

برآورد جامع مؤلفه‌های فرسایش و رسوب با استفاده از مدل IntErO در حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی، استان اردبیل

زینب حزباوی*: استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی
 الهام عزیزی: دانشجوی مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
 زهرا شریفی: دانشجوی مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
 نازیلا علایی: دانش‌آموخته مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
 رئوف مصطفی‌زاده: دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی
 مرتضی بهزادفر: دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان خراسان شمالی
 ولیبور اسپالویج: استاد، دانشکده فلسفه، گروه جغرافیا، دانشگاه مونتنگرو، مونتنگرو

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱)

چکیده

تحقیق حاضر با هدف برآورد مؤلفه‌های مرتبط با فرسایش و رسوب با استفاده از مدل IntErO ((Intensity of Erosion and Outflow در حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی، استان اردبیل انجام شد. برای اجرای این مدل ابتدا ۲۶ داده ورودی شامل ویژگی‌های هندسی، توپوگرافی، حداکثر جریان خروجی، هیدرولوژی، هواشناسی و شدت فرسایش برای کل حوزه آبخیز و ۳۶ زیرحوضه آن استخراج شد. سپس منطبق با استانداردهای مورد نیاز مدل، بانک اطلاعاتی آن‌ها در محیط Excel تهیه و وارد نرم‌افزار شد. پس از اجرای مدل IntErO، ۲۲ مؤلفه مرتبط با فرآیند فرسایش حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی به‌دست آمد. اکثر مؤلفه‌های فرسایشی در سطح ۳۶ زیرحوضه آبخیز مورد مطالعه دارای تغییرات مکانی زیادی بوده و این مساله بیانگر تنوع شرایط اکولوژیکی و بیوفیزیکی در سطح حوزه آبخیز است. در این پژوهش، حداکثر و حداقل مقدار ضریب شدت فرسایش خاک (Z) در زیرحوضه‌های ۶ و ۱۰ واقع در بخش شرقی حوضه مورد مطالعه برآورد شد. میانگین کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطح حوزه آبخیز (W_{god}) برابر با ۲۲۲۸۵۴/۶۵ مترمکعب در سال بود. علت بالا بودن فرسایش ویژه با مقادیر بالای ۲۰۰ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال در برخی از زیرحوضه‌ها را می‌توان به بهره‌برداری و دخالت شدید صورت گرفته نسبت داد. براساس نتایج به‌دست آمده مقدار میانگین و انحراف معیار ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش (Ru) برای کل حوزه آبخیز برابر با $0/26 \pm 0/09$ بوده است. مقادیر فرسایش خاک واقعی (G_{god}) و فرسایش خاک واقعی ویژه (G_{god}/km^2) برابر با ۱۷۲۷۰۴/۹۰ مترمکعب در سال و ۲۱۵/۵۰ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال ارزیابی شد. نتایج مطالعات انجام شده حاکی از نفوذپذیری زیاد، درزیرحوضه‌های بالادست، است. در این زیرحوضه‌ها وجود اراضی مرتعی با پوشش گیاهی علف‌زار، موجب نفوذ بیش‌تر آب در لایه‌های خاک می‌شود. نتایج به‌دست آمده، در مدل‌سازی فرآیندهای مختلف اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و مدیریتی حوزه آبخیز، اولویت‌بندی مناطق بحرانی و اجرای پایدار و مؤثر اقدامات احیایی و حفاظتی کاربرد دارند.

واژگان کلیدی: اراضی مرتعی؛ الگوی مکانی؛ تخریب زمین؛ شدت فرسایش؛ هدررفت خاک.

