

تحلیل مقایسه‌ای اثر روش‌های محاسباتی مختلف بر آورد عامل توپوگرافی بر میزان و توزیع مکانی هدررفت خاک در حوزه آبخیز شازند

فهیمة میرچولی^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*} و عبدالواحد خالدی درویشان^۳

^۱ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس و ^۳ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

چکیده

فرسایش خاک به‌عنوان یک موضوع مهم در پژوهش‌های حفاظت آب و خاک است که تحت تأثیر عوامل انسانی و طبیعی است. بنابراین، آگاهی از میزان فرسایش خاک، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات اجرایی را فراهم می‌کند. یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی فرسایش خاک، طول و درجه شیب است که محاسبه آن با استفاده از روش‌های محاسباتی مختلف امکان‌پذیر بوده و در عین حال انتخاب مناسب‌ترین رابطه برای تخمین آن از اهمیت زیادی برخوردار است. حال آن‌که تا کنون مقایسه کارایی روش‌های مختلف در تخمین آن‌ها مورد توجه کافی قرار نگرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر با هدف محاسبه عامل توپوگرافی و بررسی تأثیر آن بر میزان هدررفت خاک در حوزه آبخیز شازند از چهار روش محاسباتی متداول مورد استفاده در سامانه اطلاعات جغرافیایی شامل Renard و همکاران (۱۹۹۷)، Desmet و Govers (۱۹۹۶)، Moore و همکاران (۱۹۹۱) و Selige و Böhner (۲۰۰۶) انجام شده است. برای ارزیابی نتایج حاصل از محاسبه فرسایش خاک با استفاده از روش‌های محاسباتی مذکور، از نتایج حاصل از اندازه‌گیری مستقیم طول شیب روی نقشه توپوگرافی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، ضمن تأیید اختلاف حدود ۱۵ برابری نشان داد که متوسط میزان هدررفت خاک در حوزه آبخیز شازند، با استفاده از روش‌های محاسباتی Renard و همکاران (۱۹۹۷)، Desmet و Govers (۱۹۹۶)، Moore و همکاران (۱۹۹۱) و Selige و Böhner (۲۰۰۶) در صورت ثبات سایر عوامل در رابطه جهانی فرسایش خاک تجدیدنظر شده، به ترتیب ۴/۹۵، ۱۹/۴۷، ۱/۷۳ و ۱/۳۴ تن بر هکتار بر سال بوده است. با توجه به محاسبه طول شیب به‌عنوان کوتاه‌ترین پاره‌خط بین خط‌الرأس تا خط‌القعر از روی نقشه توپوگرافی و نیز عامل شیب، عملکرد روش Desmet و Govers (۱۹۹۶)، در محاسبه عامل توپوگرافی بهتر از سایر مدل‌ها ارزیابی شد. یافته‌های پژوهش حاضر مشخصاً بر ضرورت انتخاب شیوه مناسب برآورد عوامل ورودی در تخمین فرسایش خاک تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: استان مرکزی، برآورد فرسایش خاک، تحلیل حساسیت، حفاظت آب و خاک، مدل‌سازی فرسایش خاک

مقدمه

محصولات کشاورزی تا حدود ۱۷ درصد شده است و همچنین، تهدیدی جدی برای پایداری حوزه آبخیز محسوب می‌شود (Tang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Mondal

فرسایش خاک یکی از مخاطرات محیط زیستی است که منجر به کاهش حاصلخیزی خاک و تولید

و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، برآورد هدررفت خاک و شناسایی مناطق بحرانی برای اجرای بهترین اقدامات مدیریتی^۱ و نیز برنامه‌های حفاظت خاک ضروری است (Ramesh و Ganasri، ۲۰۱۶). در همین راستا، مدل‌های فرایندی و تجربی دو ابزار اصلی موجود برای پیش‌بینی فرسایش خاک هستند. در حوزه‌های آبخیز فاقد دستگاه‌های اندازه‌گیری، ارزیابی مقدار فرسایش با استفاده از مشخصات آبخیز و شرایط اقلیمی آن امکان‌پذیر است. نسخه تجدیدنظر شده رابطه جهانی فرسایش خاک^۲ (RUSLE) به دلیل ساختار ساده و قدرتمند و نیز سازگاری با سامانه اطلاعات جغرافیایی^۳ (GIS)، معمول‌ترین مدل تجربی در سراسر جهان است (Wang و همکاران، ۲۰۱۸). این رابطه، با استفاده از شش عامل فرساینده باران^۴ (R)، فرسایش‌پذیری خاک^۵ (K)، توپوگرافی^۶ (LS)، مدیریت زراعی^۷ (C)، عملیات حفاظتی^۸ (P) میزان هدررفت خاک را در مقیاس مکانی مختلف محاسبه می‌کند. از میان ورودی‌های آن، عامل توپوگرافی به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر طبیعت و بنابراین، نحوه محاسبه آن به عنوان یکی از عوامل مؤثر در برآورد فرسایش خاک در نظر گرفته شده است و لذا، اثر آن در اقدامات حفاظتی منابع آب و خاک دیده می‌شود. با توجه به این‌که مدل RUSLE ابتدا در مناطق با شیب یکنواخت و ملایم تهیه شده است و بنابراین، عامل LS به صورت یک‌بعدی مد نظر قرار گرفته است، لذا استفاده از این مدل برای محاسبه متوسط فرسایش سطحی و شیاری در مقیاس حوزه آبخیز و حتی بزرگ‌تر به دلیل چند بعدی شدن آن بایستی با دقت لازم صورت گیرد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۷). در همین راستا، برای برآورد عامل LS در حوزه آبخیز معمولاً دو روش کلی مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع^۹ (DEM) شامل روش

