Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Evaluation of the WEPP model in combination with the GeoWEPP system for spatial assessment of soil erosion in Taleghan's pair catchments

Aliakbar Nazari Samani[*1], Mitra Moridzadeh[2], Saddat Feiznia[3], Morteza Eyvazi[4]

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aknazari@ut.ac.ir
2. M.Sc. Graduate in Watershed Management, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mitra.moridzadeh@alumni.ut.ac.ir
3. Professor, Dept. of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: sfeiz@ut.ac.ir
4. M.Sc. Student of Watershed Management Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: eyvazi.m@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 07.23.2022
Revised: 10.21.2022
Accepted: 01.23.2023

Keywords:
Celigen,
Control watershed,
Evaluation,
Sample,
Spatial distribution

ABSTRACT

Background and Objectives: protection of water and soil is the fundamental work for development natural resources in any country. Lake of available data of soil erosion is a limitation for land managers to apply soil and water conservation in the watershed scale. Over the past decades several erosion models have been invented under different environmental conditions, but, very limited numbers can be used under watershed scale that are enable to considering soil conservation measures. Among the existing methods, WEPP model, has been known as a process oriented model that can be used in different spatial scale namely: hillslope, watershed and large basin. The WEPP model requires a large amount of input data and the model efficiency is highly related into the input data. The main aim of the present investigation was the assessment of WEPP model and spatial extension of the GeoWEPP for estimating of soil erosion and sediment yield in the paired watershed.

Materials and Methods: The study area is located into the Taleghan watershed and the pair catchments of Zaidasht with area of 198.4 ha. All environmental data including: soil attributes, vegetation, climate data were extracted by field and laboratory data analysis for the five erosion plots and whole of the watershed. Model calibration was conducted based on the both infiltration and erodibility parameter through Nash-Sttcliff and R^2 as well as RMSE coefficients.

Results: After optimizing the base value of hydraulic conductivity to about 50% for runoff, the efficiency of the model using the Nash-Sutcliffe coefficient was 0.64, which means that the estimated runoff of each plot is close to the observed values. For the amount of sediment, using the basic values of the model relationships, the model did not provide the right result and the best results were obtained with an increase of 100% for rill erodibility and 150% for interrill erosion, and a decrease of 9% for shear stress and 12% for conductivity. Has obtained hydraulics and the efficiency of the model using the Nash-Sutcliffe coefficient was 0.51, the estimated values are close to the observed values of the plots. Also The results showed that in 2016, the sediment on the submontane level was 0.2 and 0.1 ton/ha/yr for the control and the sample, respectively and In the watershed,

1.1 and 0.3 ton/ha/yr were obtained for control and sample, respectively. Therefore, the WEEP model in the study area will be effective when the parameters of erodibility and hydraulic conductivity are measured with high accuracy. On the other hand, the results of GeoWEEP were obtained in the control and sample basins, respectively, 3.3 and 2.5 ton/ha/yr.

Conclusion: Based on the field observations and forms of erosion, GeoWEEP spatial extension was able to present a realistic picture of the erosion situation at the basin level Considering that this extension can remove the limitation of the model implementation in terms of area, therefore it is recommended to estimate the sediment in the scale of the watershed and in a distributed manner.

Cite this article: Nazari Samani, Aliakbar, Moridzadeh, Mitra, Feiznia, Saddat, Eyvazi, Morteza. 2023. Evaluation of the WEPP model in combination with the GeoWEPP system for spatial assessment of soil erosion in Taleghan's pair catchments. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (4), 51-73.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2023.20415.3574
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۰۶۹-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۲۷۹٤-۲۳۲۲

ارزیابی توانایی مدل وپ در تلفیق با سامانه ژئووپ برای برآورد مکانی فرسایش خاک در حوزه‌های زوجی طالقان

علی‌اکبر نظری سامانی*[۱]، میترا مریدزاده[۲]، سادات فیض‌نیا[۳]، مرتضی عیوضی[٤]

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aknazari@ut.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mitra.moridzadeh@alumni.ut.ac.ir

۳. استاد گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: sfeiz@ut.ac.ir

٤. دانشجوی کارشناسی‌ارشد علوم آبخیزداری، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: eyvazi.m@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۵/۰۱
تاریخ ویرایش: ۰۱/۰۷/۲۹
تاریخ پذیرش: ۰۱/۱۱/۰۳

واژه‌های کلیدی:
ارزیابی،
توزیع مکانی،
حوزه آبخیز شاهد،
کلیژن،
نمونه

چکیده

سابقه و هدف: حفاظت از آب‌وخاک کار اساسی برای بهبود منابع طبیعی در هر کشوری است. کمبود آمار و اطلاعات موجود در زمینه فرسایش خاک یکی از محدودیت‌های مدیران منابع طبیعی برای اعمال حفاظت خاک و آب در مقیاس حوزه آبخیز است. در طول دهه‌های گذشته چندین مدل فرسایش تحت شرایط محیطی مختلف ابداع شده‌اند، اما می‌توان از تعداد بسیار محدودی در مقیاس حوزه آبخیز استفاده کرد که قادر به در نظر گرفتن اقدامات حفاظت از خاک هستند. در میان روش‌های موجود، مدل وپ به‌عنوان یک مدل فرآیندگرا شناخته شده است که می‌تواند در مقیاس فضایی مختلف یعنی: دامنه، حوزه آبخیز و حوزه بزرگ مورداستفاده قرار گیرد. مدل وپ به مقدار زیادی از داده‌های ورودی نیاز دارد و کارایی مدل با داده‌های ورودی مرتبط است. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی مدل وپ و گسترش فضایی ژئووپ برای تخمین فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه زوجی است.

مواد و روش‌ها: منطقه موردمطالعه در حوزه زوجی زیدشت با مساحت ۱۹۸/۵ هکتار و در حوزه آبخیز طالقان واقع شده است. تمام داده‌های محیطی شامل ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی، داده‌های آب و هوایی با تجزیه‌وتحلیل داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی برای پنج پلات فرسایش و کل حوزه آبخیز استخراج شدند. واسنجی مدل براساس پارامتر نفوذ و فرسایش‌پذیری از طریق نش- ساتکلیف، ضریب تبیین و هم‌چنین ضرایب ریشه میانگین مجذور خطا انجام شد.

یافته‌ها: برای واسنجی خروجی رواناب از پارامتر هدایت هیدرولیکی (تا حد ۵۰٪ اولیه) بهره‌گیری شد و کارایی مدل با استفاده از ضریب نش- ساتکلیف، ۰/٦٤ شد که رواناب

برآوردی هر پلات نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای است. برای مقدار رسوب نیز با استفاده از مقادیر پایه روابط مدل، مدل نتیجه مناسبی را به دنبال نداشته است و بهترین نتایج را با افزایش ۱۰۰ درصدی برای فرسایش‌پذیری شیاری و ۱۵۰ درصدی برای فرسایش بین‌شیاری و کاهش ۹ درصدی برای تنش برشی و ۱۲ درصدی برای هدایت هیدرولیکی به‌دست آورده است و کارایی مدل با استفاده از ضریب نش- ساتکلیف، ۰/۵۱ شد که مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهده‌ای پلات‌ها نزدیک است. هم‌چنین نتایج حاصل نشان داد در سال ۲۰۱۶ (۱۳۹۵) مقادیر رسوب در سطح دامنه به ترتیب برای شاهد و نمونه ۰/۲ و ۰/۱ ton/ha/yr و در حوزه آبخیز به ترتیب برای شاهد و نمونه ۱/۱ و ۰/۳ ton/ha/yr به دست آمد؛ بنابراین مدل وپ در منطقه مطالعاتی، زمانی کارایی مناسبی خواهد داشت که پارامترهای فرسایش‌پذیری و هدایت هیدرولیکی با دقت زیاد اندازه‌گیری شوند. از طرفی نتایج ژئووپ نیز، در حوزه شاهد و نمونه به ترتیب ۳/۳ و ۲/۵ ton/ha/yr به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: بر پایه مشاهدات میدانی و اشکال فرسایش، افزونه مکانی ژئووپ قادر است تا وضعیت مکانی فرسایش خاک را در قالب مدل فرایند محور نشان دهد. با توجه به این‌که این افزونه می‌تواند محدودیت اجرای مدل از نظر مساحت را برطرف کند، بنابراین برای برآورد توزیعی مکانی مقدار کمّی فرسایش خاک در قالب مدل فرایند محور (فیزیکی پایه) در مقیاس حوزه آبخیز می‌توان از زیر بخش ژئووپ بهره‌گیری کرد. علاوه بر این باتوجه به قابلیت‌هایی که مدل وپ در بازنمایی عملیات حفاظت آب‌وخاک و به‌ویژه معرفی سازه‌ها و بندهای اصلاحی آبخیزداری دارد، می‌توان با تلفیق این مدل و سامانه ژئووپ نسبت به شبیه‌سازی پیش از اجرای آن‌ها اقدام کرد و فعالیت‌های مناسب‌تر را از پیش شناسایی نمود.