۱- مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی با ارزش حیات بشر است (Keesstra et al, 2016; Lal, 2020) و فرسایش خاک یکی از موضوعات مهم زیست‌محیطی است که مسائل و مشکلات مختلفی را رقم می‌زند (Toy et al, 2002; Spalevic et al, 2014). فرسایش خاک نوعی آلودگی غیرنقطه‌ای بوده که پیامدهایی از جمله افزایش رسوب رودخانه‌ها و آلودگی آب را در پی دارد و در بروز سیل‌های مخرب و تهدید خدمات حیاتی و کیفیت پروژه‌های کارآمد مدیریت منابع آب و خاک تأثیر گذار است (Barovic et al, 2015; Wilson et al, 2008; Jahantigh and Jahantigh, 2020). به‌طور کلی علل فرسایش خاک را می‌توان در موضوعات مختلف جستجو نمود و در دو دسته کلی طبیعی و انسانی طبقه‌بندی کرد (Hessel and Jetten, 2007; Vrieling et al, 2009; Barovic et al, 2015). از عوامل طبیعی، می‌توان به عوامل ژئومورفولوژی، نوع خاک، آب و هوا، پوشش گیاهی (Barovic et al, 2015) و شدت خشکی زمین (Biro et al, 2013) و از عوامل انسانی، به ساخت و ساز، استفاده از زمین، توسعه زمین (Barovic et al, 2015)، افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی (Zhao et al, 2013; Prokopand and Poreba, 2012) و تغییر کاربری اراضی (Shen et al, 2013; Asghari Sarasekanrood et al, 2019; Djekovic et al, 2013) می‌توان اشاره کرد. ارزیابی خطر فرسایش، شکل خاصی از ارزیابی منابع زمینی است و هدف از آن تقسیم کردن اراضی به نواحی کوچک بر پایه نوع فرسایش و مقدار آن بوده که در برنامه‌ریزی حفاظت خاک، نقش اساسی دارد (Esmali and Abdollahi, 2011). در این ارزیابی، مناطق با پتانسیل تولید فرسایش بالا که تهدیدکننده حداکثر تولید آن‌هاست مورد شناسایی قرار می‌گیرند. نحوه ارزیابی فرسایش و پهنه‌بندی اراضی به درجات با شدت‌های مختلف فرسایش، در مطالعات فرسایش خاک حائز اهمیت است. شناسایی مناطق دارای توان بالقوه فرسایشی بالا، و ارائه راهکارهای مدیریتی صحیح در استفاده از اراضی، می‌تواند موجب کاهش اثر فرسایشی در منطقه گردد (Esmali and Abdollahi, 2011; Mohamadi, 2017).

امروزه برای پهنه‌بندی خطر فرسایش از مدل‌های برآورد میزان فرسایش و رسوب استفاده می‌شود (Ashraf, 2019; Wang et al, 2019; Gutierrez and Rosas, 2020). انتخاب مدل مناسب، اولین قدم در بررسی و ارزیابی فرسایش یک منطقه می‌باشد. در این راستا، به‌منظور تخمین میزان فرسایش یک منطقه مدل‌های مختلف مفهومی، تجربی، فیزیکی و ریاضی از جمله^۱ BLM،^۲ FAO،^۳ HP،^۴ ماسگریو،^۵ اسکالوگرام،^۶ کرک بای،^۷ استیلیک،^۸ مورگان،^۹ مورگان فینی،^{۱۰} فورنی،^{۱۱} USLE،^{۱۲} PSIAC،^{۱۳} WEED،^{۱۴} RUSLE،^{۱۵} BSTEM و غیره ارائه شده است. به‌کار بردن هر کدام از این مدل‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد. مدل‌های جدید دارای محاسبات ریاضیاتی قوی و پیچیده هستند و قابل کاربرد برای تمام کاربران، به‌ویژه متخصصان و کارشناسان اجرایی نیستند. از طرفی برخی از مدل‌ها، ویژه‌ی مناطق آب‌وهوایی خاص یا شرایط اکولوژیکی و هیدرولوژیکی مخصوص بوده و به برآورد شکل خاصی از فرسایش می‌پردازند. به‌همین منظور پژوهش‌گران همچنان در پی ارائه مدل‌های کاربردی متناسب با شرایط محیطی و انسانی و تبعاً تخصصی متنوع هستند. در همین راستا، Spalevic (۲۰۱۱) یک مدل کامپیوتری-گرافیکی برای برآورد شدت فرسایش خاک و حداکثر جریان خروجی از حوزه‌آبخیز تحت عنوان IntErO مخفف Intenzitet Eroziije i Oticanje به زبان صربی و Intensity of Erosion and Outflow به زبان انگلیسی، ارائه شده است. از مزایای این مدل می‌توان به سادگی و قابل فهم بودن تمام متغیرهای به‌کار برده شده، داشتن محیط سازگار با سیستم عامل ویندوز و بدون نیاز به نصب پیچیده اشاره

