴/۳۰	۲۹/۵۵	۰/۲۸۸
۲۰۱۰	۱۲۶۵۶۶/۳۴	۲۰/۹۰	۰/۲۲۳
۲۰۲۰	۱۵۲۴۸۶/۲۰	۲۵/۱۸	۰/۱۹۷

جدول ۹. مساحت طبقات کاربری اراضی (بر حسب هکتار) در سال‌های مورد مطالعه

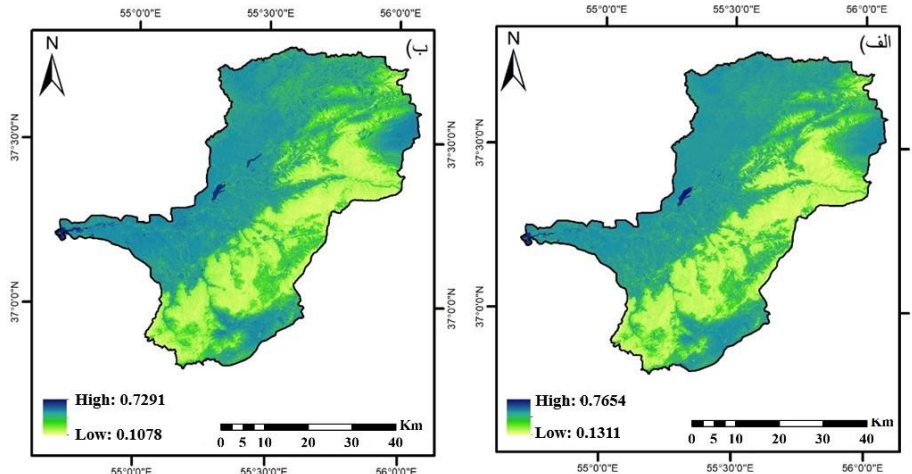
سال	مرتع و بوته‌زار		منطقه مسکونی		جنگل نیمه انبوه		جنگل انبوه	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
۲۰۰۱	۱۰۵۲۳/۸۸	۱/۷۹	۲۸۷۹۱۷/۸۰	۴۸/۴۳	۱۰۴۰۷۰/۸۰	۱۷/۸۴	۱۷۸۹۴۴/۳۰	۳۱/۹۴
۲۰۱۰	۷۰۲۱۷/۸۶	۱۱/۶۷	۲۹۳۳۰۳/۷۰	۴۸/۷۳	۱۰۹۸۱۰/۰۸	۱۸/۲۴	۱۲۸۵۶۶/۳۴	۲۱/۳۶
۲۰۲۰	۷۹۹۵۸/۲۳	۱۳/۲۲	۲۹۸۳۸۶/۲۸	۴۹/۳۴	۷۵۸۳۲/۴۵	۱۲/۵۴	۱۵۰۵۸۶/۲۰	۲۴/۹۰
۲۰۴۰	۸۰۳۹/۸۳	۱/۳۳	۳۱۰۱۵۰/۹۰	۵۱/۲۳	۱۲۰۶۸۶/۸۰	۱۹/۹۳	۱۶۶۵۵۶/۴۰	۲۷/۵۱



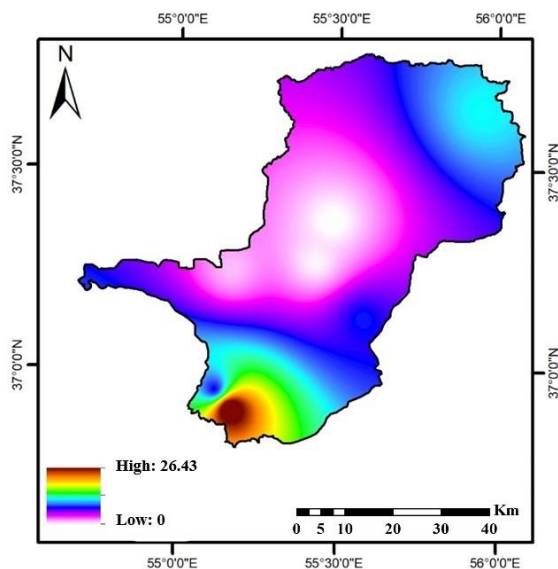
شکل ۴. نقشه کاربری اراضی در سه دوره زمانی (الف) ۲۰۰۱، (ب) ۲۰۱۰، (ج) ۲۰۲۰



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی پیش بینی شده سال ۲۰۴۰ حوضه مورد مطالعه



شکل ۶. نقشه عامل پوشش گیاهی. الف) دوره پایه، ب) سال ۲۰۴۰



شکل ۷. نقشه عامل طول و درجه شیب حوضه مورد مطالعه

مطابق شکل فوق، مقدار فاکتور LS از ۰ تا ۲۶/۴۳ متر در سطح پیکسل متغیر است که در مناطق با شیب تند و ناهموار مقدار آن بیشتر است. مقادیر بزرگتر و تغییرات زیاد در مناطق بالادست بیشتر به علت شیب زیادتر (فاکتور S) و تغییرات توپوگرافی آن است. فاکتور LS در پیکسل‌های نزدیک رودخانه به علت L فاکتور بزرگتر، نسبتاً بزرگ است.

#### عوامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و حفاظتی (P)

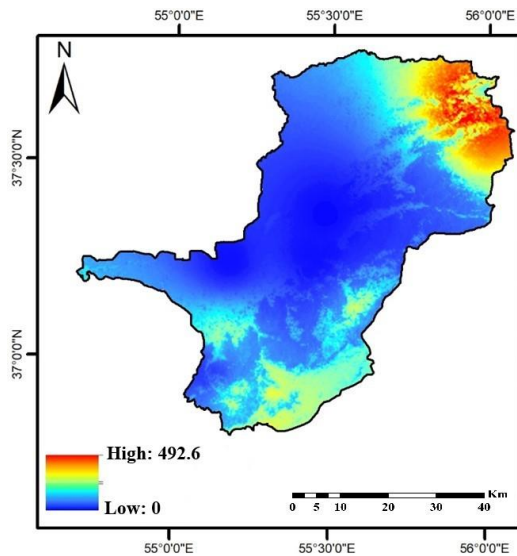
با توجه فرمول عامل فرسایش‌پذیری خاک، نقشه نهایی فاکتور K با استفاده از روش IDW به دست آمد (شکل ۸). مطابق نقشه، مقدار این فاکتور از ۰ تا ۲۵۸  $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$   $\text{mm}^{-1}$  متغیر است. مقدار عامل حفاظتی خاک نیز از ۰/۳۵۵ تا ۰/۷۰۸  $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  بدست آمد (شکل ۹).

با توجه نتایج بدست آمده در طی ۴۰ سال از سطح طبقات کاربری جنگل انبوه و جنگل نیمه انبوه در حوضه آبخیز گرگانرود کاسته خواهد شد؛ در صورتی که بقیه کاربری‌ها افزایش سطح خواهند داشت. کاهش سطح در طبقه جنگل انبوه طی این ۴۰ سال ۲۳۹۸ کیلومترمربع خواهد بود. کاربری مرتع و بوته‌زار نیز در فاصله زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۴۰ مقدار ۲۰۷۴/۰۵ کیلومتر افزایش سطح پیش‌بینی شده است. همچنین کاربری مسکونی در فاصله زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ افزایش سطح ۱۱۸۵۵/۳۲ کیلومتر مربع داشته است. در دوره زمانی ۲۰۰۱ میلادی تا ۲۰۲۰ میلادی بیشترین افزایش سطح منطقه مسکونی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ۱۹۷۳۷/۹ کیلومتر مربع این افزایش سطح طبق تصاویر ماهواره‌ای ثبت شده است. بعد از این دوره تا دوره ۲۰۴۰ میلادی به مقدار ۲۴۱۲۳/۸ کیلومتر مربع افزایش سطح کشاورزی پیش‌بینی شده است. تبدیل کاربری‌های جنگل به کاربری مسکونی باعث تشدید فرسایش می‌شود. یکی از دلایل این افزایش فرسایش، کاهش مواد آلی خاک است به‌طوری‌که نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد.

مقدار فاکتور C برای هر دو نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۴۰ میلادی محاسبه شد (شکل ۶). مقدار فاکتور C از ۰/۰۰۱ مرتبط با مناطق مسکونی روستایی تا ۱/۰ مرتبط با مناطق کشاورزی متغیر است. مطابق نقشه، نقاط غربی تا شرقی حوضه مقادیر کم فاکتور C (۰/۰۱) را دارا می‌باشد و بیشترین مقدار آن (۰/۱) مربوط به زراعت کشاورزی آبی که در پایین دست و میانی حوضه می‌باشد.

#### عامل طول و درجه شیب (LS)

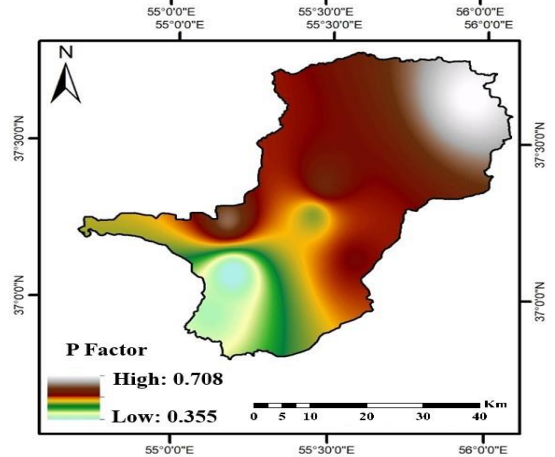
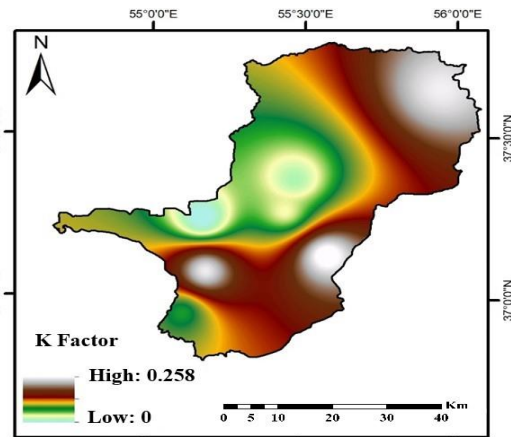
با استفاده از نقشه DEM و رابطه عامل طول و درجه شیب، نقشه فاکتور توپوگرافی استخراج گردید (شکل ۷).



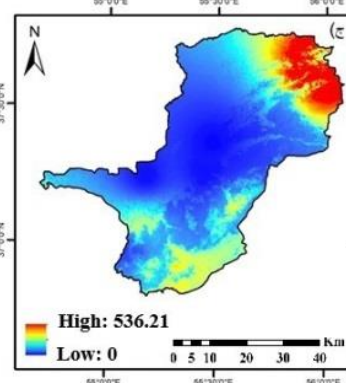
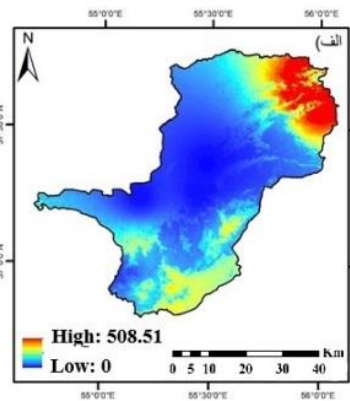
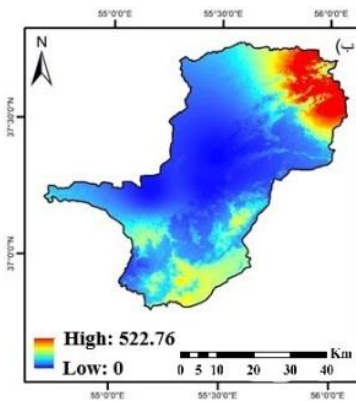
شکل ۹. نقشه فرسایش سالانه خاک (تن در هکتار در سال) حوضه مورد مطالعه در دوره پایه

برآورد پتانسیل خطر فرسایش برای دوره پایه

پس از تهیه عوامل ورودی مدل RUSLE با استفاده از فرمول مدل در محیط نرم افزار ArcGIS10.7 در بخش Raster Calculator میزان فرسایش و تولید رسوب برای دوره پایه محاسبه شد (شکل ۹). مطابق شکل زیر فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه بین ۰ تا ۴۹۲/۶ تن در هکتار در سال متغیر می‌باشد.