استناد: نظری سامانی، علی‌اکبر، مریدزاده، میترا، فیض‌نیا، سادات، عیوضی، مرتضی (۱۴۰۱). ارزیابی توانایی مدل وپ در تلفیق با سامانه ژئووپ برای برآورد مکانی فرسایش خاک در حوزه‌های زوجی طالقان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۹ (۴)، ۷۳-۵۱.
DOI: 10.22069/jwsc.2023.20415.3574

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

خاک حاصلخیز مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور و پایه و اساس حیات بشر به‌شمار می‌آیند. خاک طی فرآیندهای پیچیده‌ای که تحت‌تأثیر پنج عامل اصلی اقلیم، توپوگرافی، سنگ مادر، پوشش گیاهی و زمان است تشکیل می‌شود. در صورت مساعد بودن چهار عامل اولی، زمان طولانی برای تشکیل خاک نیاز است. طبق نظر بنت[1] برای تولید ۲۵ میلی‌متر خاک سطحی ۳۰۰ سال زمان موردنیاز است تا این مقدار خاک در یک شرایط دست‌نخورده ایجاد شود (۱). اکنون میزان سالانه فرسایش خاک در جهان ۷۵ میلیارد تن است. برآوردهای مختلفی برای مقدار فرسایش آبی در ایران موجود است (۹۷٦ میلیون تن در سال) (۲). متأسفانه سالانه حجم زیادی از این خاک‌ها به‌صورت رسوب و طی عمل فرسایش از سطح حوزه‌های آبخیز شسته شده و از محل اصلی خود جابجا می‌شود (۳). از آن‌جایی‌که اکثر حوزه‌های آبخیز کشورها، ازجمله ایران، فاقد ایستگاه‌های رسوب‌سنجی می‌باشند، بنابراین از مدل‌ها و فناوری‌های نوین در چنین مناطقی برای برآورد فرسایش و رسوب استفاده می‌شود. مدل نمادی از واقعیت است که مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای واقعی را به صورتی ساده و کلی بیان می‌کند (۱). اصلی‌ترین دلیل مدل‌سازی محدودیت روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری است. در حقیقت تنها تعداد روش‌های اندازه‌گیری که در زمان و مکان‌های مختلف قابل‌اجرا باشد محدود است. بنابراین نیاز است که داده‌های موجود را برای هر دو مقیاس مکان و زمان برای شرایط بدون اطلاعات یا آمار و یا برای آینده برون‌یابی کنیم (٤). در مدل‌سازی فرسایش و رسوب آبی فرآیندهای اصلی شامل فرسایش بین‌شیاری (فرسایش سطحی یا ورقه‌ای)، فرسایش شیاری، فرسایش آبراهه‌ای، فرسایش خندقی و فرسایش کناره‌ای رودخانه است. در مدل‌سازی، باید مکانیسم فرسایش آبی شامل جدایش، حمل و ته‌نشست ذرات درنتیجه برخورد قطرات باران و جریان سطحی آب باشد. بعضی از مدل‌های فرسایش بر روی فرآیندهای فرسایش، بعضی بر فرآیند ظرفیت حمل و بعضی بر فرآیند رسوب‌گذاری تأکید دارند. پژوهش‌گران مختلف، طبقه‌بندی‌های متنوعی را برای مدل‌های فرسایش و رسوب ارائه کرده‌اند که می‌توان مدل‌های توصیفی و مفهومی، فیزیکی و ریاضی، پیوسته و ناپیوسته، ایستا و پویا، غیرمنطقی و قطعی و رخدادی و تناوبی را نام برد (۵). جامع‌ترین طبقه‌بندی برای مدل‌سازی و تقسیم‌بندی مدل‌ها توسط (٦) صورت گرفته است. ایشان مدل‌ها را به سه دسته تجربی، مفهومی و فرآیندمحور، دسته‌بندی کرده‌اند. یک از مهم‌ترین جنبه‌های موردتوجه برای اجرای مدل‌های فرسایش رسوب مسأله مقیاس مکانی و نوع فرایندهای مؤثر بر آن می‌باشد.

پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی که به‌اختصار مدل وپ[2] نامیده می‌شود جزء کامل‌ترین مدل‌های فیزیکی پایه و فرایند محور است که می‌توان در مقیاس‌های مختلف فرسایش آبی پیش‌بینی کرد و هم‌چنین نقش عملیات مختلف حفاظت خاک را بازنمایی نماید (۷). مدل وپ در سال ۱۹۸۵ توسط خدمات تحقیقات کشاورزی گروه کشاورزی ایالات‌متحده آمریکا[3] پایه‌گذاری شد و از نوع فرآیندمحور، توزیعی و پیوسته است که هدف آن برای حفاظت آب‌وخاک، برنامه‌ریزی و ارزیابی محیطی است. از مهارت‌های اصولی آن می‌توان به تولید داده‌های آماری هواشناسی، تئوری نفوذ، هیدرولوژی، فیزیک خاک، علوم گیاهی، هیدرولیک و مکانیسم‌های فرسایش اشاره کرد. این مدل، مقدار و مکان‌های جدایش ذرات خاک از سطح

1- Bennet

2- Watershed Erosion Prediction Project (WEPP)

3- United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA, ARS)

زمین، مقدار و مکان‌های رسوب‌گذاری ذرات خاک و درنهایت مکان‌های حمل رسوب بر روی دامنه را مشخص می‌کند که درنهایت با ترکیب دامنه‌های موجود روندیابی رواناب و رسوب انجام و شبیه‌سازی اتمام می‌یابد. مدل وپ شامل دو نسخه برای دامنه و حوزه آبخیز است. نسخه دامنه مدل وپ، پروفیل نماینده برای یک دامنه را در نظر می‌گیرد که در سال ۱۹۸۹ توسط نیرینگ و همکاران به وجود آمد. نسخه حوزه آبخیز مدل وپ به‌صورت یک افزونه برای مدل دامنه وپ ایجاد شده که برای تخمین رواناب و بار رسوبی حوزه آبخیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. مدل وپ تلفات خاک را در طول دامنه و بار رسوبی را در پایان دامنه محاسبه می‌کند. ولی محدودیت‌های موجود در قسمت حوزه آبخیز مدل موجب شد تا افزونه‌ای دیگری به نام ژئووپ[1] نیز ابداع شود که با استفاده از اطلاعات مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی برخی از محدودیت‌های اطلاعات لازم برای اجرای مدل وپ را برطرف کرده است (۸). افزونه ژئووپ یک رابطه مکانی برای نرم افزار وپ می‌باشد که از داده سیستم اطلاعات جغرافیایی[2] برای ترسیم مقادیر فرسایش در سطح حوزه آبخیز موردنظر استفاده می‌کند (۹). در عمل استفاده از این سامانه تحت شرایط خاصی امکان‌پذیر می‌باشد و بنابراین نیاز است تا عملکرد مدل در مقیاس‌های مختلف مورد توجه قرار گیرد.

برای ارزیابی کارایی مدل وپ پژوهش‌های نسبتاً زیادی در سطح دنیا انجام شده است. ویلکوکس و سیمون (۱۹۹٦) اولین بررسی‌های خود را مربوط به بررسی کارایی نسخه پایه مدل وپ در پیش‌بینی تولید رواناب و فرسایش خاک در پلات‌های ۱۰/٦۷ × ۳/۰۵ متر در یک جنگل نیمه‌خشک پینیون–عرعر در جنوب‌غربی ایالات‌متحده انجام دادند. نتایج بررسی نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین نوع مدیریت و دقت پیش‌بینی فرسایش مدل وپ برقرار است ولی بین مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده همبستگی ضعیفی وجود دارد (۱۰). پژوهشی دیگر، هان و همکاران (۲۰۱٦) از مدل وپ برای شبیه‌سازی فرسایش خاک در دو مقیاس دامنه و حوزه آبخیز لیادائوگو کشور چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده در مقیاس دامنه بسیار شبیه به مقادیر اندازه‌گیری‌شده بودند. بااین‌حال مقادیر رواناب و فرسایش خاک شبیه‌سازی‌شده در مقیاس حوزه بسیار بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده بودند نتایج نشان می‌دهد که مدل وپ می‌تواند به‌عنوان یک مدل مناسب برای بازسازی گیاه و پوشش گیاهی فلات لسی مورداستفاده قرار گیرد (۱۱). محمد (۲۰۲۰) در کشور سوریه به‌طور گسترده‌ای برای برآورد هدررفت خاک ناشی از فرسایش آب از مدل حوزه آبخیز وپ در منطقه ساحلی استفاده کرد نتایج نشان داد که فرسایش خاک مشاهده‌شده بین ۳۲ تا ۱٦۵ تن در هکتار در سال در اراضی کشاورزی و در اراضی جنگلی از ۳ تا ۸ تن در هکتار در سال متغیر است. نتایج مدل دامنه وپ برای منطقه موردمطالعه نیز بین ۳۲ تا ۱۵۲ تن در هکتار در سال در اراضی کشاورزی و ۱/٤ تا ۱۵ تن در هکتار در سال در اراضی جنگلی است. پژوهش صورت گرفته کارایی خوب عملکرد مدل را بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر برآورد شده برای اراضی کشاورزی و کارایی کم‌تری در اراضی جنگلی و جنگلی سوخته داشته است (۱۲). در ادامه، ماریانا و همکاران (۲۰۱٦) در حوزه‌های جنگلی مدل وپ را بر روی پنج عامل زمین‌شناسی و اقلیمی متنوع در حوزه دریاچه تاهو در ایالات‌متحده آمریکا انجام دادند. نتایج حساس بودن مدل را به عوامل مختلف زمین‌شناسی نشان داد (۱۳) و هم‌چنین سینگ و همکاران (۲۰۱۲) در حوزه تپه‌ای در شرق هیمالیا مدل وپ را ارزیابی کردند بعد از واسنجی پارامترهای

1- GeoWEPP
2- Geographic Information System(GIS)