¹ Bureau of Land Management

² Food and Agriculture Organization

³ Hydrophysical Method

⁴ Musgrave

⁵ Scalogram

⁶ Krikby

⁷ Stehlik

⁸ Morgan and Feini

⁹ Fournier

¹⁰ Universal Soil Loss Equation

¹¹ Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee

¹² Revised Universal Soil Loss Equation

¹³ Bank Stability and Toe Erosion Model

¹⁴ Musgrave

کرد. قابلیت کاربرد مدل در مقیاس حوضه و دقت آن در ورود اطلاعات و اعلام هشدار به‌هنگام ورود اطلاعات غیرمنطقی یا وقوع اشتباهات ناخواسته در محاسبات از دیگر مزایای این مدل است. مطالعات مختلف مؤید کارایی این مدل در برآورد فرسایش و رسوب حوزه‌های آبخیز در شرایط فیزیوگرافی، اقلیمی، خاکی، هیدرولوژیکی و نیز دخالت‌های انسانی مختلف بوده است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

Spalevic و همکاران (۲۰۱۴) برای ارزیابی فرسایش خاک در مناطق لیپنیکا^۱، پلیملیجه^۲، مونته‌نگرو^۳ با استفاده از مدل IntErO فرآیندهای فرسایش خاک را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که در حوضه رودخانه متعلق به "طبقه‌بندی تخریب ۷" با توجه به سیستم طبقه‌بندی گاوریلوویچ؛ روند وقوع فرسایش بسیار ضعیف است. Spalevic و همکاران (۲۰۱۴) نیز با مطالعه کاربرد مدل IntErO برای ارزیابی شدت فرسایش خاک و رواناب حوضه رودخانه دراگوورلو^۴ از پولیملیج^۵، مونته‌نگرو چنین بیان کردند که حداکثر جریان خروجی محاسبه شده از حوضه برابر با ۱۷۴ مترمکعب در ثانیه و هدررفت خاک ۳۸۵۷ مترمکعب در سال، که مقدار ویژه آن برابر ۳۳۵ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال است. Barovic و همکاران (۲۰۱۵) برای برآورد عملکرد رسوب در زیرحوضه S1-5 از آبخیز رودخانه شیرین‌دره واقع در استان خراسان شمالی با استفاده از مدل IntErO به این نتیجه رسیدند که هدررفت خالص خاک، ۱۳۲۲۸ مترمکعب در سال است. براساس نتایج این تحقیق داده‌های استاندارد برای حفاظت خاک مورد استفاده قرارگرفت که امکان مدل‌سازی عملکرد رسوب با چنین رویکردی وجود دارد. Spalevic و همکاران (۲۰۱۶) نیز به بررسی تخمین هدررفت خاک حوزه آبخیز S7-2 واقع در حوزه آبخیز شیرین‌دره با استفاده از مدل IntErO پرداختند که هدف از این مطالعه برآورد هدررفت خاک حوضه با استفاده از مدلی ساده، اما جامع، برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی پتانسیل فرسایش بود. دبی اوج برابر با ۶۵ مترمکعب بر ثانیه در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و هدررفت خالص خاک برابر با ۴۳۹۷ مترمکعب در سال و مقدار ویژه آن برابر با ۱۷۸ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال محاسبه شد و به این نتایج دست یافتند که، کاربرد اولیه این مدل ابزاری مناسب برای ارزیابی سریع خطر فرسایش در حمایت از تصمیم‌گیری و توسعه سیاست است. Khaledi Darvishan و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعه اثربخشی مدل IntErO برای پیش‌بینی شدت فرسایش خاک و عملکرد رسوب در حوزه آبخیز خامسان استان کردستان در غرب ایران نیز بیان کردند که روند شدت فرسایش در حوزه آبخیز مورد مطالعه در حد متوسط است. علاوه براین برآورد اوج جریان، با مقدار ۲۷/۵۰ مترمکعب در ثانیه، برای یک دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و مقدار ضریب Z برابر ۰/۸۷۶ بیانگر این مساله است که، حوضه مذکور متعلق به دسته دوم گروه تخریب است. همچنین، تلفات خالص محاسبه شده از حوضه رودخانه ۱۲۲۶۳/۴۴ مترمکعب در سال، به‌ویژه ۲۸۲/۸۱ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال بوده و مقاومت فرآیند فرسایش قوی، و با توجه به انواع فرسایش، فرسایش سطحی غالب است. اخیراً Chalise و همکاران (۲۰۱۹) با برآورد عملکرد رسوب و حداکثر جریان با استفاده از مدل IntErO در حوضه رودخانه سارادا^۶ واقع در تپه‌های غربی نیال^۷ به این نتیجه رسیدند که ضریب عدم تقارن محاسبه شده برابر با ۰/۶۳، احتمال بروز سیل‌های بزرگی را در آینده در حوضه حوضه رودخانه Varde پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب فرسایش نیز برابر با ۰/۴۰ به‌دست آمد که نشان‌دهنده وقوع فرسایش سطحی و مقاومت متوسط در حوضه رودخانه مذکور است. نرخ هدررفت ناخالص خاک برابر با ۱۰/۷۴ میلی گرم در هکتار در سال به‌دست آمد.