شکل ۸. نقشه عوامل فرسایش پذیری خاک (K) و حفاظت خاک (P) حوضه مورد مطالعه



شکل ۱۰. نقشه پتانسیل خطر فرسایش خاک با توجه به تغییر اقلیم. الف) سناریوی A2، ب) سناریوی A1، ج) سناریوی B1

مقدار میانگین ۵۱/۳۹ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد. دلیل اینکه کاربری جنگل‌های انبوه نسبت به کاربری جنگل متوسط فرسایش کمتری دارد این است که در این نواحی مقدار انرژی فرساینده باران کمتر است.

همچنین برای دوره شبیه‌سازی شده تحت سناریوی A2 میانگین فرسایش برای کل حوضه ۹۷/۰۳ تن در هکتار در سال می‌باشد. بیشترین سهم هر کاربری در ایجاد فرسایش در این سناریو مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه با میانگین ۱۱۶/۵۷ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل‌های انبوه با مقدار میانگین ۵۱/۰۹ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد. برای دوره شبیه‌سازی شده تحت سناریوی A1B مقدار آماری میانگین فرسایش برای کل حوضه ۹۸/۳۷ تن در هکتار در سال می‌باشد. بیشترین سهم هر کاربری در ایجاد فرسایش در این سناریو مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه با میانگین ۱۱۸/۱۶ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل‌های انبوه با مقدار میانگین ۵۱/۷۴ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد. همچنین برای سناریوی B1 میانگین فرسایش برای کل حوضه ۱۰۰/۳۱ تن در هکتار در سال می‌باشد. بیشترین سهم هر کاربری در ایجاد فرسایش مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه به دلیل بالا بودن انرژی جنبشی باران با میانگین ۱۲۰/۶۱ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل‌های انبوه با مقدار میانگین ۵۲/۶۳ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد.

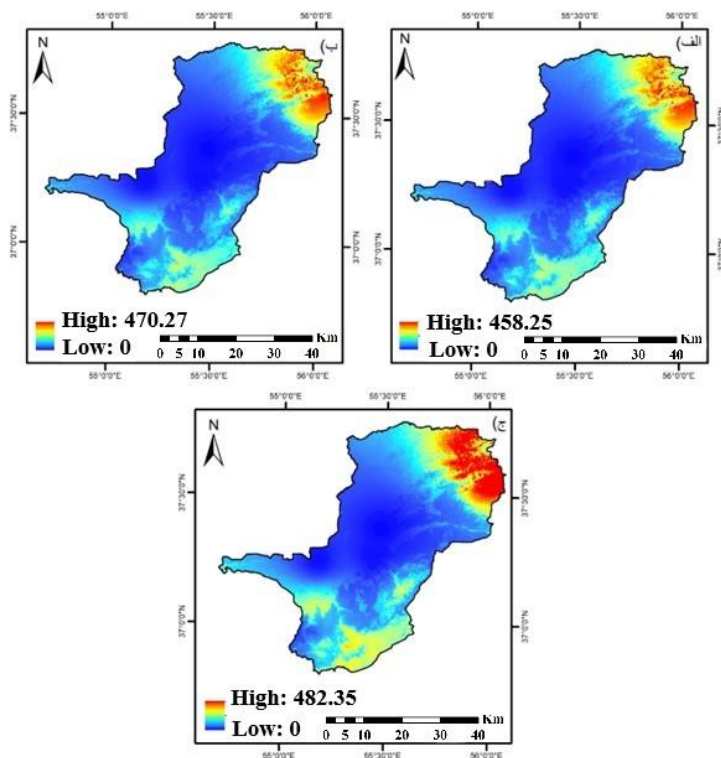
#### برآورد پتانسیل خطر فرسایش با توجه به تغییر اقلیم

پتانسیل خطر فرسایش در دوره آینده با فرض تغییر بارش تحت سناریوی اول تا سوم (A2، A1B و B1) و با نقشه کاربری اراضی پیش‌بینی شده دوره آتی برآورد شد (شکل ۱۰). مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 به ترتیب بین صفر تا ۵۰۸/۵۱ و صفر تا ۵۲۲/۷۶ و صفر تا ۵۳۶/۲۱ تن در هکتار در سال برای کل حوضه بدست آمد. سهم هر کاربری در میزان فرسایش در دوره پایه و آینده نیز مشخص شد (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. وضعیت میانگین فرسایش (تن در هکتار در سال) در دوره پایه و با توجه به تغییر اقلیم آینده

کاربری	سناریوهای تغییر اقلیم			دوره پایه
	B1	A1B	A2	
مرتع و بوته‌زار	۱۱۸/۹۱	۱۱۶/۷۷	۱۱۵/۰۱	۱۱۴/۵۶
منطقه مسکونی	۱۰۹/۱۱	۱۰۶/۸۱	۱۰۵/۴۳	۱۰۴/۶۲
جنگل نیمه انبوه	۱۲۰/۶۱	۱۱۸/۱۶	۱۱۶/۵۷	۱۱۵/۰۴
جنگل انبوه	۵۲/۶۳	۵۱/۷۴	۵۱/۰۹	۵۱/۳۹
میانگین	۱۰۰/۳۱	۹۸/۳۷	۹۷/۰۳	۹۶/۴۱