مدل نتایج حاصل نشان داد که مدل نسبت به پارامترهای خاک یعنی فرسایش‌پذیری شیاری و بین‌شیاری، هدایت هیدرولیکی، تنش برشی بحرانی و ضریب زبری مانینگ با تغییرات سطح کاملاً حساسیت دارد (١٤) در این راستا افندی و همکاران (٢٠١٩) برای حفاظت از طرح حوزه‌های آبخیز اولویت‌بندی شده بمپون اندونزی، از اطلاعات رابطه مکانی پروژه پیش‌بینی فرسایش آب (افزونه ژئووپ) استفاده کردند. نتایج حاصل از مدل فرسایشی نشان داد که فرسایش در شیب‌های بیش از ٢٥ درصد و دارای زمین کشاورزی با محصول کشاورزی یک‌ساله و زمین‌های ترکیبی بیش‌تر و رسوب نیز در دشت‌های پیچان‌رودی با خلنگ‌زار و استفاده از زمین کشت برنج بیش‌تر است (١٥). بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که حساسیت زیاد این مدل در تخمین و ارائه داده‌های زبری، پوشش و ارقام فرسایش‌پذیری شیاری، بین‌شیاری، تنش برشی بحرانی و نفوذپذیری است. در داخل کشور هم مطالعاتی زیادی در زمینه برآورد هدررفت خاک با مدل‌های مختلف صورت گرفته است اسفندیاری درآباد و جسارتی (١٣٩٦) پژوهشی در برآورد رسوب‌دهی حوزه آبخیز آلادیزگه از مدل وپ استفاده کردند، نتایج نشان داد که مقادیر مقیاس دامنه به عدد مشاهده‌ای (٠/٦٦٥ تن در هکتار) نزدیک‌تر بوده و برای برآورد میزان فرسایش و رسوب در این حوزه مناسب است (١٦). هم‌چنین صادق‌زاده ریحان و یاراحمدی (١٣٩٢) مدل وپ را در اراضی مارنی ایستگاه خواجه تبریز، به‌کار گرفتند که نتایج به‌دست‌آمده با روش مسیر جریان به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر بوده است (١٧). گلکاریان (١٣٨٦) میزان فرسایش و رسوب را در حوزه آبخیز باراربه نیشابور با استفاده از سه روش موجود در مدل وپ، یعنی روش‌های دامنه، حوزه آبخیز و مسیرهای جریان برآورد و میزان رسوب به‌ترتیب ٨/٥٢، ٤/٠٨ و ١٤/٢٤ تن در هکتار در سال برآورد شده است درنتیجه دو روش دامنه و مسیر جریان به عدد مشاهده‌ای ١١/٢ نزدیک‌تر بوده و برای برآورد میزان فرسایش و رسوب در منطقه موردمطالعه پیشنهاد شده است (١٨). در ادامه، پژوهش (١٣٩٥) کارایی مدل‌های وپ و بهبودیافته پسیاک[1] با مقدار رسوب مشاهده‌ای در برآورد فرسایش خاک و میزان رسوب در حوزه گوجان چال نمد از زیرحوزه‌های زاینده‌رود در استان چهارمحال و بختیاری اجرا گردید. با داشتن مقدار رسوب مشاهده‌ای ٥/٢٧ تن در هکتار در سال، خروجی هر دو مدل نشان داد که مقدار رسوب برآورد شده توسط مدل‌های وپ و بهبودیافته پسیاک به‌ترتیب ٤/١٤ و ٩/١ تن در هکتار در سال است؛ و مدل WEPP با داشتن ٢١ درصد خطای نسبی در برآورد رسوب دارای خطای کم‌تر و مدل بهبودیافته پسیاک با ٧٢ درصد خطای نسبی در برآورد رسوب دارد نتایج نهایی نشان داد که مدل وپ کارایی بهتری نسبت به مدل بهبودیافته پسیاک در برآورد رسوب منطقه موردمطالعه دارد (١٩).

با توجه به موارد بررسی‌شده مشخص می‌گردد که در درجه اول در بیش‌تر مطالعات انجام شده در ایران بر پایه فایل کلیژن[2] اقدام شده است و بیش‌تر پژوهش‌گران این ورودی را براساس تناظریابی و یافتن ایستگاه مشابه در کشور امریکا برای منطقه موردنظر اجرا می‌کنند. این روش اجرا ازنظر آموزشی قابل توصیه است ولی برای دیگر موارد به‌هیچ‌عنوان صحیح نیست؛ بنابراین در پژوهش جاری در درجه اول سعی شد تا بر پایه پارامترهای موردنیاز تهیه فایل کلیژن و به‌ویژه پارامترهای زمان تا اوج رگبار، شدت بارش و احتمالات روز خشک و مرطوب ورودی

1- Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee (MPSIAC)

٢- کلیژن برنامه مستقلی است که فایل‌های ورودی اقلیمی را برای مدل WEPP تولید می‌کند و دارای پایگاه داده حدود ٧٠٠٠ ایستگاه درون آمریکا است.

مناسب و منطبق بر شرایط منطقه تهیه شود و درنهایت خروجی‌های دو نسخه دامنه و ژئووپ مورد ارزیابی قرار گیرند. هم‌چنین رهیافت ارائه‌شده برای چگونگی استفاده از پارامترهای بهینه‌شده نسخه دامنه برای استفاده در نسخه ژئووپ ارائه‌شده است. برای این منظور حوزه‌های آبخیز زوجی زیدشت واقع در حوزه آبخیز معرف طالقان در استان البرز موردبررسی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

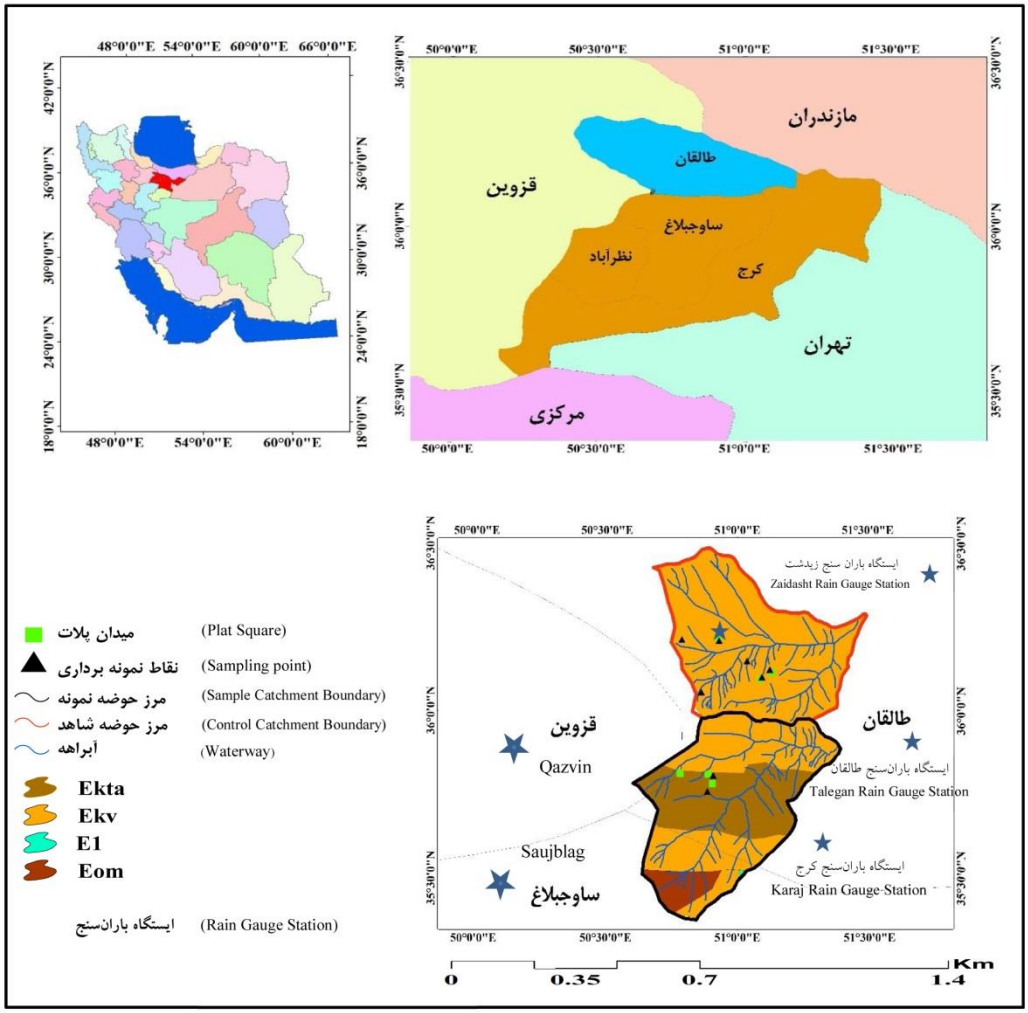
حوزه معرف زوجی در ۱۷ کیلومتری جنوب شهرستان طالقان در محدوده‌ای با مختصات طول جغرافیایی ۵۰ درجه، ۷ دقیقه و ۲٦ ثانیه تا ۵۰ درجه و ٤۱ دقیقه و ٥٤ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳٦ درجه، ٦ دقیقه و ۹ ثانیه تا ۳٦ درجه و ۷ دقیقه و ۱٤ ثانیه شمالی واقع‌شده است. این منطقه از شمال با سد طالقان و از جنوب با کوه کماچین و از غرب به حوزه زیاران و از شرق با رودخانه فلک آباد از حوزه زیدشت هم‌مرز است که حوزه شاهد با مساحت ۹۳/۵ هکتار و حوزه نمونه با مساحت ۱۰۵ هکتار می‌باشد. موقعیت حوزه‌های زوجی زیدشت در شکل ۱ نشان داده شده است. آب‌وهوای استان البرز معتدل و متوسط میزان بارندگی در آن حدود ۳٦۱ میلی‌متر در سال است و بارش در این منطقه بیش‌تر به‌صورت برف می‌باشد. بیش‌ترین مقدار بارندگی در این منطقه در اواخر زمستان و اوایل بهار است و حداقل بارندگی در مردادماه است. ماه‌های دی و مرداد به ترتیب سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال را در این استان تشکیل می‌دهد. مساحت واحد هیدرولوژیک منطقه موردمطالعه ۸۱۱/۲ هکتار است که از شمال به رودخانه طالقان، از غرب به سفید گوران، از شرق به فشندک و از جنوب توسط میان بیشه محصور شده است. ازنظر شیب، کم شیب‌ترین واحد در حوزه زیدشت محسوب می‌گردد. چنان‌چه بیش‌ترین سطح واحد در کلاس شیب ۱۰-۵ درصد به میزان ۲۰۸ هکتار قرار دارد و درواقع ٥٦۰ هکتار از واحد در شیب کم‌تر از ۲۰ درصد قرار گرفته است که در بحث فرسایش قابل‌توجه خواهد بود. بالاترین ارتفاع را قله‌ای در حد شمالی آن به میزان ۲٥۰۳ متر از سطح دریا شامل می‌گردد، کم‌ترین ارتفاع را تقاطع آبراهه اصلی با رودخانه طالقان دارد که ۱۷۲٥ متر از سطح دریا است (۲۲). خصوصیات فیزیکی حوزه معرف در جدول ۱ ارائه شده است. برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب و تعیین پارامترهای فرسایش‌پذیری در حوزه‌های زوجی زیدشت طالقان از مدل وپ با ورژن ۲۰۱۲ استفاده شده است. حوزه‌های زوجی متشکل از حوزه شاهد با مساحت ۹۳/۵ هکتار و حوزه نمونه با مساحت ۱۰۵ هکتار است که توسط گروه حوزه‌های معرف و زوجی دفتر طرح‌ریزی و هماهنگی معاونت آبخیزداری به‌منظور بررسی تأثیرات عملیات آبخیزداری در سطح حوزه آبخیز انتخاب شده‌اند. در این پژوهش کارایی مدل وپ را برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب و تعیین پارامتر فرسایش‌پذیری خاک در منطقه زیدشت طالقان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی حوزه معرف.