از مصادیق نوآوری مدل IntErO، فرمول‌بندی شاخص‌های سهل‌الوصول مؤثر در فرسایش و تولید رسوب در مقیاس حوزه آبخیز است. نتایج مطالعاتی که تاکنون با مدل IntErO، صورت گرفته حاکی از این است که، این مدل به مساحت حوضه حساسیت نشان نداده است. در حالی که یکی از محدودیت‌های مدل‌های فرسایش و رسوب، حساسیت نسبت به بُعد مساحت است. از طرفی آگاهی داشتن از ضرایب فرسایشی به‌دست آمده از مدل مزبور، از قبیل ضریب توسعه حوضه، ضریب سینوزیته جریان، ضریب انرژی فرسایش، ضریب نفوذپذیری حوضه و نهایتاً ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش، برای مدیریت مناسب

¹ Lipnica

² Polimlje

³ Montenegro

⁴ Dragovo Vrelo

⁵ Polimlje

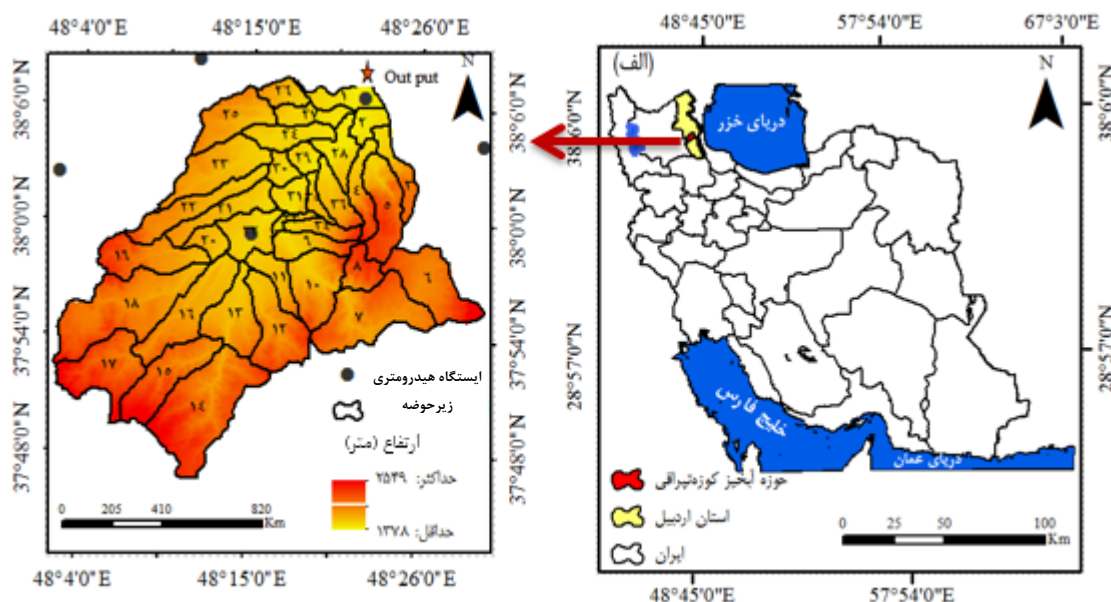
⁶ Sarada

⁷ Nepal

حوزه آبخیز و اعمال اقدامات حفاظتی به‌ویژه بهترین اقدامات مدیریتی مورد توجه سیاست‌گذاران و مدیران اجرایی کنونی، نقش کلیدی ایفا می‌کند. بنابراین با توجه به کارایی مناسب مدل IntErO، پژوهش حاضر با هدف کسب اطلاعات جامع از ویژگی‌های فرسایشی و تغییرپذیری مکانی آن‌ها در سطح حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی واقع در بخش جنوبی استان اردبیل صورت گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی واقع در استان اردبیل دارای مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲ دقیقه و ۹ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۲۷ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه و ۳۵ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی است. حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی دارای مساحت ۸۰۱/۴۰ کیلومترمربع در قسمت جنوبی اردبیل و قسمت شمالی شهرستان