میانگین فرسایش برای کل حوضه ۹۶/۴۱ تن در هکتار در سال در دوره پایه می‌باشد. بیشترین سهم کاربری در ایجاد فرسایش مربوط به کاربری جنگل نیمه انبوه با میانگین ۱۱۵/۰۴ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل‌های انبوه با



شکل ۱۱. نقشه پتانسیل خطر فرسایش خاک با توجه به تغییر اقلیم و تغییر کاربری. الف) سناریوی A2، ب) سناریوی A1B، ج) سناریوی B1



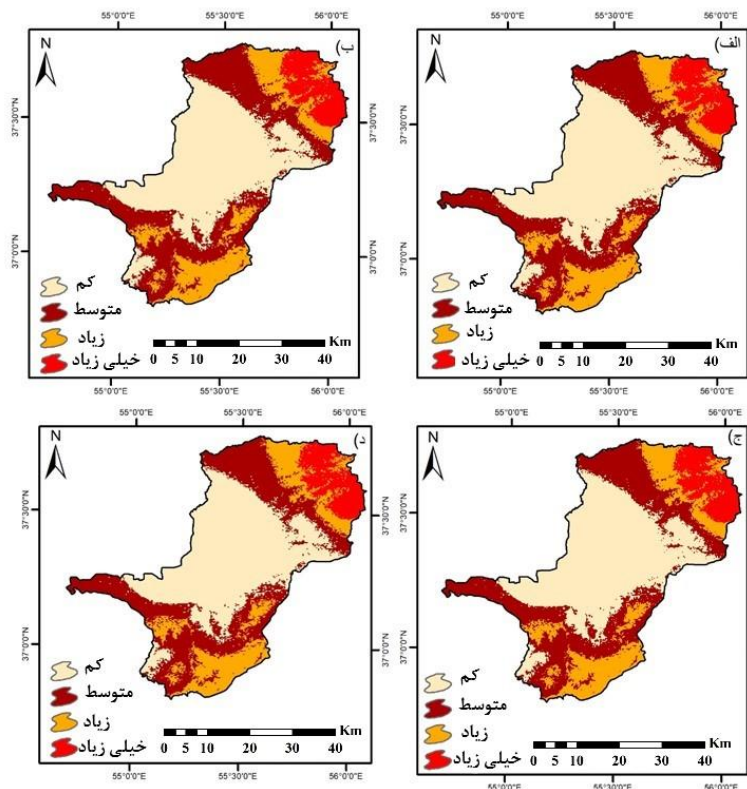
با توجه به جدول فوق در دوره شبیه‌سازی تحت سناریوی A2 و تغییر کاربری اراضی مقدار میانگین فرسایش برای کل حوضه ۸۲/۷۴ تن در هکتار در سال می‌باشد. بیشترین مقدار میانگین فرسایش به تفکیک هر کاربری مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه با مقدار میانگین ۹۸/۸۶ تن در هکتار در سال و کمترین مقدار میانگین مربوط به جنگل‌های انبوه به غیر از مناطق مسکونی با مقدار میانگین ۴۴/۶۸ تن در هکتار در سال می‌باشد. برای سناریوی A1B مقدار میانگین فرسایش برای کل حوضه ۲۵/۸۴ تن در هکتار در سال می‌باشد. در این سناریوی بیشترین مقدار میانگین فرسایش به تفکیک هر کاربری مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه با مقدار میانگین ۹۹/۶۱ تن در هکتار در سال و کمترین مقدار میانگین مربوط به کاربری جنگل انبوه به غیر از مناطق مسکونی با مقدار میانگین ۴۵/۳۸ تن در هکتار در سال می‌باشد. برای سناریوی B1 مقدار میانگین فرسایش در کل حوضه ۹۳/۸۵ تن در هکتار در سال می‌باشد. در این سناریو بیشترین مقدار میانگین فرسایش مربوط به کاربری جنگل‌های نیمه انبوه با مقدار میانگین ۱۰۱/۶۷ تن در هکتار در سال و کمترین مقدار میانگین مربوط به کاربری جنگل انبوه به غیر از مناطق مسکونی با مقدار میانگین ۴۶/۱۷ تن در هکتار در سال می‌باشد.

### برآورد پتانسیل خطر فرسایش با توجه به تغییر اقلیم و کاربری اراضی آینده

جهت برآورد پتانسیل خطر فرسایش از پنج عامل ورودی به مدل RUSLE، عامل شاخص فرساینده باران و عامل پوشش گیاهی برای دوره آینده استفاده شد و بقیه عوامل ثابت در نظر گرفته شد. پتانسیل خطر فرسایش برای دوره شبیه‌سازی شده آینده تحت اثر سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 به دست آمد. پتانسیل خطر فرسایش برای سناریوی A2 مقدار صفر تا ۴۵۸/۲۵ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل برآورد شد. همچنین برای سناریوهای A1B و B1 به ترتیب مقدار صفر تا ۴۷۰/۲۷ و صفر تا ۴۸۲/۳۵ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل برآورد شد (شکل ۱۱). سپس به بررسی میانگین فرسایش به تفکیک هر کاربری و تغییر سطح کاربری‌ها در سطح حوضه طی دوره پایه و آینده پرداخته شد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. وضعیت میانگین فرسایش (تن در هکتار در سال) به تفکیک هر کاربری با توجه به تغییر اقلیم و تغییر کاربری