پژوهشگران مختلفی در سراسر جهان به محاسبه هدررفت خاک با استفاده از مدل RUSLE و نیز بررسی عامل‌های این مدل با استفاده از روش‌های محاسباتی متفاوت پرداخته‌اند. Wang و همکاران (۲۰۰۱) در مطالعه خود با هدف بررسی توزیع مکانی عامل LS با استفاده از DEM به این نتیجه رسیدند که معادلات فیزیکی مبتنی بر DEM در مقایسه با مدل‌های تجربی شبیه‌سازی مکانی، همبستگی بیشتری با ویژگی‌های توپوگرافی منطقه دارند. Van Remortel و همکاران (۲۰۰۱) در مطالعه خود به ارائه روش محاسباتی^{۱۰} AML برای محاسبه عامل LS با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰ و ۳۰ متر در آمریکای جنوبی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که LS حاصل از این روش محاسباتی با نتایج سایر روش‌ها از جمله McCool و همکاران (۱۹۹۷) مطابقت دارد. Zhang و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود با هدف ارائه یک مدل بهبود یافته برای محاسبه LS، روش‌های محاسباتی مسیر جریان (MFD) استفاده شده در روش سطح واحد مشارکت-کننده (UCA) را با روش محاسباتی LS-Tool ترکیب کردند. نتایج حاصل نشان داد که روش جدید ارائه شده نسبت به روش‌های MFD و LS-Tool تطابق بیشتری با داده‌های صحرایی جمع‌آوری شده داشتند. Hrabalíková و Janeček (۲۰۱۷) برای بررسی عامل LS در مدل RUSLE از GIS و نیز SAGA در سطح کرت واقع در مجارستان استفاده کردند. ایشان اثر پنج روش‌های محاسباتی مختلف مبتنی بر GIS و دو مدل دستی در برآورد عامل تجزیه و تحلیل کردند و نتایج

¹ Best Management Practice (BMP)

² Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

³ Geographic Information System (GIS)

⁴ Rainfall erosivity factor

⁵ Soil erodibility factor

⁶ Slope length factor

⁷ Cover management factor

⁸ Support practice factor

⁹ Digital Elevation Model

¹⁰ Unit Contributing Area

¹¹ Flow Cumulative Length

¹² Arc Macro Language

روش‌های محاسباتی متداول برآورد عامل فرسایش‌پذیری در حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی پرداختند. نتایج حاصل بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین میزان فرسایش‌پذیری حاصل از سه روش محاسباتی، تحت تأثیر طبقات شیب، ارتفاع و نبود اختلاف معنی‌دار تحت تأثیر کاربری اراضی بوده است. جمع‌بندی سابقه پژوهش نشان می‌دهد که استفاده صحیح از مدل رقومی ارتفاع و نیز محاسبه عامل LS تأثیر بسزایی در میزان هدررفت خاک دارد. با وجود این، مطالعات محدودی به این موضوع پرداخته‌اند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف محاسبه عامل LS با استفاده از روش‌های محاسباتی مختلف و نیز بررسی تأثیر آن بر میزان هدررفت خاک به منظور انتخاب بهترین روش محاسباتی در حوزه آبخیز شازند برنامه‌ریزی شد. طبیعی است، نتایج حاصل از پژوهش حاضر راهنمای مناسب برای استفاده از روش محاسباتی صحیح در تخمین هدررفت خاک در منطقه مورد مطالعه و سایر مناطق مشابه برای کارشناسان اجرایی و برنامه‌ریزان محلی فراهم می‌سازد.

مواد و روش

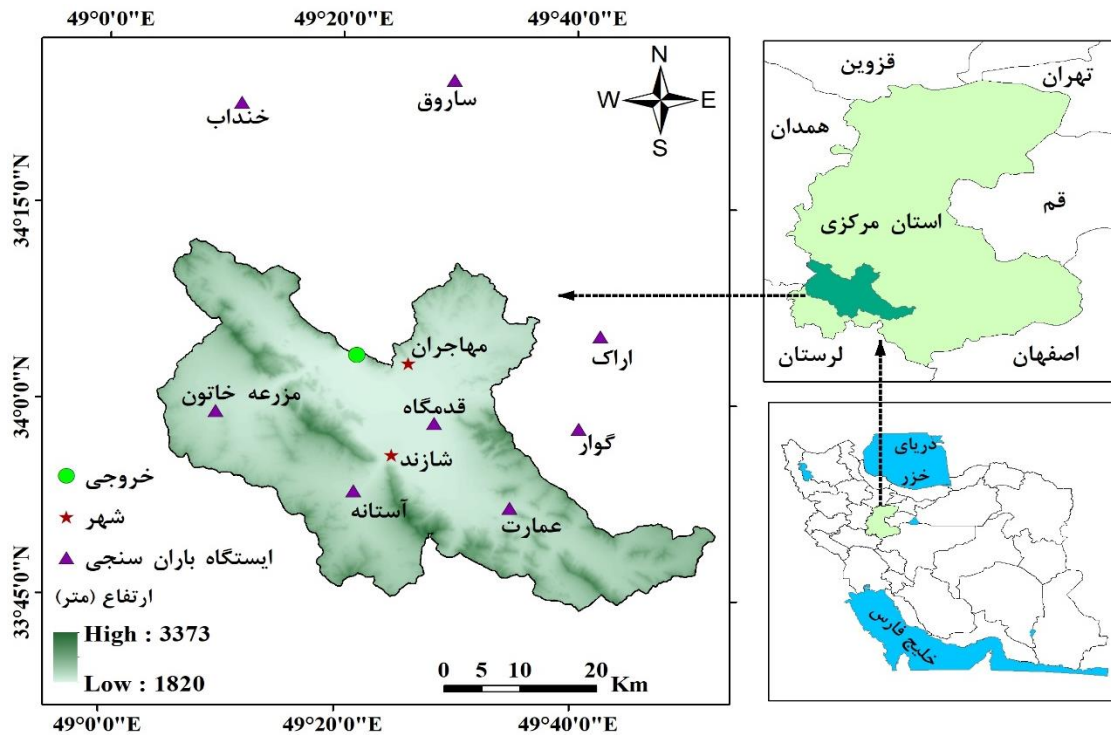
منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر در حوزه آبخیز شازند، به سبب انجام مطالعات پیشین (Davudirad و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Kiani-Harchegani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۹)، قابلیت دسترسی و نیز نمایندگی نسبی برای شرایط عمومی بخشی از مناطق غربی کشور انجام پذیرفت. حوزه آبخیز شازند با مختصات جغرافیایی "۱۵° ۴۱' ۴۹" تا "۱۲° ۵۲' ۴۹" طول شرقی و "۳۳° ۴۴' ۱۳" تا "۱۲° ۳۴' ۳۴" عرض شمالی و مساحت ۱۷۴۰ کیلومتر مربع، یکی از زیرآبخیزهای دریاچه نمک واقع در استان مرکزی است. موقعیت حوزه آبخیز شازند در شکل ۱ نشان داده شده است. ۵۰/۵۱ درصد از کل مساحت حوزه آبخیز شازند کوهستانی و ۴۴/۸۵ درصد آن مناطق دشتی تشکیل می‌دهد. متوسط بارندگی حوزه آبخیز ۴۱۶ میلی‌متر که بیشتر در فصل پاییز، زمستان و بهار رخ می‌دهد و متوسط دمای سالانه آن ۱۲ درجه سلسیوس است. همچنین، کمینه و بیشینه