کوثر واقع شده است. هم‌چنین این حوزه بخش زیادی از شهرستان نیر را در برمی‌گیرد. ضریب فشردگی حوزه برابر ۱/۴۷ بوده که نشان‌دهنده‌ی شکل کشیده‌ی آن است. مناطق مسکونی حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی را ۶۵ روستا تشکیل می‌دهد که روستاهای مهم منطقه قلعه جوق، خان قشلاقی، جعفرلو و مولان هستند. پایین‌ترین و بالاترین ارتفاع حوزه به‌ترتیب برابر با ۱۳۷۸ و ۲۵۴۹ متر از سطح دریاست. بر اساس وضعیت توپوگرافی حوزه آبخیز، کل منطقه به ۳۶ زیرحوضه تقسیم‌بندی شده است (Alaei et al, 2019a and b). تعیین مرز زیرحوضه‌ها یا واحدهای هیدرولوژیک در تحقیق حاضر در ابتدا با استفاده از Arc Hydro صورت پذیرفت. سپس بر اساس تطبیق با وضعیت توپوگرافی منطقه و نیز محل تلاقی آبراهه‌ها کنترل شدند و شماره‌گذاری زیرحوضه‌ها مطابق اصول کارتوگرافی از بخش خروجی حوزه آبخیز اصلی و از راست به چپ انجام شد. در حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی، زیرحوضه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۵ و ۲۶، از نوع واحد هیدرولوژیک مستقل و زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ از نوع واحد هیدرولوژیک میان‌حوضه هستند (Hazbavi et al, 2020). شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی و زیرحوضه‌های آن را در کشور و استان نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی و و زیرحوضه‌های آن

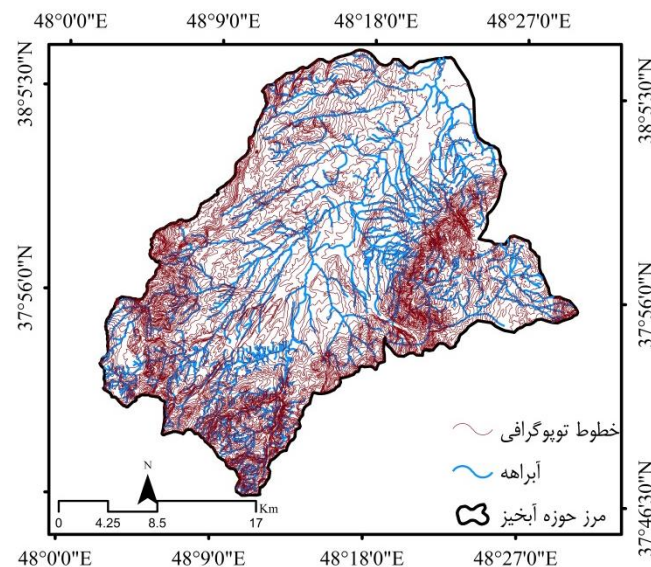
۳- مواد و روش

۳-۱- مدل IntErO

برای اجرای مدل IntErO، ۲۶ داده ورودی، شامل ویژگی‌های هندسی، توپوگرافی، حداکثر جریان خروجی، هیدرولوژی، داده‌های هواشناسی و داده‌های مرتبط با شدت فرسایش حوزه آبخیز، مورد نیاز است.