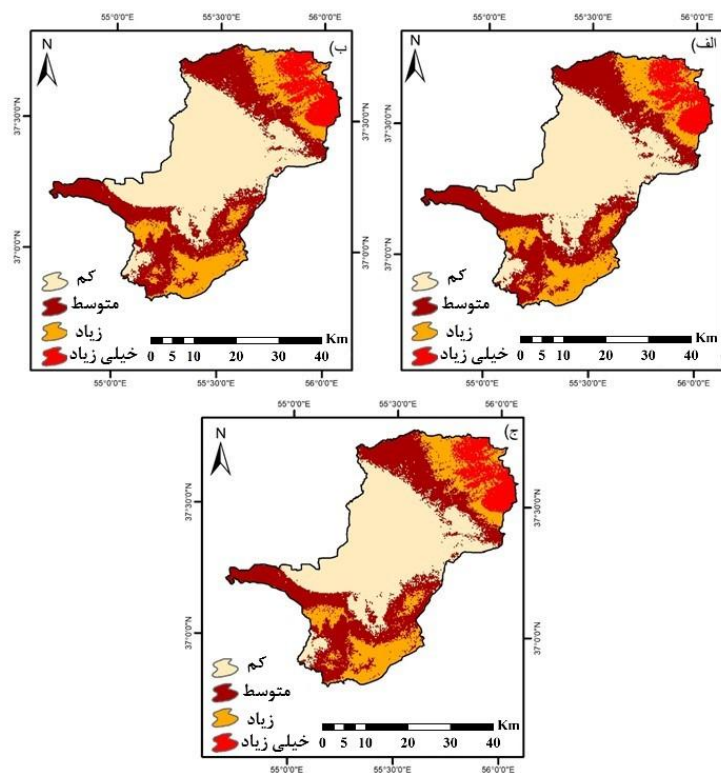
کاربری	سناریوهای تغییر اقلیم		
	B1	A1B	A2
مرتع و بوته زار	۱۰۱/۴۱	۹۹/۵۶	۹۷/۴۱
منطقه مسکونی	۹۴/۴۷	۹۲/۴۷	۹۰/۰۴
جنگل نیمه انبوه	۱۰۱/۶۷	۹۹/۶۱	۹۸/۸۶
جنگل انبوه	۴۶/۱۷	۴۵/۳۸	۴۴/۶۸
میانگین	۸۵/۹۳	۸۴/۲۵	۸۲/۷۴



شکل ۱۲. نقشه طبقه بندی شده فرسایش سالانه خاک در دوره پایه و تغییر اقلیم. (الف دوره پایه، ب سناریوی A2، ج سناریوی A1B، د سناریوی B1)

جدول ۱۲. مساحت طبقات مختلف خطر فرسایش خاک در دوره پایه و تغییر اقلیم

طبقه	دوره پایه		A2		A1B		B1	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
کم	۲۶۶۸/۲۶	۴۴/۳۳	۲۶۲۹/۴۷	۴۳/۶۹	۲۶۴۴/۷۹	۴۳/۹۴	۲۶۲۸/۹۱	۴۳/۶۸
متوسط	۱۸۳۸/۳۲	۳۰/۵۴	۱۸۶۲/۳۵	۳۰/۹۴	۱۸۵۴/۹۷	۳۰/۸۲	۱۸۶۳/۱۱	۳۰/۹۵
زیاد	۱۰۳۲/۹۷	۱۷/۱۶	۱۰۴۰/۷۳	۱۷/۲۹	۱۰۳۳/۵۴	۱۷/۱۷	۱۰۳۹/۷۹	۱۷/۲۷
خیلی زیاد	۴۷۸/۵۵	۷/۹۵	۴۸۵/۵۵	۸/۰۶	۴۸۴/۷۹	۸/۰۵	۴۸۶/۳۱	۸/۰۸



شکل ۱۳. نقشه طبقه‌بندی شده فرسایش سالانه خاک با توجه به تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی. (الف) سناریوی A2، (ب) سناریوی A1B، (ج) سناریوی B1

کم به ترتیب برای سناریوی A1B با مساحت ۲۶۴۴/۷۹ کیلومتر مربع (۴۳/۹۴ درصد)، سناریوی A2 با مساحت ۲۶۲۹/۴۷ کیلومتر مربع (۴۳/۶۹ درصد) و سناریوی B1 با مساحت ۲۶۲۸/۹۱ کیلومتر مربع (۴۳/۶۸ درصد) و مناطق با خطر خیلی زیاد به ترتیب برای سناریوی B1 با مساحت ۴۸۶/۳۱ کیلومتر مربع (۸/۰۸ درصد) و برای سناریوی A2 با مساحت ۴۸۵/۵۵ کیلومتر مربع (۸/۰۶ درصد) و همچنین برای سناریوی A1B با مساحت ۴۸۴/۷۹ کیلومتر مربع (۸/۰۵ درصد) در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

**پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک با توجه به تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی**  
 بعد از ضرب عامل‌ها بر اساس سناریوی دوم تغییر فرسایشی باران همراه با تغییر کاربری اراضی نقشه خطر فرسایش به دست آمد که برای دوره شبیه‌سازی شده بر اساس سناریوی دوم و تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 (شکل ۱۳) در کلاس کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (جدول ۱۳). همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود بیشترین مساحت کلاس خطر در

#### پهنه‌بندی خطر فرسایش در دوره پایه و تغییر اقلیم

جهت پهنه‌بندی لایه‌های وزنی خطر فرسایش در نرم افزار ArcGIS استفاده شد. بر این اساس برای دوره پایه و سناریوهای مختلف (A2، A1B و B1 و کاربری اراضی آینده) در چهار کلاس کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد تقسیم شد (شکل ۱۲ و جدول ۱۲). در این طبقه‌بندی در صورتی که فرسایش کمتر از ۵۰ تن در هکتار در سال باشد در طبقه فرسایش کم قرار گرفت. اگر فرسایش بین ۵۰ تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۲۰۰ تن در هکتار در سال قرار گرفت به ترتیب جزو طبقه متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. در نهایت در صورتی که فرسایش بیشتر از ۲۰۰ تن در هکتار در سال باشد، جزو طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفت. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در دوره پایه بیشترین مساحت کلاس خطر مربوط به کلاس کم با مساحت ۲۶۶۸/۲۶ کیلومتر مربع (۴۴/۳۳ درصد) می‌باشد و سه طبقه دیگر در محدوده بین ۸ تا ۳۰ درصد منطقه را پوشش می‌دهند. در دوره های شبیه سازی شده تحت سناریوهای بیشترین مساحت کلاس خطر نیز مربوط به کلاس خطر