Table1. Physical characteristics of representative catchment.

زیرحوزه Sub catchment		مشخصه فیزیکی حوزه Physical characteristics of the catchment	نوع زیرحوزه‌های زوجی Type of paired sub catchment		مشخصه فیزیکی حوزه Physical characteristics of catchment
شاهد Control	نمونه Sample		شاهد Control	نمونه Sample	
22.65	22.97	شیب خالص (٪) Pure slope (%)	93.5	105	مساحت (ha) Area (ha)
19.7	16.4	شیب ناخالص (٪) Unpure slope (%)	4.3	4.4	محیط (km) Perimeter (km)
0.16	0.19	زمان تمرکز (ساعت) Concentration time (hr)	1.1	1.15	قطر دایره همسطح (km) Diameter of flat circle
1.29	1.7	ضریب شکل گراولیوس Compactness coefficient	2085	2228	حداقل ارتفاع حوزه (m) Minimum catchment height (m)
2299	2425	ارتفاع متوسط وزنی Average height weight	2474	2684	حداکثر ارتفاع حوزه (m) Maximum catchment height (m)
2311	2434	ارتفاع ۵۰ درصد Height 50%	389	456	اختلاف ارتفاع حوزه (m) Height difference of the catchment
40	50.87	شیب متوسط وزنی Average slope weight	2440	2630	حداکثر ارتفاع آبراهه (m) Maximum height of the waterway (m)
37	47.8	شیب میانه Middle slope	355	402	اختلاف ارتفاع آبراهه (m) Height difference of the waterway (m)
9.52	8.11	تراکم آبراهه Drainage density	1567	1750	طول بزرگ‌ترین آبراهه (m) Largest length flow path (m)
5.6	3	نسبت انشعاب Bifurcation ratio	8.9	8.52	طول کل آبراهه‌ها (km) Total length flow path (Km)

در منطقه موردمطالعه جنس غالب سنگ‌ها به ترتیب گدازه‌های بازی (Ekv) با ضریب حساسیت به فرسایش‌پذیری ۱۳ تشکیل‌شده که بخش اعظم حوزه را پوشش داده است، توف‌های اسیدی و روشن (Ekta) با ضریب حساسیت به فرسایش ۱۲، سنگ‌آهک و دولومیت (Eom) با ضریب حساسیت به فرسایش ۷ و در نهایت سازند ماسه‌سنگ ($l \in$) با ضریب حساسیت به فرسایش ۷/۵، بخش بسیار جزئی حوزه را تشکیل داده است (۲۰).

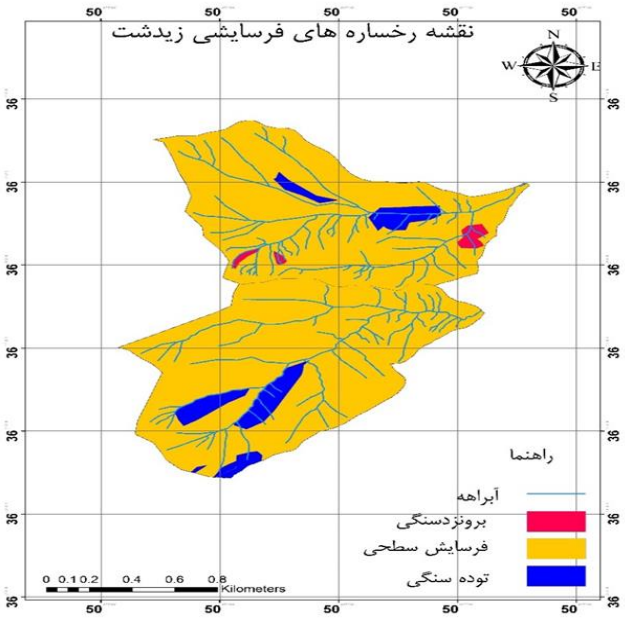


شکل ۱- موقعیت و بخش زمین‌شناسی حوزه‌های زوجی زیدشت.

Figure 1. Location and geological section of Zaidasht paired catchments.

محدوده موردمطالعه دارای چهار تیپ مرتعی است که به ترتیب تیپ اول در ارتفاعات ۲۳٦۰ تا ۲۰۷۰ متر با گونه‌های غالب اویشن، کلاه میرحسن، جارو، گون و آگروپایرون همراه است. تیپ دوم در ارتفاعات ۱۹۰۰ تا ۲۲۰۰ و گونه غالب آن از جنس گندمیان و گون بوده است. تیپ سوم با کم‌ترین سطح با ارتفاع رویشی ۱۷٤۰ تا ۱۸٤۰ متر را شامل می‌گردد و گونه‌های غالب آن شیرین‌بیان و گون علفی است و تیپ چهارم با بیش‌ترین سطح گونه‌های غالب را درمنه، آویشن، کلاه میرحسن و بومادران شامل می‌گردد (۲۱). در پژوهش حاضر از نتایج واحدهای نمونه‌گیری، برای اندازه‌گیری بار معلق حاصل از فرسایش پاشمانی، سطحی و شیاری سطح دامنه‌ها از پلات‌های رسوب (عرض استاندارد ۱/۸ متر و طول ۲٤ متر) استفاده شد. با توجه به این‌که حوزه زوجی طالقان دارای شش میدان پین و پلات رسوب می‌باشد و هم‌چنین موقعیت‌گیری آن در منطقه طالقان بالاتر از ارتفاع ۲۱۰۰ متر است، بنابراین بیش‌ترین مقدار بارش به‌صورت برف است و در طول دوره زمستان تقریباً فاقد رواناب است. هم‌چنین شرایط برداشت داده‌های میدانی در زمان اجرای پژوهش در طول سال‌های ۱۳۹٦-۱۳۹۷ است؛ بنابراین با توجه به وجود ۱۵

پلات در منطقه و هم‌چنین وجود داده‌های رواناب خارج‌شده از حوزه آبخیز، مدل مورداجرا و ارزیابی قرار گرفت. به‌طوری‌که برای هر پلات نسخه دامنه مدل اجراشده و سپس در قالب حوزه آبخیز مورداجرا قرار گرفت (شکل ۱). برای این منظور مدل وپ نیازمند تنظیم فایل‌ها و متغیرهای مختلفی است. با برداشت میدانی و آزمایشگاهی، متغیرهای مختلفی (بیش از ٤٠ متغیر) مانند عمق، اجزای بافت خاک، سنگریزه و پوشش گیاهی، کربن آلی، ظرفیت زراعی، جرم ریشه، ارتفاع گیاهان، هدایت هیدرولیکی، چگالی خاک، فرسایش‌پذیری شیاری و بین‌شیاری و دیگر متغیرهای اندازه‌گیری شدند؛ که با مشخص کردن مرز حوزه مطالعاتی سپس حوزه‌های نمونه و شاهد با کمک نرم‌افزارهای گوگل ارث[1] و سیستم اطلاعات جغرافیایی به ۸۸ دامنه تقسیم شدند تا در عملیات میدانی، به‌خوبی هر کدام از دامنه‌ها و خصوصیات آن‌ها قابل‌شناسایی باشند. با توجه به شکل ۲ ازلحاظ زمین‌شناسی جنس دامنه‌های حوزه شاهد گدازه‌بازی و حوزه نمونه ترکیبی از گدازه‌بازی، توف اسیدی، آهک و دارای بخش جزئی ماسه‌سنگ است. شکل فرسایشی دو حوزه بیش‌تر فرسایش سطحی بوده و در برخی دامنه‌ها دارای شکل توده سنگی و برون‌زد سنگی نیز می‌باشند.



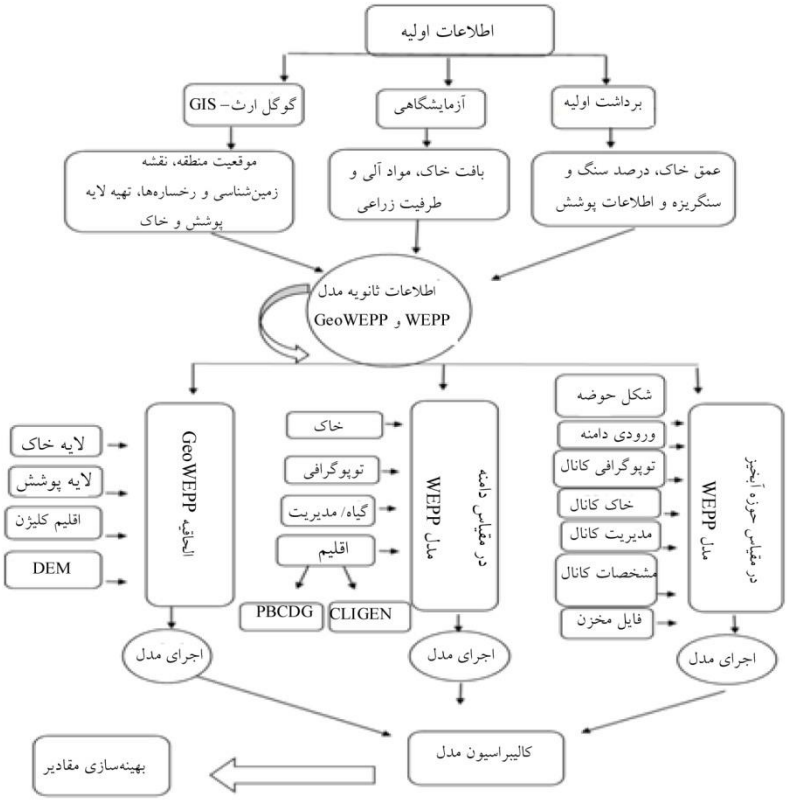
شکل ۲- نقشه رخساره‌های فرسایشی حوزه زوجی زیدشت.