۳-۱-۱- ویژگی‌های هندسی

اولین داده مورد نیاز برای ورود به نرم‌افزار گرافیکی مدل IntErO، داده‌های مرتبط با ویژگی‌های هندسی حوزه کوزه‌تپراقی‌ست که عبارتند از مساحت حوزه آبخیز (F) بر حسب کیلومترمربع، محیط حوزه آبخیز (O) بر حسب کیلومتر، طول آبراهه اصلی (Lv) بر حسب کیلومتر، مساحت بخش بزرگ‌تر حوزه (Fv) بر حسب کیلومترمربع، مساحت بخش کوچک‌تر حوزه (Fm) بر حسب کیلومترمربع و طول حوزه آبخیز (Lb) بر حسب کیلومتر. برای محاسبه این ویژگی‌ها از نقشه رقومی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، آبراهه ۱:۲۵۰۰۰ و مرز کل حوزه و زیرحوزه‌های آبخیز کوزه‌تپراقی استفاده شد (شکل ۲).



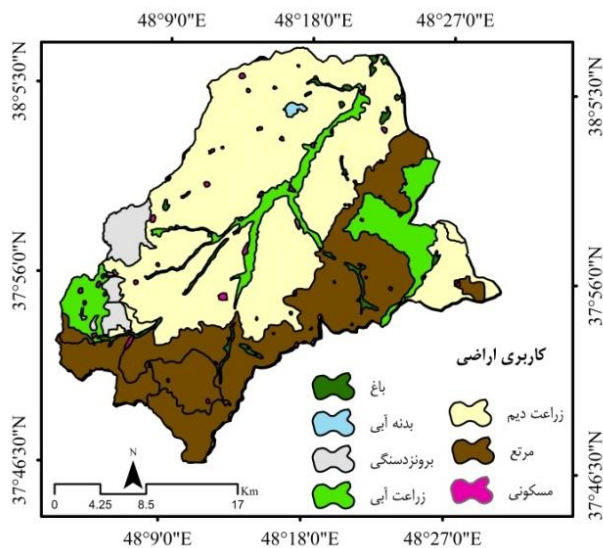
شکل ۲: شبکه خطوط توپوگرافی و آبراهه حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

۳-۱-۲- ویژگی‌های توپوگرافی

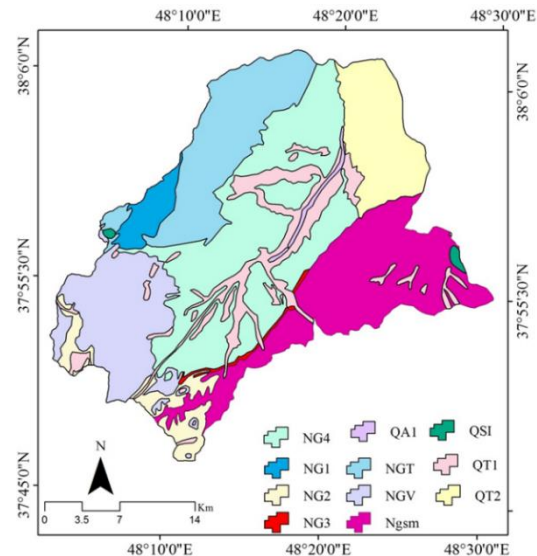
بخش دوم داده‌های ورودی به نرم‌افزار مدل IntErO شامل طول خط تراز (L_{iz}) بر حسب کیلومتر، مساحت بین خطوط تراز مجاور (f) بر حسب کیلومترمربع، مقدار کم‌ترین خط تراز (h_0) بر حسب متر، مسافت مساوی (Δh) بر حسب متر، پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوزه آبخیز (H_{min}) بر حسب متر (m) و بالاترین نقطه ارتفاعی حوزه آبخیز (H_{max}) بر حسب متر بودند. برای محاسبه این متغیرها نیز از نقشه‌های رقومی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، آبراهه و مرز کل حوزه و زیرحوزه‌های آبخیز کوزه‌تپراقی استفاده شد (شکل ۲).