حاصل نشان داد که هدررفت خاک حاصل از این پنج روش محاسباتی و نیز دو روش دیگر به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار متوسط سالانه هدررفت خاک بوده است؛ به طوری که بهترین روش برای برآورد عامل LS، روش دستی بوده که مقدار هدررفت متوسط را با اختلاف شش درصد از هدررفت خاک اندازه‌گیری شده نشان داده است. همچنین، در سال‌های اخیر پژوهشگران مختلف از جمله Zhang و همکاران (۲۰۱۳)، Panagos و همکاران (۲۰۱۵) و Wang و همکاران (۲۰۱۸) به ارائه روش‌های محاسباتی متفاوت برای محاسبه عامل LS و تهیه نقشه تغییرات مکانی آن پرداختند.

در ایران نیز Mohamadi و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود با هدف شناسایی توزیع مکانی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز تالار به این نتیجه رسیدند که مقدار هدررفت خاک برای کل آبخیز از صفر تا ۹۲/۰۱ تن بر هکتار بر سال بوده است و در عامل طول و درجه شیب با مقدار ۰/۹۳ بیشترین همبستگی با هدررفت خاک را داشته است. Katebikord و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی تأثیر روش‌های محاسباتی مختلف در برآورد عامل توپوگرافی به این نتیجه رسیدند که مقدار متوسط عامل توپوگرافی محاسبه شده، از سه روش Desmet و Govers (۱۹۹۶)، Moore و همکاران (۱۹۹۱) و Selige و Böhner (۲۰۰۶) متفاوت بوده که این تفاوت ناشی از اختلاف در شیوه محاسبه و لحاظ شکل دامنه، نوع جریان و نیز لحاظ مناطق حریم در شبکه زه‌کشی است. Azizian و Kohi (۲۰۱۹) در مطالعه خود به بررسی اثر هشت روش محاسباتی محاسبه عامل توپوگرافی بر میزان رسوب خروجی در حوزه آبخیز باراجین واقع در استان قزوین پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که استفاده از رابطه‌های مختلف برای برآورد عامل توپوگرافی، خطایی در حدود دو تا بیش از ۴۰۰ درصد داشته و از میان رابطه‌های استفاده شده، McCool و همکاران (۱۹۸۹)، Moore و Burch (۱۹۸۶) بهترین رابطه‌های برای محاسبه این عامل در این آبخیز پرشیب بوده است. Kiani-Harchegani و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از

Davudirad و Sadeghi و Kiani-Harchegani، ۲۰۲۰؛
و همکاران، ۲۰۱۶).

ارتفاع از ۱۸۰۰ تا ۳۳۰۰ متر از سطح دریا بوده، بر اساس روش آمبرژه، اقلیم این منطقه در طبقه نیمه خشک معتدل تا نیمه خشک سرد قرار می گیرد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز شازند در استان مرکزی و ایران

مطالعاتی، از روش برگزیده Roose برای منطقه مورد مطالعه (Sadeghi و Tavangar، ۲۰۱۵) به صورت رابطه (۲) استفاده شد.

$$R_R = 0.5 + 0.05P \quad (2)$$

$$R_{ws} = 0.63R_R^{1.47} \quad (3)$$

که در آن، R_R شاخص فرسایندهی حاصل از رابطه Roose، P میانگین بارندگی سالانه (میلی متر) و R_{ws} شاخص فرسایندهی باران Wischmeier و Smith است. در نهایت، مقدار فرسایندهی حوزه آبخیز با استفاده از مقدار فرسایندهی هر ایستگاه و نیز روش فاصله وزنی معکوس^۱ (IDW) موجود در محیط نرم افزار ArcGIS 10.4 تهیه شد.

عامل فرسایندهی پذیری خاک (K): مقدار عامل مقاومت خاک در برابر فرسایش (K) با استفاده از رابطه (۴) و اطلاعات حاصل از تجزیه و تحلیل ۱۱۴ نمونه خاک از سطح حوزه آبخیز محاسبه می شود.

روش پژوهش: به منظور تهیه نقشه نهایی فرسایش خاک، همه عوامل مدل RUSLE شامل R, K, LS, C و P با فرمت رستر و دقت مکانی ۳۰ متر با استفاده از ابزار Raster Calculator و در محیط GIS به شرح مندرج در رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفت.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

که در آن، A متوسط هدررفت خاک (تن بر هکتار بر سال)، R عامل فرسایندهی باران (مگاژول میلی متر بر هکتار بر ساعت بر سال)، K عامل فرسایش پذیری خاک (تن بر هکتار به ازای یک مگاژول میلی متر بر هکتار بر ساعت بر سال)، LS عامل توپوگرافی، C عامل مدیریت پوشش گیاهی و P عامل حفاظتی است. هر یک از عامل های مطالعاتی به شرح زیر محاسبه و طبیعتاً تمرکز کامل بر روش های محاسباتی عامل توپوگرافی (LS) صورت گرفت.

عامل فرسایندهی باران (R): در این مطالعه، برای محاسبه عامل فرسایندهی باران به دلیل نبود آمار مربوط به شدت و مقدار رگبار در ایستگاه های

¹ Inverse Distance Weighting (IDW)

$$S = 3.0 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56, \quad (10)$$

if slope length <15ft

همچنین، رابطه (۱۱) به‌وسیله Govers و Desmet (۱۹۹۶) برای محاسبه عامل توپوگرافی در رابطه RUSLE و با استفاده از مفهوم سطح ویژه مشارکت-کننده ارائه و با LS_D نشان داده شده است.

$$L_D = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{i,j}^m \times 22.13^m} \quad (11)$$

که در آن، $A_{i,j}$ سطح مشارکت‌کننده (m^2)، D اندازه بعد هر سلول شبکه (متر) و $x_{i,j} = \sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$ نیز جهت جریان در هر سلول شبکه i, j است. در این حالت، برای محاسبه شیب نیز از رابطه‌های (۸) و (۹) استفاده می‌شود.