پراساناکومار<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲) و رانزی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر نقش مستقیم طول شیب در افزایش میزان فرسایش مطابقت دارد. اما نتایج حاصل از تلفیق عامل‌های فرسایش نشان داد بیشترین ارتباط فرسایش خاک با وضعیت پوشش گیاهی منطقه بوده است به طوری که در جاهایی که پوشش گیاهی دارای تراکم کم و فقیر بوده به همان نسبت دارای بیشترین مقدار C و خطر فرسایش بیشتر شده است. در واقع نتایج نشان داد قدرت فرساینده‌گی باران و سپس پوشش گیاهی مهم‌ترین مانع در برابر فرسایش بوده و بالا رفتن میزان فرسایش از طریق تبدیل کاربری جنگل انبوه و جنگل نیمه انبوه به مرتع و بوته‌زار، کشاورزی و مسکونی نشان دهنده آثار ناشی از دخالت انسان بوده و هر چه این دخالت و تغییر کمتر شود باعث کاهش فرسایش می‌شود و برعکس، زندی و همکاران (۲۰۱۳) و رحیمی و مزبانی (۲۰۱۳) نیز به چنین یافته‌هایی دست یافتند. نقشه نهایی خطر فرسایش خاک در دوره پایه نشان داد بیشتر سطح منطقه مورد مطالعه در طبقه فرسایش کم بوده است. زیرا بخش‌های زیادی از حوضه مورد مطالعه در نواحی جنگلی و دارای پوشش گیاهی مطلوبی بوده و لذا اثرات مثبتی در کاهش میزان فرسایش داشته است و زمین‌های با کشت دیم و زمین‌های بایر و مرتع و بوته‌زار در خطر فرسایش طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. نقشه مقدار فرسایش خاک نیز یافته‌های بالا را تأیید می‌نماید. این نقشه نشان می‌دهد میزان تلفات خاک در مقیاس پیکسل در حوضه آبخیز گرگانرود بین صفر تا ۴۹۲/۶ تن در هکتار در سال می‌باشد که از این مقدار بیشترین هدر رفت خاک در جنگل‌های نیمه انبوه و همچنین مناطقی که از نظر پوشش گیاهی در وضعیت فقیری هستند قرار دارند. در تحقیق بابائی و همکاران (۲۰۱۶) در پهنه‌بندی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبخیز کن مقادیر فرسایش را از صفر تا ۱۲۰ تن در هکتار در کاربری‌های مختلف و به‌طور متوسط در کل حوضه ۲۰/۲۲ تن در هکتار در سال برآورد شد. در تحقیق دیگر فریدی و رضایی (۲۰۱۵) نتیجه گرفتند که مقادیر فرسایش خاک در سطح حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان بر حسب تن در هکتار از ۰/۰۳۳ تا ۳۲۶۹۹ متغیر است. موسوی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی وضعیت فرسایش خاک در حوضه آبخیز چهل چای را با مدل RUSLE انجام دادند. بر اساس نتایج حاصله مناطق دارای پوشش جنگلی انبوه و نیمه انبوه دارای میانگین فرسایش خیلی کم در حدود ۰/۶۶ تا ۱/۹۱ تن در هکتار بر سال بوده که نشان دهنده تأثیر زیاد پوشش جنگلی بر حفاظت خاک دارد.

پتانسیل تغییر اقلیم بر روی فرسایش خاک تحت سناریوی تغییر اقلیم A2، A1B و B1 در دهه ۲۰۵۰ میلادی بررسی شد. نتایج مقدار فرساینده‌گی باران نشان داد که بین ۲ درصد (A2) تا ۶ درصد (A1B و B1) کاهش مقدار فرساینده‌گی باران را

سناریوی A2 مربوط به طبقه کم با مساحت ۲۵۵۴/۱۵ کیلومتر مربع و ۴۲/۴۴ درصد از مساحت کل حوضه و مناطق با خطر خیلی زیاد دارای مساحت ۴۴۳/۳۵ کیلومتر مربع و ۷/۳۶ درصد از مساحت کل حوضه را شامل می‌شود. در سناریوی A1B بیشترین مساحت کلاس خطر مربوط به کلاس خطر کم با مساحت ۲۶۵۸/۸۱ کیلومتر مربع و دارای ۴۴/۱۷ درصد مساحت کل حوضه و کلاس خطر خیلی زیاد با مساحت ۴۵۴/۸۹ کیلومتر مربع و دارای ۷/۵۵ درصد از مساحت کل حوضه را شامل می‌شود. همچنین در سناریوی B1 بیشترین مساحت کلاس خطر مربوط به کلاس خطر کم با مساحت ۲۶۵۶/۳۴ کیلومتر مربع و ۴۴/۱۳ درصد مساحت کل و کلاس خطر خیلی زیاد با مساحت ۴۵۵/۸۴ کیلومتر مربع و ۷/۵۷ درصد از مساحت کل می‌باشد.