۳-۱-۳- ویژگی‌های حداکثر جریان خروجی

بر اساس دستورالعمل مدل IntErO، مناطق دارای مقادیر مختلف نفوذپذیری و کاربری زمین در تولید حداکثر جریان خروجی حوزه آبخیز تأثیر دارند. به همین منظور، با استفاده از نقشه رقومی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ که در شکل ۳ ارائه شده است، مساحت کل حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی به سه بخش مساحت دارای نفوذپذیری بالا (fp)، نفوذپذیری متوسط (fpp) و نفوذپذیری کم (fo) بر حسب درصد تقسیم‌بندی شد. طبق راهنمای مدل IntErO، سنگ‌های آهکی، ماسه و شن دارای نفوذپذیری بسیار بالا، شیبست، مارن و ماسه‌سنگ‌ها دارای نفوذپذیری متوسط و نهایتاً رس سنگین و سنگ‌های آتشفشانی متراکم شده دارای نفوذپذیری ضعیف هستند. همچنین براساس نقشه کاربری اراضی آبخیز کوزه‌تپراقی (شکل ۴)، مساحت بخش‌هایی از حوزه که دارای پوشش جنگلی (fs)، پوشش گراس، علف‌زار، چراگاه و باغ (ft) و زمین‌های بایر، علف‌زار، شخم‌خورده و بدون پوشش علفی (fg) هستند، بر حسب درصد مورد محاسبه قرار گرفت.



شکل ۴: نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

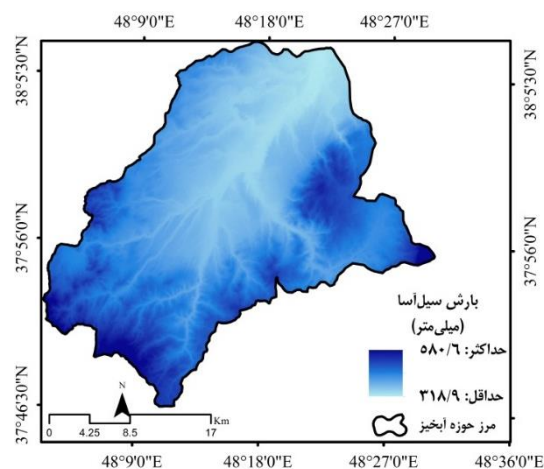
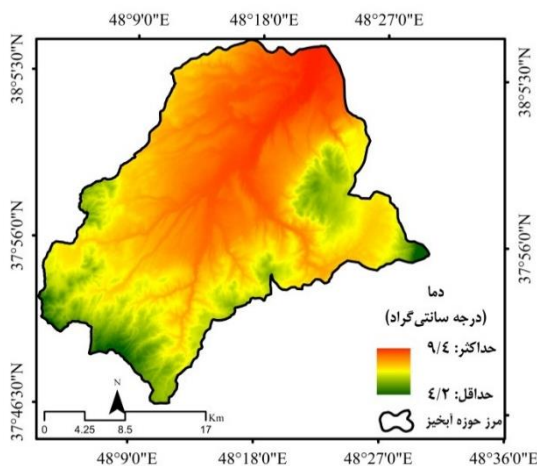
۳-۱-۴- ویژگی‌های هیدرولوژی و هواشناسی

برای ادامه محاسبات ورودی‌های مدل IntErO، داده‌های هیدرولوژیکی شامل مجموع طول آبراهه‌ها با رتبه ۱ و ۲ ($\sum L$) بر حسب کیلومتر و کوتاه‌ترین فاصله بین سرشاخه‌ها و خروجی (L_m) بر حسب کیلومتر با استفاده از نقشه رقومی آبراهه‌ها در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ محاسبه شدند. براساس داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های واقع در داخل و اطراف حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی، در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۲)، ارتفاع بارندگی سیل‌آسا (h_b) محاسبه شد (شکل ۵). علاوه بر این نقشه متوسط درجه حرارت سالانه (t_0) و متوسط بارش سالانه (H_{god}) تهیه شد، که به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا با استفاده از گرادیان ارتفاع، برای هر یک از داده‌ها روابط زیر استخراج شد (رابطه‌های ۱ و ۲). سپس این رابطه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 با کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM) به اجرا درآمدند.