سومین رابطه استفاده شده در پژوهش حاضر برای محاسبه عامل توپوگرافی به‌وسیله Moore و همکاران (۱۹۹۱) (LS_M) به شرح مندرج در رابطه (۱۲) ارائه شده است.

$$LS_M = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^n \quad (12)$$

که در آن، A_s سطح ویژه (m^2)، θ رادیان شیب، m متغیر بین ۰/۴ تا ۰/۵۶ و n متغیر ۱/۲ تا ۱/۳ است. در این رابطه، بخش اول مربوط به محاسبه طول شیب است و زمانی که رسوب‌گذاری آغاز می‌شود، m برابر صفر در نظر گرفته خواهد شد و بخش اول رابطه برابر یک و اثر عامل طول شیب حذف می‌شود. لازم به ذکر است که این محاسبات با استفاده از روش محاسباتی موجود در نرم‌افزار سامانه تجزیه و تحلیل خودکار علوم زمین (SAGA) انجام شد که در این نرم‌افزار ضرایب m و n با توجه به روش محاسباتی مورد استفاده و نیز لایه‌های ورودی شامل لایه شیب و سطح مشارکت‌کننده محاسبه می‌شود.

روش محاسباتی چهارم استفاده شده در این پژوهش، روش Böhner و Selige (۲۰۰۶) است که با استفاده از رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) استفاده شد.

$$LS_B = \left(\frac{CA^{0.5}}{22.13}\right)^{0.5} (65.14 \sin^2 \beta_{CA} + 0.065) \quad (13)$$

if $\beta_{CA} > 0.0505$

$$LS_B = \left(\frac{CA^{0.5}}{22.13}\right)^{3 \cdot \beta_{CA}^6} (65.14 \sin^2 \beta_{CA} + 0.065) \quad (14)$$

که در آن، CA مساحت بالادست و β_{CA} متوسط شیب آبخیز بالادست هر سلول است.

$$100K = 2.1 M^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - OM\%) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3) \quad (4)$$

که در آن، K فرسایش‌پذیری خاک (تن بر هکتار به ازای یک مگاژول میلی‌متر بر هکتار بر ساعت بر سال)، M حاصل‌ضرب درصد رس منهای ۱۰۰ در درصد لای+درصد شن ریز، OM درصد ماده آلی، S طبقه ساختمان خاک و P طبقه نفوذپذیری نیم‌رخ است.

عامل طول و درصد شیب (LS): در مدل USLE عامل طول و درصد شیب در واحد سطح و مقیاس کرت محاسبه و به‌صورت دستی انجام می‌شود، به‌طوری‌که بهترین برآورد برای عامل LS با استفاده از اندازه‌گیری‌های صحرائی است (Hrabalíkova و Janeček, ۲۰۱۷). در ادامه، Moore و همکاران (۱۹۹۱) بر مبنای تئوری توان جریان واحد، روش محاسباتی را برای برآورد عامل LS طراحی کردند. ایشان رابطه ساده‌ای را با استفاده از واحد سطح مشارکت‌کننده ارائه دادند. در ادامه، Desmet و Govers (۱۹۹۶) روش محاسباتی را بر مبنای سطح مشارکت‌کننده و با استفاده از جهت چندین جریان و به‌صورت دو بُعدی و در سطوح توپوگرافی پیچیده‌تر مطرح کردند (Hickey, ۲۰۰۰؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۳). سپس، مدل RUSLE این مورد را به مقیاس شیب تپه و به‌صورت یک بُعدی در قالب روش محاسباتی Renard و همکاران (۱۹۹۷) گسترش داد (Benavidez و همکاران، ۲۰۱۸). در ادامه، هر کدام از روش‌های محاسباتی مورد استفاده در پژوهش حاضر به‌تفصیل شرح داده شده است.

عامل طول و درجه شیب و یا به‌عبارتی عامل توپوگرافی (LS) با استفاده از رابطه‌های (۵) تا (۷) ارائه شده به‌وسیله Renard و همکاران (۱۹۹۷) در قالب LS_R برآورد شد.

$$L_R = (\lambda/22.13)^m \quad (5)$$

توان m با استفاده از عامل β است و به‌عنوان نسبت بین فرسایش شیاری به مجموع فرسایش شیاری و بین‌شیاری و به صورت زیر محاسبه شد.

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (6)$$

$$\beta = (\sin\theta) / [3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (7)$$

$$S = 10.8 \times \sin\theta + 0.03 \quad \text{if slope} < 9\% \quad (8)$$

$$S = 16.8 \times \sin\theta - 0.50 \quad \text{if slope} \geq 9\% \quad (9)$$

شده است از مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۶۱ متغیر است، به طوری که مناطق مرکزی و جنوبی حوزه آبخیز با بیشترین وسعت اراضی کشاورزی و باغی کمترین مقدار C را به خود اختصاص داده‌اند. بیشترین مقدار این عامل در مناطق شمالی و جنوب شرقی به دلیل وجود مراتع ضعیف به دست آمده است.

نقشه میزان فرسایش خاک از ترکیب پنج لایه فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی به دست آمد. مقدار هدررفت خاک برای کل حوزه آبخیز و با استفاده از روش‌های محاسباتی مختلف برآورد عامل LS شامل Renard و همکاران (۱۹۹۷)، Desmet و Govers (۱۹۹۶)، Moore و همکاران (۱۹۹۱)، Selige و Böhrer (۲۰۰۶) در شکل ۳ نشان داده شده است. در هر چهار نقشه مناطق مرکزی حوزه آبخیز دارای کمینه میزان فرسایش و نیز مناطق جنوبی‌تر آن تحت تأثیر تغییرات عامل LS و نیز عامل فرسایش‌پذیری بیشترین میزان فرسایش را در منطقه نشان می‌دهند. Mohammadi و همکاران (۲۰۱۷) و Vaezi و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود دریافتند که عامل LS در مقایسه با سایر عامل‌ها اثر زیادی بر میزان فرسایش خاک دارد. میزان هدررفت خاک در سطح حوزه آبخیز با استفاده از روش محاسباتی Renard و همکاران (۱۹۹۷) ($Erosion_R$)، صفر تا ۱۱۰/۹۳ تن بر هکتار بر سال با مقدار متوسط ۶/۹۵ تن بر هکتار بر سال است. این بازه تغییرات هدررفت خاک در مورد کاربرد روش محاسباتی Böhrer و Selige (۲۰۰۶) ($Erosion_B$) بین صفر تا ۹/۳۹ با میزان متوسط ۱/۳۴ تن بر هکتار بر سال است. همچنین، میزان هدررفت حاصل از روش محاسباتی Desmet و Govers (۱۹۹۶) ($Erosion_D$) از صفر تا ۲۸۱/۵۳ متغیر بوده و مقدار متوسط هدررفت خاک با استفاده از این روش محاسباتی، ۱۹/۴۷ تن بر هکتار بر سال است. میزان هدررفت خاک در سطح حوزه آبخیز با استفاده از روش محاسباتی Moore و همکاران (۱۹۹۱) ($Erosion_M$)، صفر تا ۹/۲۷ با مقدار متوسط ۱/۷۳ تن بر هکتار بر سال برآورد شد. در این راستا، Davudirad و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه خود با هدف بررسی تخریب زمین در حوزه آبخیز سازند