Figure 2. Erosion facies map of paired Zaidasht catchment.

1- Google earth

مدل دامنه وپ برای اجرا به چهار فایل داده ورودی نیاز دارد: ۱) فایل اقلیم، ۲) فایل شیب، ۳) فایل خاک، ٤) فایل گیاه/مدیریت. علاوه‌بر فایل‌های مورد نیاز یرای اجرای مدل وپ در هر دامنه، شبیه‌سازی حوزه به حداقل هفت فایل نیاز دارد: ۱) Pass file اطلاعات دامنه، ۲) فایل ساختار حوزه آبخیز، ۳) فایل شیب، ٤) فایل خاک، ۵) فایل مدیریت، ٦) فایل اقلیم و ۷) فایل کانال. Pass file به‌طور خودکار با اجرای مدل وپ، ایجاد می‌شود. فایل ساختار نیز به‌طور خودکار توسط رابط ایجاد می‌شود، در صورتی‌که مخزن در حوزه آبخیز وجود داشته باشد به فایل ورودی مخزن و اگر در حوزه آبیاری صورت می‌گیرد، یک فایل آبیاری نیز مورد نیاز است که همانند فایل آبیاری دامنه (۲۲) در شکل ۳ روند کار پژوهش مورد مطالعه بیان شده است. در میان زیر مدل‌های وپ، اقلیم به دلیل نقش ویژه آن در فرسایش، اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل وپ برای پذیرش دو نوع متفاوت از فایل‌های اقلیمی طراحی شده است. فرمت کلیژن[1] استاندارد و داده نقطه منفصل. برای تهیه فاکتورهای مورد نیاز برنامه داده نقطه منفصل و کلیژن، داده‌های ساعتی، روزانه و ماهانه ایستگاه‌های باران‌نگار و باران‌سنج منطقه در ایستگاه تحقیقاتی زیدشت تهیه گردید به خاطر این‌که تمام پارامترهای مورد نیاز برای اجرای BPCDG در ایستگاه ذکر شده وجود نداشته نواقص آماری آن با استفاده از ایستگاه‌های سینوپتیک طالقان و کرج کامل و رفع گردید موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تهیه فایل‌های ورودی توپوگرافی دامنه‌های موردنظر از ویرایشگر توپوگرافی مدل وپ استفاده شده است. پارامترهای موردنیاز برای ساخت فایل‌های توپوگرافی شامل شیب، طول دامنه (پلات)، عرض دامنه (پلات) و جهت جغرافیایی است. منطقه مطالعاتی دارای ٦ محدوده پلات می‌باشد (در هر محدوده ۳ پلات) که با توجه به برداشت‌های میدانی از پنج پلات، پنج فایل توپوگرافی برای منطقه مطالعاتی ایجاد شده است که در جدول ۵ آورده شده است. اطلاعات مربوط به مشخصات خاک تا عمق حداکثر ۱/۸ متر از طریق فایل ورودی خاک، به مدل معرفی می‌شوند. کاربر می‌تواند اطلاعات حداکثر هشت لایه مختلف خاک را به مدل معرفی کند. پارامترهای خاک را می‌توان به دو گروه پارامترهای هیدرولوژیکی و فرسایش تقسیم کرد. فایل ورودی گیاه/مدیریت حاوی همه اطلاعات مورد نیاز مدل وپ مرتبط با پارامترهای پوشش گیاهی (جوامع گیاهی مرتع و گیاهان یکساله و دائمی کشتزار)، توالی شخم و پارامترهای وسایل شخم، مدیریت گیاه و بقایای گیاهی، شرایط اولیه، خطوط تراز، زهکشی زیرسطحی و تناوب محصول می‌باشد.

1- CLImate GENerator (CELIGEN)



شکل ۳- روند کلی پژوهش.

Figure 3. The general process of the research.

مدل ژئووپ (GEOWEPP) یک پروژه ترکیبی است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی، دانشگاه پوردو و آزمایشگاه ملی تحقیقات فرسایش خاک (USDA) توسعه داده شده است. این مدل ترکیب مدل WEPP، توپوگرافی، کاربری اراضی و مشخصات خاک در سامانه اطلاعات جغرافیایی برای پیش‌بینی فرسایش خاک در مقیاس حوزه آبخیز است. ژئووپ بخشی از محدودیت‌های مدل WEPP را که شامل حجم زیاد داده‌ها و ورود دستی داده‌ها است برطرف کرده است. درواقع ژئووپ رابطه مکانی برای نرم‌افزار WEPP می‌باشد که از داده GIS برای ترسیم حوزه آبخیز مورداستفاده در WEPP استفاده می‌کند؛ بنابراین زیر مدل ژئووپ به عنوان یک تسهیل‌گر مکانی است برای ایجاد ارتباط بین اجزای مدل وپ (نسخه‌های دامنه و حوزه آبخیز) و ساختار سلولی که مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع است. در این زمینه برای برآورد فرسایش شیاری و بین‌شیاری و تولید رسوب در انتهای یک دامنه، از روابط مختلف استفاده می‌شود و سپس بر پایه معادله‌های پیوستگی آب ورسوب روندیابی انتقال رسوب در مسیر جریان آب انجام می‌گردد. برای تخمین مقدار رواناب و دبی جریان از مدل مفهومی ترکیب جریان سطحی وسیع و کم‌عمق در محدوده بین شیارها و جریان متمرکز در داخل شیارها بهره‌گیری می‌شود و از شرایط جریان سطحی گسترده در سطح برای تخمین رواناب و برآرد هیدروگراف رواناب سطحی بهره‌گیری می‌شود. در این حالت برای روند یابی جریان سطحی از دو روش حل نیمه تحلیلی مدل موج سینماتیک تقریب آن برای دو حالت شبیه‌سازی رواناب رگبار به رگبار و شبیه‌سازی پیوسته استفاده می‌نماید (۱). روابط محاسبه رواناب و رسوب در مدل وپ به شرح زیر می‌باشد (رابطه ۱ تا ٦):

معادله موج سینماتیک در یک سطح (معادل رابطه پیوستگی)

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=v \qquad (۱)$$

رابطه دبی عمق

$$q=\alpha\, h^{m} \qquad (۲)$$

دو رابطه بالا با روش روش منحنی مشخصه برای معادلات دیفرانسیل به مشتقات جزئی حل عددی میشوند. به‌طوری‌که به شرح زیر ساده می‌گردند:

با انتگرال‌گیری از دو منحنی مشخصه (۳) مقدار عمق جریان و فاصله متناظر آن برآورد خواهد شد و با استفاده از رابطه ۲ مقدار دبی جریان برآورد خواهد شد.

$$\frac{dh}{dt}=v(t) \qquad \text{و} \qquad \frac{dx}{dt}=\alpha\, m\, h(t)^{m-1} \qquad (۳)$$

معادله پیوستگی رسوب که در آن، Df برابر با نرخ فرسایش شیاری و Di برابر با نرخ فرسایش بین شیاری است.

$$\frac{dG}{dx}=D_f+D_i \qquad (٤)$$

هر دو مقدار متغیرهای فرسایش شیاری و بین شیاری بر پایه روابط (۵ و ٦) برآورد می‌شوند

$$D_f=D_c\,(1-\frac{G}{T_c}) \qquad (۵)$$

$$D_i=K_{iadj}\, I_e\, \sigma_{ir}\, SDR_{RR}\, F_{nozzle}\left[\frac{R_s}{w}\right] \qquad (٦)$$

در روابط بالا، D_c برابر با ظرفیت کنش فرسایش شیاری ($Kg\ S^{-1}m^{-2}$)، Tc ظرفیت حمل ($Kg\ S^{-1}m^{-1}$)، Ie شدت بارش موثر، Fnozzle فاکتور اصلاحی برای در نظر گرفتن انرژی وارد شده در اثر آبیاری بارانی (در شرایط طبیعی برابر با یک)، SDR_{RR} نسبت تحویل رسوب که تابعی از زبری سطحی، شیب جانبی زمین و اندازه ذرات خاک، Rs معادل فاصله بین شیارها و W معادل عرض شیار به متر می‌باشد، K_{iadj} و σir به‌ترتیب معدل فرسایش‌پذیری بین‌شیاری و شدت رواناب بین شیاری است (۱).

برای اجرای مدل ژئووپ در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات مکانی به چهار لایه نقشه نیاز است. ۱) نقشه کاربری اراضی ۲) نقشه رقومی ارتفاعی ۳) نقشه بافت خاک ٤) لایه اقلیم کلیژن. این نقشه‌ها با دستورالعمل‌های خاص افزونه ژئووپ در محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود که چندین نوع گزارش خروجی می‌دهد. ازجمله گزارش‌های پرکاربرد آن‌ها گزارش فرسایش و رسوب برون‌حوزه‌ای و درون‌حوزه‌ای می‌باشد. گزارش برون‌حوزه‌ای نتایج شبیه‌سازی‌شده در نقطه خروجی را ارائه می‌دهد. این مقادیر براساس سهم دامنه‌ها و کانال‌ها حاصل می‌شوند. این گزارش بر روی بار رسوبی تحویل داده‌شده از دامنه‌ها یا حوزه‌های آبخیز کوچک به کانال‌ها به سمت نقطه خروجی، متمرکز شده است. تلفات خاک و رسوب‌گذاری روی خود دامنه‌ها در گزارش درون‌حوزه‌ای نیز وجود دارد. گزارش درون‌حوزه‌ای نتایج شبیه‌سازی‌شده در حوزه آبخیز را ارائه می‌دهد. این گزارش بر تلفات خاک رخ‌داده در هر یک از دامنه‌های حوزه آبخیز متمرکز می‌شود. می‌توان ادعا کرد که گزارش برون‌حوزه‌ای مدل ژئووپ با گزارش مدل وپ براساس حوزه آبخیز و گزارش درون‌حوزه‌ای مدل ژئووپ با گزارش مدل وپ براساس دامنه تطابق دارد و می‌توان آن‌ها را باهم و با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه کرد در ادامه برای بررسی و ارزیابی کارایی مدل‌ها روش‌های آماری مختلفی وجود دارد که در پژوهش حاضر از سه روش ضریب تعیین[1]، ریشه دوم میانگین مربعات خطا[2] و ضریب نش- ساتکلیف[3] به‌کار برده شد.