جدول ۱۳. مساحت طبقات مختلف خطر فرسایش خاک با توجه به تغییر اقلیم و تغییر کاربری

طبقه	A2		A1B		B1	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
کم	۲۵۵۴/۱۵	۴۲/۴۴	۲۶۵۸/۸۱	۴۴/۱۷	۲۶۵۶/۳۴	۴۴/۱۳
متوسط	۱۸۲۰/۷۵	۳۰/۴۲	۱۸۹۷/۰۱	۳۱/۲۲	۱۸۸۲/۵۹	۳۱/۲۸
زیاد	۱۰۳۰/۵۱	۱۷/۱۲	۱۰۲۵/۴۱	۱۷/۰۳	۱۰۲۳/۳۲	۱۷/۰۱
خیلی زیاد	۴۴۳/۳۵	۷/۳۶	۴۵۴/۸۹	۷/۵۵	۴۵۵/۸۴	۷/۵۷

### نتیجه‌گیری

به منظور برآورد میزان فرسایش حوضه آبخیز گرگانرود و تغییرات آن در آینده از معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده (RUSLE) در قالب ابزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده گردید. با ترکیب شش عامل مؤثر این مدل بر فرسایش خاک، مقدار آن ۹۶/۴۱ تن در هکتار در سال شد. بیشترین سهم هر کاربری در ایجاد فرسایش مربوط به کاربری جنگل نیمه انبوه با میانگین ۱۱۵/۰۴ تن در هکتار در سال و کاربری جنگل انبوه بدون در نظر گرفتن مناطق مسکونی با مقدار میانگین ۵۱/۳۹ تن در هکتار در سال کمترین سهم را دارد. به دلیل کمتر بودن مقدار فرساینده‌گی باران در مناطقی که دارای کاربری مرتع هست؛ کاربری مرتع و بوته‌زار نسبت به کاربری جنگل متوسط فرسایش کمتری دارد. نتایج حاصل از شدت فرساینده‌گی باران نشان داد مقادیر فرساینده‌گی باران از غرب حوضه به سمت شرق حوضه کاهش پیدا نموده که با کاهش بارندگی مرتبط است. در مناطقی که خطر فرسایش زیاد بوده نتایج نشان داد طول شیب نسبت به سایر بخش‌ها نیز بیشتر بوده و نشان دهنده افزایش جریان‌های تجمعی رواناب بوده است. هر چه طول شیب بیشتر شود منجر به افزایش جریان قدرت جریان آب و انتقال نیروی فرساینده‌گی در سطح بیشتری از خاک شده و در نهایت میزان فرسایش بیشتر شده است (Ranzi et al., 2012). نتایج این بخش با نتایج



عمومی جهانی برای پیش‌بینی بارش استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقدار فرسایش در دهه ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب ۲۸/۳۸، ۲۵/۶۴ و ۲۵/۳۲ درصد نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۳) کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از ماتریس تغییرات کاربری نشان داد که در طبقه کاربری جنگل انبوه روند کاهشی اتفاق افتاده است؛ به طوری که در طی ۴۰ سال ۲۳۹۸ کیلومتر مربع از اراضی جنگل انبوه حوضه آبخیز گرگانرود کاهش یافته است که از این مقدار در فاصله زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ بیشترین کاهش سطح اتفاق افتاده است. در طبقه کاربری جنگل نیمه انبوه نتایج نشان داد سطح جنگل‌های نیمه انبوه در طی ۴۰ سال اخیر ۲۸۵۹۵ کیلومتر مربع کاهش سطح داشته است. البته این کاهش در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بیشترین تغییر را داشته است و در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ مقدار ۵۵۳۹/۲۸ کیلومتر افزایش سطح داشته است و در فاصله سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ دوباره احتمالاً ۵۳۸۳۴/۲۵ کیلومتر مربع کاهش سطح خواهیم داشت.

احتمالاً خواهیم داشت. البته باید توجه داشت که در این تحقیق از مقدار میانگین ماهانه بارش و روش فورنیه برای محاسبه انرژی جنبشی باران استفاده شد. طبق این معادلات با توجه به کاهش مقدار باران در آینده در نتیجه انرژی جنبشی باران که سبب فرسایش می‌شود نیز کاهش خواهد یافت. در صورتی که در این تحقیق به دلیل عدم ثبت رگبار در ایستگاه‌های منطقه، امکان بررسی شدت رگبارهای آینده و نوع ریزش باران نبود. برآورد پتانسیل فرسایش خاک با روش RUSLE نشان داد مقدار فرسایش تحت سناریوی A2 از ۹۶/۴۱ تن در هکتار در سال در دوره پایه به ۹۷/۰۳ تن در هکتار در سال احتمالاً افزایش می‌یابد. مقدار فرسایش در سال در دو سناریوی A1B و B1 به ترتیب ۳/۵۳ درصد تا ۳/۶۱ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد؛ که مهم‌ترین دلیل آن کاهش مقدار فرسایش باران در سناریوهای مورد بررسی نسبت به دوره پایه است. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق گویتا<sup>۷</sup> و کومار<sup>۸</sup> (۲۰۱۷) که اثر تغییر اقلیم بر فرسایش خاک را با مدل RUSLE در حوضه میانی هیمالیا بررسی کردند مطابقت ندارد. آنها در تحقیق خود از مدل‌های سری چهارم و پنجم گردش

#### Reference:

- Agarwal, C. (2002). A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 61 Pages.
- Anderson, R. L., Rowntree, K. M., & Le Roux, J. J. (2021). An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. *Catena*, 206, 105482. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105482>
- Babaei, M., Hosseini, S.Z., Nazari Samani, A. & Almodaresi, S.A. (2016). Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(2), 165-181. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.106454> [in Persian]
- Dabral, P. P., Baithuri, N., & Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*, 22, 1783-1798. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9253-9>
- Eekhout, J.P., & De Vente, J. (2020). How soil erosion model conceptualization affects soil loss projections under climate change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(2), 212-232. <https://doi.org/10.1177/0309133319871937>
- 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), 40-50. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1237383>
- Faridi, P., & Rezaee, P. (2015). Estimation of Soil erosion using RUSLE, GIS and RS (case study: Gabric Watershed, South-eastern of Hormozgan province). The 4th International Conference on Environmental Challenges & Dendrochronology, 14-15 May, Sari Agricultural science and natural resources university, Sari, Iran. <https://civilica.com/doc/788185/> [in Persian]
- Fernández, C., & Vega, J. A. (2016). Evaluation of RUSLE and PESERA models for predicting soil erosion losses in the first year after wildfire in NW Spain. *Geoderma*, 273, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.016>
- Gupta, S., & Kumar, S. (2017). Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model- A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape. *Journal of Earth System Science*, 126, 1-20.
- Halecki, W., Kruk, E., & Ryczek, M. (2018). Loss of topsoil and soil erosion by water in agricultural areas: A multi-criteria approach for various land use scenarios in the Western Carpathians using a SWAT model. *Land Use Policy*, 73, 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.01.041>
- Islam, K., Jashimuddin, M., Nath, B., & Nath, T. K. (2018). Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. The

- Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(1), 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.005>
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in physical geography*, 21(3), 375-393. <https://doi.org/10.1177/030913339702100303>
- Marzen, M., Iserloh, T., De Lima, J. L., Fister, W., & Ries, J. B. (2017). Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*, 590, 502-513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.190>
- Meinen, B. U., & Robinson, D. T. (2021). From hillslopes to watersheds: Variability in model outcomes with the USLE. *Environmental Modelling & Software*, 146, 105229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105229>
- Moisa, M. B., Negash, D. A., Merga, B. B., & Gemed, D. O. (2021). Impact of land-use and land-cover change on soil erosion using the RUSLE model and the geographic information system: a case of Temeji watershed, Western Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3404-3420. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-100340/v1>
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., Meena, P. K., Mishra, P. K., & Shukla, R. (2015). Impact of climate change on future soil erosion in different slope, land use, and soil-type conditions in a part of the Narmada River Basin, India. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(6), C5014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001065](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001065)
- Mousavinejad, S.H., Habashi, H., Kiani, F., Shataee, Sh. & Abdi, O. (2017). Evaluation of soil erosion using imagery SPOT5 satellite in Chehel chi catchment of Golestan Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technologym*, 24(2), 73-86. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.1446.1> [in Persian]
- Nearing, M. A. (2001). Potential changes in rainfall erosivity in the US with climate change during the 21st century. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(3), 229-232. <https://www.jswconline.org/content/56/3/229>
- Pal, S. C., & Chakraborty, R. (2019). Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model. *Advances in Space Research*, 64(2), 352-377. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.04.033>
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N. J. G. F. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience frontiers*, 3(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>
- Rahimi, K., & Mezbaani, M. (2013). Evaluation of Sivand basin erosion by RUSLE Model during 1998 to 200. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Researches*, 3(9), 1-18. [in Persian]
- Ranzi, R., Le, T. H., & Rulli, M. C. (2012). A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo River (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology*, 422, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.009>
- Refahi, H. & Nematti, M. (1995). Erodibility assessment of the Alamout subcatchment and its effect on the sediment yield. *Journal of Agricultural Sciences, Iran* 26, 48-56. [in Persian]
- Refahi, H. G. (2003). *Water erosion and control*. Tehran University Publ. [in Persian]
- Renard, K.G., & Freidmund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 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., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, & D.C. Yoder. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Handbook. No. 703.
- Roy, P. (2019). Application of USLE in a GIS environment to estimate soil erosion in the Irga watershed, Jharkhand, India. *Physical Geography*, 40(4), 361-383. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1550301>
- Sadeghi, S. H., Mostafazadeh, R., & Sadoddin, A. (2015). Response of Sediment graphs and Sediment Rating Loops to Land Use Type and Spatial Pattern. *Watershed Engineering and Management*, 7(1), 15-26. doi: 10.22092/ijwmse.2015.100900 [in Persian]
- Salehi, M.H., Esfandyarpour Broujeni, E., Mohajer, R. & Bagheri Bodaghabadi, M. (2014). *Supplement soil and water conservation*. Payam Noor University Publication, 210 pages. [in Persian]
- Shi, W., & Huang, M. (2021). Predictions of soil and nutrient losses using a modified SWAT model in a large hilly-gully watershed of the Chinese Loess Plateau. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(2), 291-304. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.12.002>
- Smoot, J. L., & Smith, R. D. (1999). *Soil erosion prevention and sediment control*. The University of Tennessee, Knoxville. Water Resources, Civil and Environmental Engineering.
- Solomon, S.D., Qin, M.M., Chen, M.M., Marquis, K.B., Averyt, M.T., & Millers, H.L. (2007). IPCC. Summary for policy makers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Proceedings of the 10th Working Group I Session, Paris, 29 January–1 February 2007*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, New York, NY, USA.

- Teimouri, F., Bazrafshan, O., & Rafiei sardoei, E. (2019). Assessment of Climate Change and Land Use Change on Soil Erosion (Case study: Kondaran watershed). *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(2), 353-368. doi: 10.22059/ije.2019.274886.1038 [in Persian]
- Tangestani, M. H. (2006). Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. *Journal of Asian earth sciences*, 27(5), 585-597. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.06.002>
- Vescovi, F. D., Park, S. J., & Vlek, P. L. (2002). Detection of human-induced land cover changes in a savannah landscape in Ghana: I. Change detection and quantification. In 2nd Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries. Bonn, Germany, 1-8.
- 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.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(5), 189-193.
- Wischmeier, W.H. & Smith D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Agriculture Handbook*, 537. 58p.
- Zakerinejad, R. & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79(1), 25-50. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1700-3>
- Zandi, J., Habibnejad Roshan, M. & Solaimani, K. (2013). Soil erosion risk assessment and its relationship with some environmental parameters (Case study: Vazroud watershed, Mazandaran). *Journal of Range and Watershed Management*, 66(3), 401-415. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.36516> [in Persian]

یادداشت‌ها<sup>۹</sup><sup>1</sup> Long Ashton Research Station Weather Generator<sup>2</sup> Hadley Centre coupled model 3<sup>3</sup> Geophysical Fluid Climate Model<sup>4</sup> Maximum likelihood Classification<sup>5</sup> Prasannakumar<sup>6</sup> Ranzi<sup>7</sup> Gupta<sup>8</sup> Kumar