عامل پوشش گیاهی (C): برای محاسبه عامل مدیریت زراعی یا پوشش گیاهی از سنجش از دور و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱ (NDVI) به شرح روش پیشنهادی Durigon و همکاران (۲۰۱۴) و بعد از انجام تصحیح‌های رادیومتریکی و اتمسفری تصاویر لندست و با کمک رابطه (۱۵) استفاده شد.

(۱۵)
$$C = \frac{1-NDVI}{2}$$

عامل عملیات حفاظتی (P): عامل نشان‌دهنده هدررفت خاک در شرایط اجرای عملیات حفاظتی نسبت به هدررفت خاک تحت زراعت شخم در جهت شیب است. عملیات حفاظتی معمول در حوزه‌های آبخیز شامل کشت روی خطوط تراز، تراس‌بندی، کشت نواری، شخم حفاظتی است. در صورتی که هیچ عملیات حفاظتی در منطقه انجام نشده باشد، ارزش عددی این عامل یک و در صورت وجود عملیات حفاظتی مناسب و تا یک نشان‌دهنده عدم وجود عملیات حفاظتی، ارزش عددی آن صفر است.

نتایج و بحث

مقادیر فرساینده‌گی باران با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) برای هشت ایستگاه باران‌سنجی محاسبه شد. بر اساس شکل ۲، متوسط مقدار عامل R، ۲۴۵/۸۱ مگاژول میلی‌متر بر هکتار بر ساعت بر سال است، به طوری که بیشترین مقدار فرساینده‌گی در مناطق جنوبی و جنوب غربی حوزه آبخیز سازند است. نتایج حاصل از محاسبه مقدار فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که مقدار متوسط این عامل ۰/۳۸ و از ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۴۳ تن بر هکتار به ازای یک مگاژول میلی‌متر بر هکتار بر ساعت بر سال متغیر است. توپوگرافی (LS) منطقه مورد مطالعه با استفاده از رابطه‌های مختلفی تهیه و در شکل ۲ آورده شده است. بر اساس این شکل، مقدار عامل LS_D با متوسط ۵/۹۵ در منطقه از صفر تا ۶۳/۰۴ متغیر است. همچنین، نقشه LS_M نشان می‌دهد که مقدار این عامل با متوسط ۰/۴۹ از صفر تا ۱/۸۴ متغیر بوده و در مورد LS_B با متوسط ۰/۳۸ از ۰/۰۶۴ تا ۱/۹۶ متغیر بوده است. نقشه عامل پوشش گیاهی که در شکل ۹ آورده

¹ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

می‌شکند و شرایط برجاگذاری رسوب مهیا می‌شود. طبیعی است، در شرایط وجود رودخانه‌های بزرگ با بستر غیرفعال عریض، بیش‌تخمینی روش مشاهداتی و یا اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. برای این منظور، در حوزه آبخیز بزرگ و با رودخانه‌های بزرگ یک منطقه سپری^۱ در نظر گرفته می‌شود. لکن، حوزه آبخیز مطالعاتی و طبعاً رودخانه مربوطه بزرگ نبوده است. دیگر آن‌که اندازه‌گیری‌های روی نقشه توپوگرافی فقط در آبراهه اصلی انجام‌نشده است و تعداد زیادی از نقاط اندازه‌گیری شده در زیرآبخیزهای کوچک با آبراهه‌های به‌مراتب کوچک‌تر و طبعاً تطابق بیشتر خط شکست شیب با بستر اصلی خود رودخانه انجام شده است که طبیعتاً بیش‌تخمینی احتمالی روش مشاهداتی را به شدت کاهش دهد.