1- Coefficient of Determination
2- Root-mean-square deviation (RMSD) or Root-mean-square error (RMSE)
3- Nash-Sutcliffe coefficient

نتایج و بحث

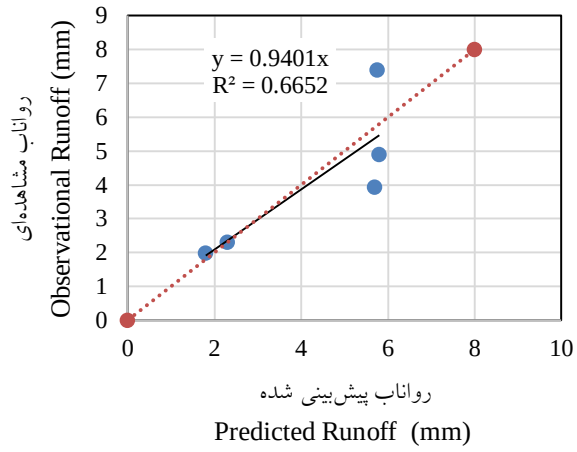
بعد از تکمیل چهار فایل ورودی موردنیاز، مدل دامنه وپ برای پلات‌های موردنظر برای سال ۱۳۹۵ (۲۰۱٦) اجرا گردید و نتایج رواناب و رسوب حاصله از اجرای مدل در مقیاس دامنه در جدول‌های ۲ و ۳ در پلات‌های مختلف ارائه‌شده است که همبستگی بین آن‌ها نیز در شکل‌های ٤ و ٥ نشان داده‌شده است.

مطابق شکل‌های ٤ و ٥، مقادیر رواناب و بار رسوبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده همبستگی خوبی را نشان می‌دهند. در این نمودارها، خط ۱:۱ برای بررسی صحت نتایج رسم شده است؛ که با توجه به پراکندگی داده‌ها در نزدیکی خط ۱:۱، بالا بودن ضریب کارایی مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج برآورد مقادیر رواناب (mm) برای سال ۱۳۹۵.

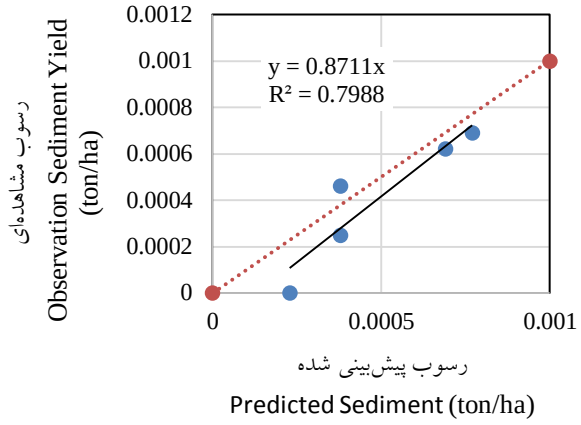
Table 2. Results of estimating runoff values (mm) for the year 2015.

پلات Plot	پلات اول شاهد First plot Control	پلات دوم شاهد Second plot Control	پلات سوم شاهد Third plot Control	پلات اول نمونه First plot Sample	پلات دوم نمونه Second plot Sample
پیش‌بینی Prediction	5.87	5.64	5.64	2.33	1.81
مشاهده‌ای Observation	4.8	3.9	7.3	2.2	1.9
میانگین رواناب پیش‌بینی‌شده در سه پلات Average predicted runoff in three plots	5.7			1.07	
میانگین رواناب مشاهده‌ای در سه پلات Average observation runoff in three plots	5.3			2.05	



شکل ٤- همبستگی بین مقادیر رواناب مشاهده‌ای و برآوردی.

Figure 4. Correlation between observed and estimated runoff values.



شکل ۵- همبستگی بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و برآوردی.

Figure 5. Correlation between observed and estimated sediment yield values.

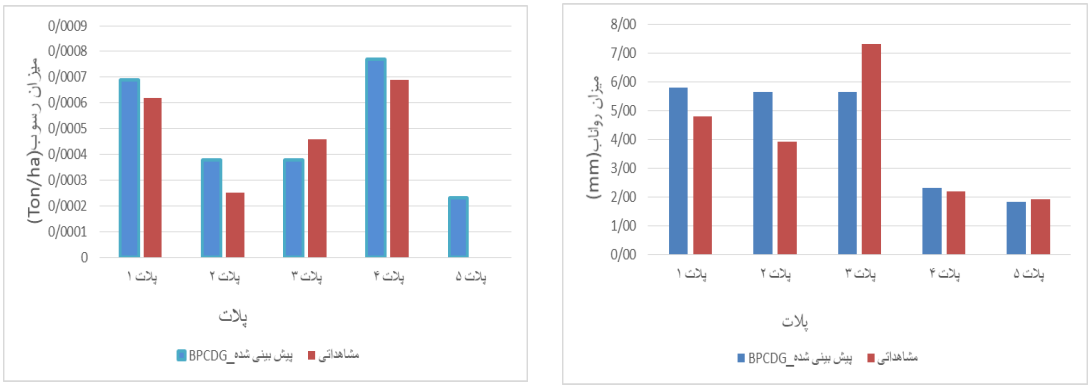
جدول ۳- مقادیر رسوب (kg/ha/yr).

Table 3. Sediment yield values (kg/ha/yer).

پلات دوم نمونه Second plot Sample	پلات دوم نمونه First plot Sample	پلات سوم شاهد Third plot Control	پلات دوم شاهد Second plot Control	پلات اول شاهد First plot Control	مقادیر پلات Plot values
0.23	0.77	0.38	0.38	0.69	پیش‌بینی Prediction
0	0.69	0.46	0.25	0.62	مشاهده‌ای Observation
0.5			0.48		میانگین رسوب پیش‌بینی‌شده در سه پلات Average predicted sediment yield in three plots
0.34			0.44		میانگین رسوب مشاهده‌ای در سه پلات Average observation sediment in three plots

مقادیر به‌دست‌آمده از RMSE در رواناب برای نمونه و شاهد به ترتیب ۰/۰۷ و ۱/۱۷ میلی‌متر، هم‌چنین در رسوب برای نمونه و شاهد به ترتیب ۰/۰۰۰٦ و ۰/۰۰٤تن بر هکتار در سال به‌دست آمد. مقادیر بسیار پایین نشان‌دهنده این است که مدل خطای کمی داشته است و مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای مطابق هم هستند. مقادیر R^2 برای رواناب و رسوب به ترتیب ۰/٦٦ و ۰/۷۹ به دست آمده است که نشان می‌دهد بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی همبستگی بالایی وجود دارد. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل با استفاده از معیارهای نش‌ساتکلیف، RMSE و R^2 در جدول ٤ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در هر میدان پلات سه پلات مجزا وجود دارد و بنابراین در عمل مقدار خروجی مدل در هر سه

پلات میانگین‌گیری شد و برای مورداستفاده استفاده قرار گرفت. با توجه به این‌که داده‌های رواناب و رسوب سال موردنظر بسیار کم است، برای مقایسه فایل BPCDG با فایل حاصل از مولد اقلیمی کلیژن، از مقادیر رواناب و رسوب سالانه اندازه‌گیری شده در سطح پلات‌ها (به‌عنوان دامنه) و خروجی حوزه آبخیز (برای اجرای نسخه حوزه آبخیز) استفاده شده است. نتایج مقادیر رسوب برآوردی برای هر دو فایل اقلیم به‌صورت سالانه در جدول ٤ ارائه شده است. رسوب تولیدی با فایل اقلیم کلیژن نسبت به فایل BPCDG بیش‌تر برآورد شده است. کلیژن مقدار رسوب در حوزه نمونه را بیش‌تر از حوزه شاهد برآورد کرده ولی BPCDG مقدار رسوب در حوزه شاهد را بیش‌تر از حوزه نمونه برآورد کرده است. در شکل ٦ نتایج مقادیر رواناب (mm) و رسوب (ton/ha/yr) حاصل از اجرای ژئووپ در پلات‌های مختلف ارائه شده است.



شکل ٦- مقادیر رواناب (راست) و رسوب (چپ) مشاهده‌ای و برآوردی در پلات‌های مختلف (To/ha/yr).

Figure 6. Performance of runoff (right) and sediment (left) observed and evaluated in different plots (To/ha/yr).

جدول ٤- مقادیر رسوب سالانه برآوردی و مشاهداتی در مقیاس دامنه و حوزه آبخیز مدل (ton/ha/yr).

Table 4. Estimated and observed annual sediment in the submontane and watershed scale of the mode.

CLIGEN		BPCDG		نوع فایل اقلیمی Climate file type
1.003	دامنه شاهد	0.2	دامنه شاهد	میزان رسوب سالانه در مقیاس دامنه Annual sedimentation rate at submontane scale
1.5	دامنه نمونه	0.1	دامنه نمونه	
1.6	حوزه شاهد	1.1	حوزه شاهد	میزان رسوب سالانه در مقیاس حوزه Annual sedimentation rate at watershed scale
2.1	حوزه نمونه	0.3	حوزه نمونه	
میزان رسوب مشاهده‌ای سالانه The amount of observed annual sedimentation				
0.16				حوزه شاهد Control catchment
0.04				حوزه نمونه Sample catchment

نسخه ژئووپ براساس فایل اقلیم کلیژن عمل می‌کند و مقدار فرسایش را به‌صورت بلندمدت ارائه می‌دهد. نتایج ژئووپ برای دوره ١٤ ساله در جدول ٦ نشان می‌دهد که ژئووپ مقادیر رواناب و رسوب خروجی از حوزه را با توجه به مقادیر مشاهداتی یا تولیدشده در دامنه و حوزه آبخیز مدل وپ، با دقت مناسبی برآورد کرده است. به عبارتی می‌توان گفت، نتیجه قابل‌قبولی را ایجاد کرده است. شکل‌های ٦ و ٧ که نمایانگر فرسایش در سطح حوزه و رسوب خروجی حوزه است، این موضوع را به‌خوبی بیان می‌کند. با توجه به نتایج رسوب خروجی از حوزه آبخیز، حاصل از اجرای ژئووپ در شکل ٧، اکثر منطقه موردمطالعه در طبقه تولید رسوب از صفر تا ۲۵۰ کیلوگرم قرار گرفته است و تولید رسوب بیش‌تر از ٤ تن در شمال آبخیز پراکنش زیاد دارد. بر همین اساس هم طبق نتایج فرسایش در سطح حوزه آبخیز، حاصل از اجرای ژئووپ اکثر منطقه موردمطالعه در دو طبقه صفر تا ۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار در سال و ۳ تا ٤ تن بر هکتار در سال قرار گرفته است (شکل ٨).