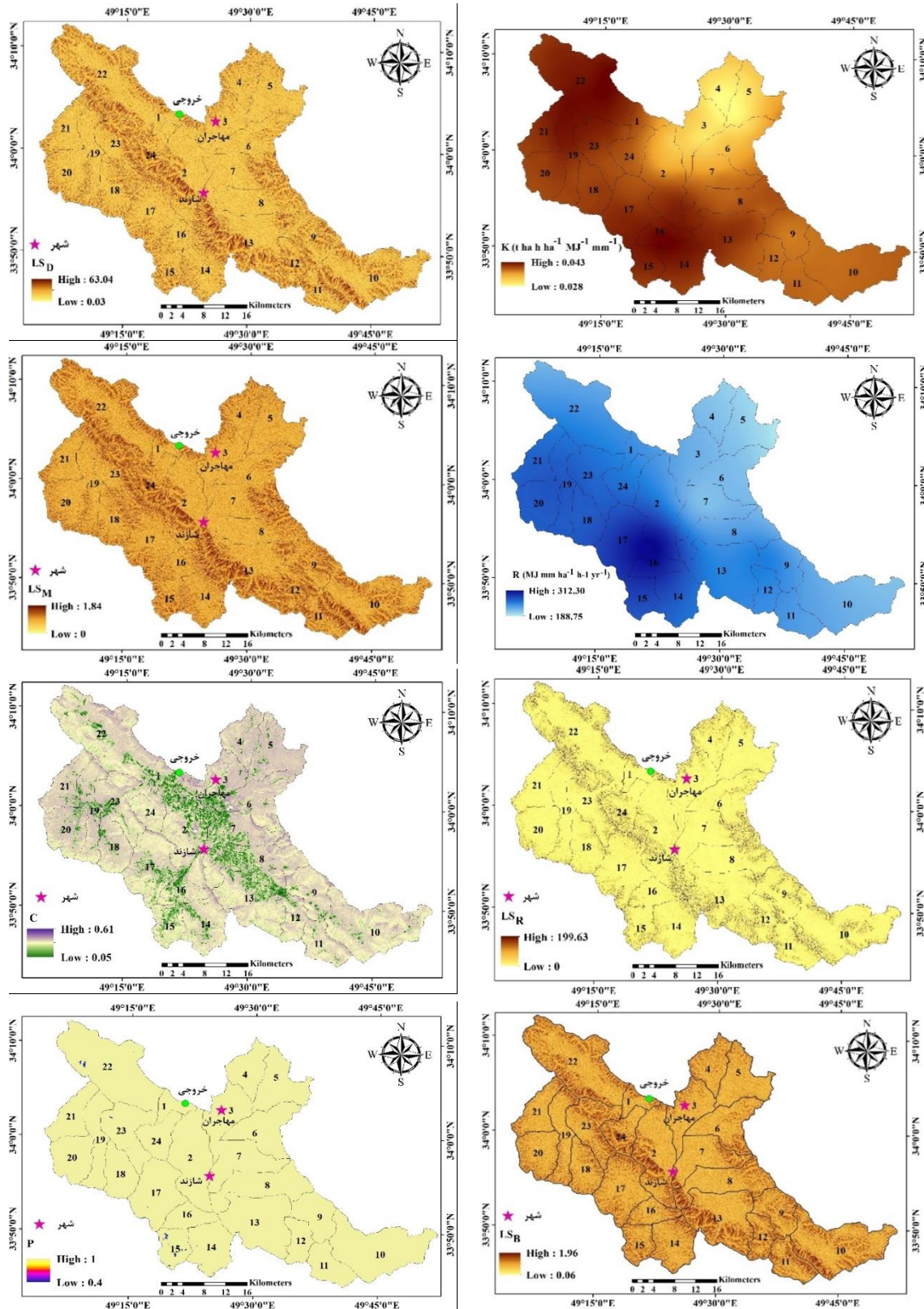
بر اساس شکل ۳، بیشینه توزیع مقدار فرسایش خاک محاسبه شده $Erosion_D$ و $Erosion_B$ در زیرآبخیزهای ۱۲، ۱۳ و ۳ و بیشینه میزان فرسایش به‌دست آمده با استفاده از روش محاسباتی Moore در زیرآبخیزهای ۱۷، ۱۶ و ۲۰ مشاهده می‌شود. این نتایج با نتایج مطالعه Hazbavi و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر ناسالم بودن این زیرآبخیزها در حوزه آبخیز شازند مطابقت دارد. ایشان در مطالعه خود به بررسی سلامت حوزه آبخیز شازند با استفاده از معیارهای اقلیمی، انسانی و هیدرولوژیکی و نیز مدل مفهومی فشار-حالت- پاسخ^۲ (PSR) پرداختند که طبق نتایج به‌دست آمده این زیرآبخیزها از جمله زیرآبخیزها ناسالم و نسبتاً ناسالم طبقه‌بندی شدند. همچنین، این نتایج با پژوهش Sadeghi و Kiani-Harchegani (۲۰۲۰) در زمینه فرسایش‌پذیری خاک در این زیرآبخیزها با استفاده از رابطه Romkens و همکاران (۱۹۸۶) مطابقت دارد. ایشان در مطالعه خود به بررسی عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه‌های Wischmeier و Smith (۱۹۷۸)، Romkens و همکاران (۱۹۸۶) و Torri و همکاران (۱۹۹۷) پرداختند. همچنین، در پژوهش مذکور وضعیت این زیرآبخیزها با توجه به دو رابطه دیگر در وضعیت فرسایش‌پذیر قرار داشته است.

دریافتند که این آبخیز به‌دلیل دست‌کاری و تغییرات نابجای کاربری اراضی در وضعیت شدید تخریب زمین قرار دارد.

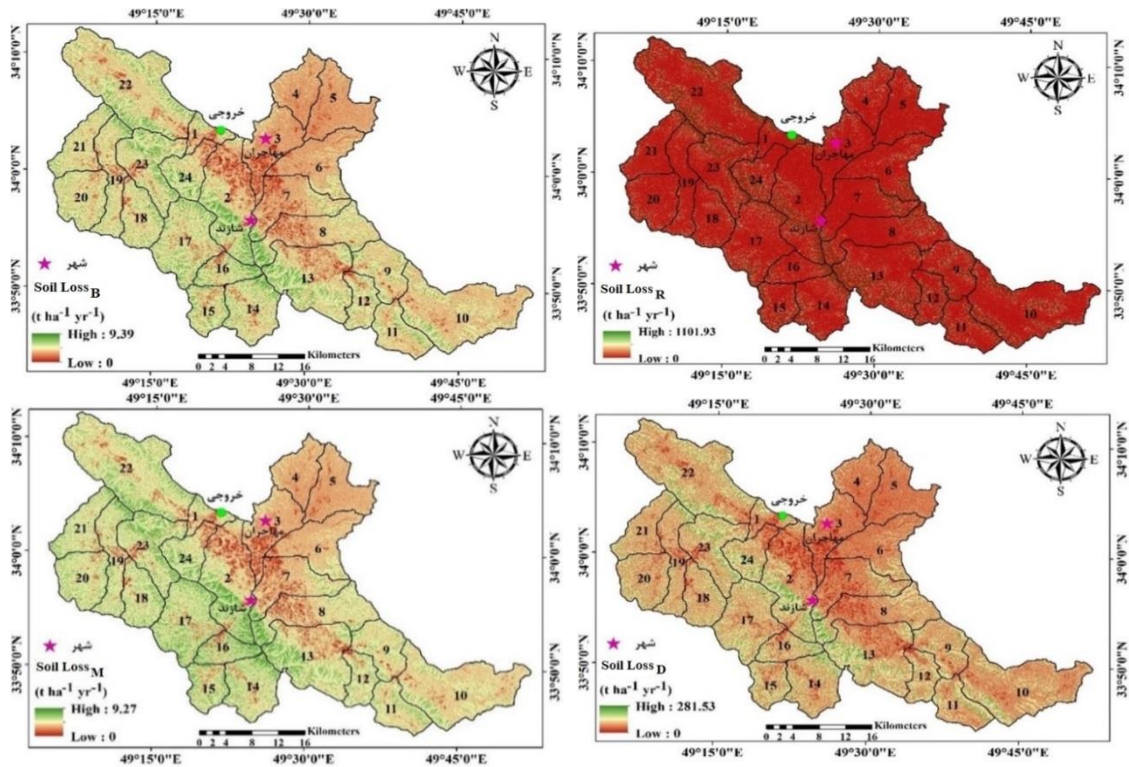
نقشه توزیع مکانی فرسایش خاک در حالت $Erosion_M$ و $Erosion_B$ رفتار مشابهی را در سطح حوزه آبخیز نشان می‌دهند. همچنین، بازه تغییرات میزان فرسایش آبخیز در دو نقشه به‌دست آمده مشابه یکدیگر است. این در حالی است که توزیع مکانی فرسایش و نیز مقدار بیشینه توزیع مقدار فرسایش به‌دست آمده از $Erosion_D$ نسبت به فرسایش به‌دست آمده به دو روش محاسباتی مذکور بسیار متفاوت است. با توجه به عدم موجودیت داده‌های رسوب مشاهداتی در ایستگاه پل دوآب واقع در محل خروجی اصلی آبخیز (شکل ۱)، برای ارزیابی عملکرد مدل در حالت‌های مختلف، از نقشه توپوگرافی و شبکه آبراهه استفاده شد. با توجه به این‌که عامل طول شیب نمایه‌ای برای طول مسیر حرکت جریان در راستای شیب است، لذا، در نقشه توپوگرافی طول شیب به‌عنوان کوتاه‌ترین پاره‌خط بین خط‌الرأس تا خط‌القعر محاسبه شد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۴؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۷). برای این کار، در نقشه مذکور، ۴۵ طول پاره‌خط در نقاط مختلف حوزه آبخیز شازند اندازه‌گیری شد. در ادامه، عامل شیب نیز با استفاده از معادلات مربوطه محاسبه و با حاصل‌ضرب دو عامل طول و تندی شیب، عامل LS محاسبه شد. مقدار میانگین LS محاسباتی در این حالت، ۵/۰۶ است. در میان روش‌های محاسباتی استفاده شده، این مقدار به LS محاسباتی به روش Desmet و Govers (۱۹۹۶)، بسیار نزدیک و برابر ۵/۵۹ است. ارزیابی خطای هر یک از روش‌های محاسباتی استفاده شده نشان داد که روش Desmet و Govers (۱۹۹۶) با کمترین میزان خطا (حدود ۱۰ درصد) بالاترین دقت را داراست. حال آن‌که مقادیر LS برآوردی Renard و همکاران (۱۹۹۷)، Moore و همکاران (۱۹۹۱) و Böhrner و Selige (۲۰۰۶) به‌ترتیب ۱/۶۸، ۰/۴۹ و ۰/۳۸ اختلافی حدود ۶۷ تا ۹۲ درصد داشته‌اند. قابل ذکر است که طول شیب در واقع فاصله بین خط تقسیم آب و جایی است که شیب

¹ Buffer

² Pressure- State- Response (PSR)



شکل ۲- نقشه فرسایش پذیری باران، فرسایش پذیری، توپوگرافی حاصل از روش های محاسباتی Renard و همکاران (۱۹۹۷) (LS_R)، Desmet و Govers (۱۹۹۶) (LS_D)، Moore و همکاران (۱۹۹۱) (LS_M)، Selige و Böhner (۲۰۰۶) (LS_B)، پوشش گیاهی (C) و مدیریت اراضی (P)



شکل ۳- میزان هدررفت خاک حاصل از کاربرد روش‌های محاسباتی مختلف محاسبه عامل LS

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان داد که نتایج حاصل از به کارگیری Desmet و Govers (۱۹۹۶)، شباهت بیشتری با مقادیر محاسباتی حاصل از اندازه‌گیری مستقیم روی نقشه توپوگرافی حوزه آبخیز مطالعاتی دارد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نوع روش محاسباتی مورد استفاده برای محاسبه عامل توپوگرافی اهمیت بسیار زیادی دارد و نظر به تأثیر قابل توجه آن در مقدار فرسایش برآوردی، عدم توجه به این موضوع باعث بروز خطای زیاد و نیز عدم قطعیت بالا در محاسبه فرسایش خاک می‌شود. اگرچه عدم قطعیت و وجود خطای برآوردی ناشی از عدم اندازه‌گیری‌های صحرائی و نیز عدم لحاظ سایر جزئیات مرتبط با شکل، نیمرخ و یا انحنای شیب در برآورد عامل توپوگرافی به سبب نبود امکانات فنی یا راه‌حل بهتر برای ارزیابی روش‌ها از موارد اجتناب‌ناپذیر پژوهش حاضر تلقی می‌شود. بر همین اساس لحاظ سایر مؤلفه‌های مرتبط با شیب و تجزیه و تحلیل حساسیت روش‌های محاسبه عامل توپوگرافی و نیز تأثیر آن بر میزان فرسایش خاک و طبعاً انجام واسنجی‌های لازم در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود. به علاوه، توصیه می‌شود، برای مقایسه

آگاهی از میزان فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز، امکان شناسایی نواحی بحرانی و آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی برنامه‌های مدیریتی و اجرایی را امکان‌پذیر می‌کند. لکن، برآورد صحیح فرسایش خاک به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در محاسبه فرسایش و رسوب به کمک مدل RUSLE، عامل توپوگرافی متشکل از عامل‌های طول و درجه شیب از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طوری‌که پژوهشگران مختلفی رابطه‌های متفاوتی را برای محاسبه این عامل ارائه داده‌اند. بنابراین، در پژوهش حاضر اثر کاربست چهار روش محاسباتی مختلف محاسبه عامل توپوگرافی بر مقدار و الگوی مکانی هدررفت خاک در حوزه آبخیز شازند مورد بررسی قرار گرفت و صحت نتایج حاصل با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم روی نقشه توپوگرافی کنترل شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که میزان هدررفت خاک برآورد شده با استفاده از این چهار روش محاسباتی تفاوت زیادی با یکدیگر داشته، به‌طوری‌که اختلاف آن‌ها تا حدود ۱۵ برابر و توزیع مکانی آن‌ها متغیر بود. همچنین، ارزیابی

کمی نتایج حاصل از روش‌های محاسباتی مختلف، از مفهوم نسبت تحویل رسوب استفاده و سپس، نتایج حاصل با داده‌های رسوب‌سنجی موجود در ایستگاه‌های هیدرومتری مقایسه شود.