برای مطابقت نقشه رخساره‌های فرسایش حوزه آبخیز شکل ۲ با نقشه رسوب خروجی و فرسایش در سطح حوزه آبخیز حاصل از اجرای ژئووپ شکل‌های ۷ و ۸ در جاهایی که رخساره توده سنگی در حوزه آبخیز موردمطالعه داشته است، حداکثر میزان رسوب خروجی در قسمت‌های شمالی به میزان صفر تا ۲۵۰ کیلوگرم در سال است ولی در دامنه‌های جنوبی این مقدار از ۵۰۰ کیلوگرم تا ٤ تن در سال افزایش یافته است هم‌چنین در قسمت شمالی در بخش‌هایی که توده سنگی داشته است میزان فرسایش در دامنه صفر تا یک تن در سال در هکتار پراکنش یافته است ولی در دامنه جنوبی این مقدار از ۲۵۰ کیلوگرم تا ۳ تن در هکتار در سال افزایش یافته است.

با توجه به خصوصیات خاک حوزه زوجی که در جدول ۵ قابل‌ملاحظه است به‌طور میانگین بخش توده سنگی حدود ۰/۳ تن در هکتار در سال کم‌ترین رسوب را ایجاد می‌کند و لوم رسی شنی با ۳/۱ تن در هکتار در سال که مربوط به فرسایش شیاری و بین‌شیاری می‌شود بیش‌ترین رسوب تولیدی را دارد لازم به ذکر است که این بافت با توجه به شکل ۱ در بخش جنوبی حوزه نمونه واقع است دقیقاً مربوط به سازند سنگ‌آهک و دولومیت (Eom) است و بافت‌های شنی لومی و لومی شنی مربوط به فرسایش سطحی می‌شوند و مقدار رسوب قابل‌توجهی هم تولید می‌کنند و با توجه به این‌که قسمت اعظم حوزه آبخیز با فرسایش سطحی مواجه است (شکل ۲) بنابراین فرسایش سطحی سهم بیش‌تری نسبت به سایر رخساره‌های فرسایشی برای ایجاد فرسایش و تولید رسوب داشته است.

درنهایت بعد از بهینه کردن مقدار پایه هدایت هیدرولیکی تا حدود ۵۰ درصد برای رواناب، کارایی مدل با استفاده از ضریب نش- ساتکلیف، ٠/٦٤ شد که رواناب برآوردی هر پلات نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای است. برای مقدار رسوب نیز با استفاده از مقادیر پایه روابط مدل، مدل نتیجه مناسبی را به دنبال نداشته است و بهترین نتایج را با افزایش ۱۰۰ درصد برای فرسایش‌پذیری شیاری و ۱۵۰ درصد برای فرسایش بین‌شیاری و کاهش ۹ درصد برای تنش برشی و ۱۲ درصد برای هدایت هیدرولیکی به دست آورده است و کارایی مدل برای با استفاده از ضریب نش- ساتکلیف، ۰/۵۱ درصد شد و موردقبول است (۲۳) که مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهده‌ای پلات‌ها نزدیک است.

جدول ۵- مقادیر رسوب ایجادشده در بافت‌های مختلف حوزه (**Ton/ha/yr**).

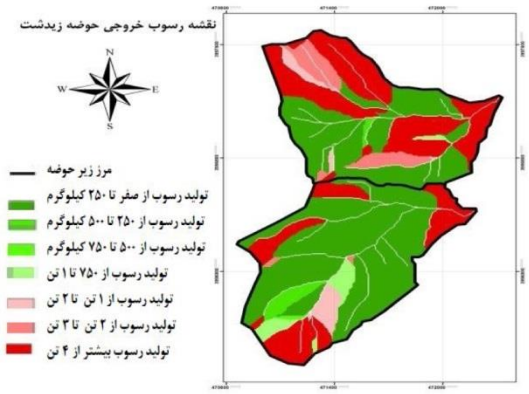
Table 5. Amounts of sediment yield created in different soil textures of the catchment.

لومی شنی Sandy loam	لوم رسی شنی Sandy clay loam	شنی لومی loamy sand	برون‌زد سنگی stone outcrop	توده سنگی rock mass
0.70	3.1	1.1	0.6	0.3

جدول ٦- نتایج مقادیر رواناب (**mm**) و رسوب (**ton/ha/yr**) حاصل از اجرای ژئووپ در مقیاس حوزه آبخیز.

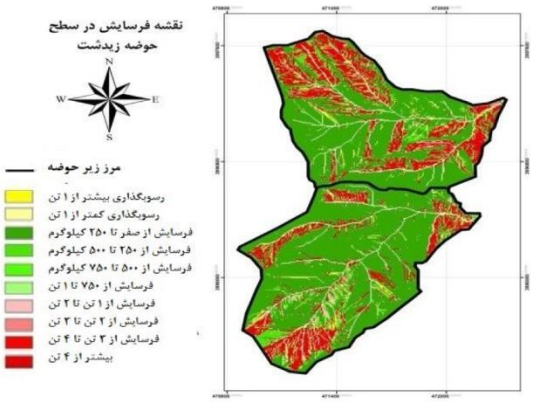
Table 6. Results of runoff (mm) and sediment (ton/ha/yr) obtained by implementation of GeoWEEP in the watershed scale.

رواناب خروجی Outlet runoff (m^3/year)	فرسایش درجا سطح حوزه In situ erosion of the catchment surface (ton/ha/year)	رسوب خروجی حوزه Catchment outlet sediment (ton/year)	رسوب و رواناب حوزه Sediment and runoff catchment
22328	3.3	285.18	شاهد
26133	2.5	244	نمونه



شکل ۷- نقشه رسوب خروجی از حوزه آبخیز، حاصل از اجرای ژئووپ (اقلیم کلیژن با دوره ١٤ ساله).

Figure 7. Sediment output map from the catchment, as a result of the implementation of GeoWEEP (CELIGEN climate with a period of 14 years).



شکل ۸- نقشه فرسایش در سطح حوزه آبخیز، حاصل از اجرای ژئووپ (اقلیم کلیژن با دوره ١٤ ساله).

Figure 8. Erosion map at the catchment, resulting from the implementation of GeoWEEP (CELIGEN climate with a period of 14 years).

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به بررسی کارایی مدل وپ برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب و تعیین پارامتر فرسایش‌پذیری خاک در حوزه‌های زوجی (متشکل از حوزه شاهد با مساحت ۹۳/۵ هکتار و حوزه نمونه با مساحت ۱۰۵ هکتار) زیدشت طالقان از مدل وپ با نسخه ۲۰۱۲ استفاده شد. در این مطالعه برای مقایسه اقلیم کلیژن با BPCDG، از رواناب و رسوب سالانه در دامنه و حوزه آبخیز استفاده شده است. مقدار رسوب سالانه حاصل از مدل در دامنه و حوزه آبخیز مدل با اقلیم BPCDG، با مقدار رسوب سالانه در دامنه و حوزه آبخیز با اقلیم مولد کلیژن تفاوت دارد، به عبارتی رسوب تولیدی با اقلیم کلیژن نسبت به اقلیم BPCDG بیش‌تر برآورد شده است؛ و مقادیر رسوب مشاهده‌ای در دو حوزه شاهد و نمونه به‌ترتیب ۰/۱٦ و ۰/۰٤ تن در هکتار در سال است؛ بنابراین مقادیر برآورده شده با اقلیم BPCDG به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر است. علت این تفاوت را می‌توان این‌گونه بیان کرد که اقلیم BPCDG، درواقع اقلیم واقعی منطقه است که به‌صورت واقعی عمل می‌کند و میزان رواناب و رسوب را برای یک سال برآورد می‌کند ولی اقلیم کلیژن داده شبیه‌سازی‌شده است که براساس مشخصات میانگین سالانه استفاده می‌شود و برای حوزه‌هایی که آمار طولانی‌مدت لازم باشد استفاده می‌شود هم‌چنین کلیژن مقدار رسوب در حوزه نمونه را بیش‌تر از حوزه شاهد برآورد کرده ولی BPCDG مقدار رسوب در حوزه شاهد را بیش‌تر از حوزه نمونه برآورد کرده است که علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که چون حوزه شاهد آزاد بوده و تحت چرای دام است ولی حوزه نمونه قرق بوده است و افزایش تراکم پوشش گیاهی در پهنه‌های تحت قرق موجب افزایش حفاظ روی خاک و درنتیجه تثبیت و پایداری آن و کاهش هدررفت خاک و تولید رسوب می‌گردد. در ادامه با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل وپ، ضریب نش–ساتکلیف برای رواناب ۰/٦٤ و برای رسوب ۰/۵۱ به دست آمد. با استفاده از پارامترهای واسنجی‌شده و با اقلیم ذکرشده، در حوزه مدل نیز نتایج مشابهی هم‌چون دامنه مدل ایجاد گردید. داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده تقریباً نزدیک به هم شدند که معیارهای آماری R^2 و RMSE، صحت آن را تأیید کرده است. در این پژوهش مدل وپ با فایل اقلیمی BPCDG بعد از کالیبره کردن پارامترهای مدل، بهتر از کلیژن عمل کرده است. ولی کلیژن با داده‌های اولیه روابط مدل عملکرد بهتری داشته است که نقش فرآیندهای اقلیمی، هم‌چون بارش کل، دمای بیشینه و دمای کمینه، تابش خورشیدی، حداکثر شدت اوج بارش و زمان تا اوج هم‌چنین هدایت هیدرولیکی در آن بی‌تأثیر نیست. لازم به ذکر است که مدل وپ برای برآورد مقدار فرسایش خاک و رشد گیاهان از داده‌های اقلیمی استفاده می‌کند و با توجه به این‌که در ایجاد فایل کلیژن بر اساس طول داده‌های اقلیمی موجود داده‌های بلندمدت تولید می‌شود، بنابراین فایل کلیژن مقدار فرسایش را برای دوره بلندمدت برآورد می‌نماید. این مسأله موجب می‌شود که نتایج حاصل از آن در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت یک‌ساله هم‌خوانی کم‌تری با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشد. بررسی مقدار فرسایش برآوردشده در جنس سنگ‌های مختلف و شرایط دامنه با بافت خاک مختلف نشان داد که در دامنه‌های با جنس سنگ مقاوم‌تر مقدار فرسایش کم‌تر برآورد شده است؛ بنابراین می‌توان با تلفیق مدل‌سازی وپ و ژئووپ توزیع مکانی فرسایش را به بر پایه مدل فرانید محور و به‌صورت نقشه رستری تهیه نمود.