منابع مورد استفاده

1. Azizian, A. and S. Kohi. 2019. Evaluating the effect of different methods for calculating topographic factor on sediment delivery rate based on RUSLE Model, case study: Barajin Catchment, Qazvin. *Iran Water Resources Research*, 24: 304-317 (in Persian).
2. Benavidez, R., B. Jackson, D. Maxwell and K. Norton. 2018. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R/USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 6059-6086.
3. Böhner, J. and T. Selige. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 115: 13-28.
4. Davudirad, A.A., S.H.R. Sadeghi and A. Sadoddin. 2016. The impact of development plans on hydrological changes in the Shazand Watershed, Iran. *Land Degradation and Development*, 27: 1236-1244.
5. Desmet, P.J.J. and G. Govers. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51: 427-433.
6. Durigon, V.L., D.F. Carvalho, M.A.H. Antunes, P.T.S. Oliveira and M.M. Fernandes. 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 35: 441-453.
7. Ganasri, B.P. and H. Ramesh. 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS, a case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7: 953-961.
8. Hazbavi, Z., J.E.M. Baartman, J. Nunes, P.S.D. Keesstra and S.H.R. Sadeghi. 2018. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*, 87: 196-208.
9. Hazbavi, Z., S.H.R. Sadeghi, M. Gholamalifard and A.A. Davudirad. 2019. Watershed health assessment using the Pressure-State-Response (PSR) framework. *Land Degradation and Development*, 31: 3-19.
10. Hickey, R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography*, 29: 1-8.
11. Hrabalíková, M. and M. Janeček. 2017. Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil and Water Research*, 12: 69-77.
12. Kiani-Harchegani, M., S.H.R. Sadeghi and S. Falahatkar. 2019. Comparative analysis of soil erodibility factor in Shazand Watershed. *Ecologyhydrology*, 6: 153-163 (in Persian).
13. Kiani-Harchegani, M. and S.H.R. Sadeghi. 2020. Practicing Land Degradation Neutrality (LDN) approach in the Shazand Watershed, Iran. *Science of the Total Environment*, 698: 13-29.
14. Katebikord, A., S.H.R. Sadeghi and V.P. Singh. 2019. Effects of different methods and algorithms on estimation of soil erosion topography factor. 14th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran, Urmia, 15 and 16 July (in Persian).
15. McCool, D.K., G.R. Foster, C.K. Mutchler and L.D. Meyer. 1989. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*, 32: 1571-1576.
16. McCool, D.K., G.R. Foster and G.A. Weesies. 1997. Slope Length and Steepness factors (LS). In predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Vol. 703, Washington, DC: US Department of Agriculture.
17. Mohammadi, M., M. Fallah, A. Kavian, L. Gholami and E. Omidvar. 2017. The application of RUSLE Model in spatial distribution determination of soil loss hazard. *Ecologyhydrology*, 3: 645-658 (in Persian).
18. Mondal, A., D. Khare and S. Kundu. 2018. A comparative study of soil erosion modelling by MMF, USLE and RUSLE. *Geocarto International*, 33: 89-103.
19. Moore, I.D. and G.J. Burch. 1986. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1294-1298.
20. Moore, I.D., R.B. Grayson and A.R. Landson. 1991. Digital terrain modelling, a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5: 3-30.
21. Panagos, P., P. Borrelli and K. Meusburger. 2015. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modelling soil erosion by water. *Geosciences*, 5: 117-126.
22. Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*, 384 pages.

23. Romkens, M.J.M., S.N. Prasad and J.W.A. Poesen. 1986. Soil erodibility and properties. In Proceedings of 13th Congress of the International Soil Science Society Germany, Hamburg, 5: 492–504.
24. Sadeghi, S.H.R. and S. Tavangar. 2015. Development of stationnal models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Natural Hazards*, 77: 429-443.
25. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi and M. Gholamalifard. 2019. Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthrologic activities on watershed health. *Science of Total Environment*, 648: 880-893.
26. Sadeghi, S.H.R., A.A. Davudirad, A. Sadoddin and S. Paimozd. 2017. Trend of changes in land degradation index in Shazand Watershed, Markazi Province. *Watershed Engineering and Management*, 9: 383- 397 (in Persian).
27. Tang, Q., Y. Xu, S.J. Bennett and Y. Li. 2015. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS, a case study of the Yangou Watershed in the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 73: 1715-1724.
28. Torri, D., J. Poesen and L. Borselli. 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena*, 31: 1–22.
29. Vaezi, A.R., M. Abbasi, Kh. Hajimaleki. 2017. Assessment of the RUSLE Model integrated with RS and GIS in semi-arid small drainage areas, NW Iran. *Iran Watershed Management Science and Engineering*, 11: 1-11 (in Persian).
30. Van Remortel, R.D., M.E. Hamilton and R.J. Hickey. 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArclInfo grid. *Cartography*, 30: 27-35.
31. Wang, G., G. Gertner, P. Parysow and A. Anderson. 2001. Spatial prediction and uncertainty assessment of topographic factor for revised universal soil loss equation using digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56: 65-80.
32. Wang, M., J.E. Baartman, H. Zhang, Q. Yang, S. Li, J. Yang, C. Cai, M. Wang, C.J. Ritsema and V. Geissen. 2018. An integrated method for calculating DEM-based RUSLE LS. *Earth Science Informatics*, 11: 579-590.
33. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. In: *Agriculture Handbook No. 537*, USDA, Washington, DC, 58 pages.
34. Zhang, H., Q. Yang, R. Li, Q. Liu, D. Moore, P. He, C. Ritsema and V. Geissen. 2013. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers and Geosciences*, 52: 177-188.
35. Zhang, H., J. Wei, Q. Yang, J.E. Baartman, L. Gai, X. Yang, S. Li, J. Yu, C.J. Ritsema and V. Geissen. 2017. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the revised universal soil loss equation for large watersheds. *Geoderma*, 308: 36-45.