مدل فرایند محور وپ برای برآورد فرسایش خاک می‌تواند از دو قالب داده‌های اقلیمی مبتنی بر مولد کلیژن و BPCDG بهره‌گیری کند. با توجه به نتایج این پژوهش، علی‌رغم این‌که این مدل برآوردهای حاصل از دو نوع فایل اقلیمی را تا حدودی نزدیک به

هم ارائه داده است؛ ولی درصورتی‌که داده‌های اندازه‌گیری شده از منطقه کامل باشد، بهتر است که از داده‌های واقعی استفاده شود. در این حالت توصیه‌شده است از آمارهایی استفاده شود که دارای تعداد رگبارهای زیاد و با شدت‌های متفاوت باشد تا مدل شرایط تغییرپذیری موجود در منطقه را بهتر نمایش دهد. درواقع چون هدف اولیه از ساخت و توسعه مدل وپ ارزیابی پروژه‌های حفاظت خاک بوده است، بنابراین توسعه‌دهندگان این مدل بیش‌تر به دنبال بازنمایی شرایط مربوط به پروژه‌های حفاظت خاک و آب بوده‌اند؛ بنابراین در این زمینه بیش‌تر بر پایه استفاده از داده‌های مبتنی بر مولد اقلیمی کلیژن تمرکز داشته است.

هم‌چنین اندازه‌گیری مقادیر رواناب و رسوب در هر سه مقیاس دامنه، حوزه آبخیز و ژئووپ، بستگی به خاک منطقه موردمطالعه دارد که پارامترهای فرسایش‌پذیری آن هم‌چون فرسایش‌پذیری شیاری، فرسایش‌پذیری بین‌شیاری، تنش‌برشی و هدایت هیدرولیکی نقش اثرگذارتری را نسبت به دیگر عوامل خاک دارند و باید با دقت بالایی در منطقه موردمطالعه برداشت شود گرچه عامل پوشش را نیز نباید دست کم گرفت. هم‌چنین اقلیم مورداستفاده در مدل با فرمت **داده** نقطه منفصل برای منطقه‌ای که اولین بار مطالعات اجرایی صورت می‌گیرد چون اقلیم خود منطقه است نتایج قابل‌قبول‌تری را نسبت به اقلیم‌های بلندمدت ازجمله کلیژن ایجاد می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و به‌ویژه معاونت آبخیزداری و آقای دکتر مجید کاظم‌زاده بابت همکاری‌های انجام داده در زمینه برداشت‌های میدانی تشکر و قدردانی بنمایند. هم‌چنین از همکاری‌های سرکار خانم دکتر شهربانو عباسی در زمینه رفع خطاهای مرتبط به اجرای مدل تشکر و قدردانی می‌شود. در پایان از داوران محترم مجله که در راستای ارتقاء کیفی پیشنهادهای مناسبی داشته‌اند تشکر می‌گردد.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

مقاله فوق برگرفته‌شده از پایان‌نامه دانشجویی است که به مدت یک سال در منطقه طالقان مطالعه شده است (سال ۱۳۹۸). داده‌های موردنیاز نیز بر پایه برداشت‌های میدانی و آزمایشگاهی و همچنین داده‌های پایش شده در ایستگاه زوجی است. با توجه به این‌که داده‌های تهیه‌شده بر پایه داده‌های اخذشده از ایستگاه زوجی زیدشت و برداشت‌های میدانی پژوهش‌گران است، بنابراین تا زمان پذیرش مقاله‌ها و چاپ امکان در دسترس قرار دادن فراهم نیست.

تعارض منافع

هیچ‌کدام از نویسندگان با یکدیگر تضاد منافع ندارند و مطابق قوانین پژوهشی دانشگاه تهران همه اختیارها و نویسندگی مسئول مقاله‌های بر گفته‌شده از تحقیقات دانشجویی متعلق به استاد راهنما است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول: ارائه طرح تحقیق، کمک در انجام برداشت میدانی و هدایت برای اجرای پژوهش و تأمین هزینه پژوهش

نویسنده دوم: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، اجرای مدل و واسنجی

نویسنده سوم: مشاوره درزمینه انجام پژوهش و تهیه فرسایش‌پذیری سنگ

نویسنده چهارم: تدوین نهایی، ویراستاری، انجام اصلاحات و مشارکت در تهیه نقشه‌های مکانی و GIS

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران به‌صورت اختصاص گرانت پژوهشی برای پژوهش کارشناسی‌ارشد و هم‌چنین گرانت پژوهشی استاد راهنما انجام‌شده است.

منابع

1. Refahi, H. 2006. Water erosion and its control. Tehran Univ. Press. (In Persian)
2. Arabkhedri, M., Shadfar, S., Ardakani, A.J., Bayat, R., Khajavi, E., and Mahdian, M.H. 2018. Iran for Estimates Erosion Water Improving, Journal of watershed reaserch (reasearch and development). 120: 13-27. (In Persian)
3. Ismaili, A., and Abdullahi, Kh. 2011. Groundwater management and soil protection. Mohaghegh Ardabili University Press, Ardabil, Iran. 574p. (In Persian)
4. Morgan, R.P.C., and Nearing, M.A. 2011. Handbook of erosion modelling. Handbook of erosion modelling.
5. Mutreja, K.N. 1986. Applied hidrology, Tata McGraw-hill, New Delhi, 959p.
6. Merritt, W.S., Letcher, R.A., and Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, 18: 8. 761-799.
7. Laflen, J.M., and Flanagan, D.C. 2013. The development of US soil erosion prediction and modeling. International Soil and Water Conservation Research, 1: 2. 1-11.
8. Minkowski, M. 2010. Advanced GeoWEPP Tools. Creation and Use of Four Text Files Linked to Landuse and Soils Layers within GeoWEPP.
9. Abbasi Jundani, Sh., and Talebi, A. 2016. Water Erosion Modeling Book Using WEPP Family Models (Volume I & II), Yazd University Press.
10. Wilcox, B.P., and Simanton, J.R. 1998. Predicting runoff in semiarid woodlands: Evaluation of the WEPP model. In Modelling Soil Erosion by Water. pp. 131-140.
11. Han, F., Ren, L., and Zhang, X. 2016. The WEPP Model application in a small watershed in the Loess Plateau. PloS one, 11: 3.
12. Mohammed, S. 2020. Sediment Yield Modeling in the Coastal Region of Syria Using the WEPP-Model. 7p. (In Persian)
13. Brooks, E.S., Dobre, M., Elliot, W.J., Wu, J.Q., and Boll, J. 2016. Watershed-scale evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model in the Lake Tahoe basin. Journal of Hydrology, 533: 389-402.
14. Singh, R.K., Panda, R.K., Satapathy, K.K., and Ngachan, S.V. 2012. Runoff and sediment yield modelling for a treated hilly watershed in Eastern Himalaya using the water erosion prediction project model. Water resources management, 26: 3. 643-665
15. Effendy, Z., Setiawan, M.A., and Mardiatno, D. (2019, April). Geospatial-Interface Water Erosion Prediction Project (GeoWEPP) application for the planning of Bompon Watershed conservation-prioritized area, Magelang, Central Java, Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 256p.
16. Doorabad, E., and Jesarati, A. 2017. Estimating the sedimentation of Aladyzgeh catchment area by using WEPP model in GIS environment. Jornal of Geography and Territorial Spatial Arrangement, 7: 23. 101-112.
17. Sadeghzadeh, M.I., and Yarahmadi, J. 2013. Evaluation of WEPP model in estimating erosion and sediment in marl lands of Khajeh region of Tabriz, Quarterly Journal of Quantitative Geomorphological Research, 2: 1. 97-112. (In Persian)

18. Golkarian, A. 2004. Estimation of water erosion and sedimentation using WEPP model in Neyshabour Bararieh watershed, Master of Watershed Management, University of Tehran. (In Persian)
19. Pezhohesh, M. 2016. Comparing the efficiency of WEPP and MPSIAC models with the amount of observed sediment in estimating soil erosion and sediment rate Case study: (Gojan Chal Namd watershed in Chaharmahal and Bakhtiari province). Quantitative geomorphological research. 4: 4. Shahrekord University. pp. 165-150. (In Persian)
20. Feiznia, S. 1995. Resistance of rocks to erosion in different climates of Iran Journal of Natural Resources of Iran. 47: 95-116. (In Persian)
21. Soil Science and Land Capability Report of Zidasht Watershed, Watershed Management. 1998. Tehran Province Jihad Sazandegi Organization (In Persian)
22. Flangan, D.C., and Livingston, S.J. (eds). 1995. USDA- Water Erosion Prediction Project: WEPP User Summery. NSERL Report No. 11, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.
23. Jafarzadeh, M.S., Rouhani, H., Salmani, H., and Fathabadi, A. 2016. Reducing uncertainty in semi distributed hydrological modeling within the GLUE framework. Journal of water and Soil Conservation, 23: 1. 83-100.