$$P = 23/4H + 206/36 \quad R^2 = 0/724 \quad (1)$$

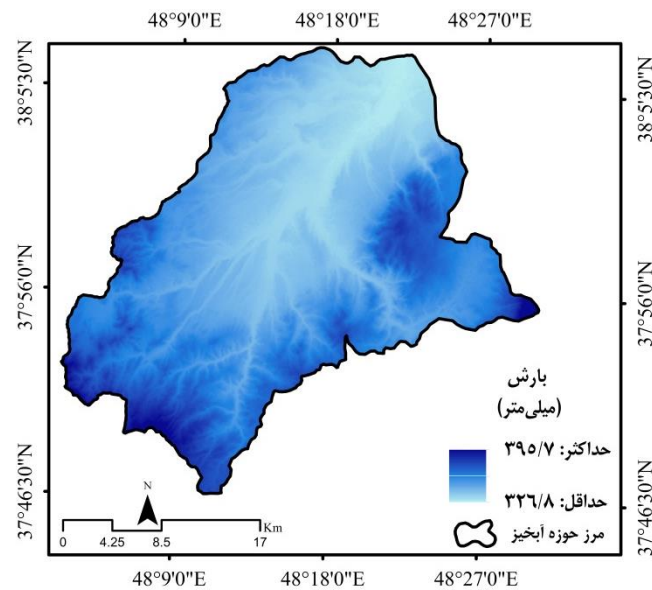
$$T = 2/18H + 1/71 \quad R^2 = 0/988 \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، P ، H و T به ترتیب بیان گر بارش بر حسب میلی‌متر، ارتفاع بر حسب متر و دما بر حسب درجه سانتی‌گراد هستند.



شکل ۵: نقشه بارش سیل‌آسا (میلی‌متر) در حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

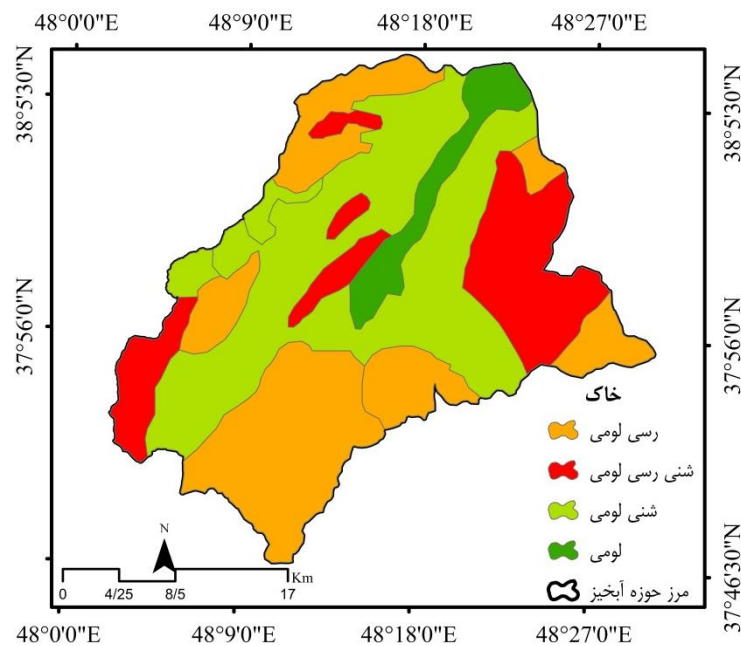
شکل ۶: نقشه دما (درجه سانتی‌گراد) حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی



شکل ۷: نقشه بارش (میلی‌متر) حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

۳-۱-۵- ویژگی‌های شدت فرسایش خاک

آخرین بخش، داده‌های مورد نیاز مدل IntErO، مربوط به شدت فرسایش خاک حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی بود که از نتایج مطالعات پیشین صورت گرفته در منطقه (Alaei *et al*, 2019a and b؛ Hazbavi *et al*, 2020) استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات عبارتند از ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y)، ضریب استفاده از زمین (Xa) و ضریب فرسایش منطقه‌ای (φ) که در سال ۱۳۹۷ و با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده است. برای محاسبه این ویژگی‌ها از نقشه بافت خاک منطقه مربوط به سال ۱۳۹۷ (شکل ۸) و مدل EPM (Esmali and Abdollahi, 2011) استفاده شد.



شکل ۸: نقشه بافت خاک حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

پس از محاسبه کلیه متغیرهای مورد نیاز برای ورود به مدل IntEro در محیط ArcGIS 10.8، برای کل حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی و تمامی ۳۶ زیرحوضه واقع در آن، بانک اطلاعاتی جامع در محیط Excel 2016 تهیه شد. سپس براساس بانک اطلاعاتی هر یک از زیرحوضه‌ها، در محیط گرافیکی نرم‌افزار مدل، به‌طور جداگانه فراخوان داده و مدل به اجرا درآمد.

۴- یافته‌ها (نتایج)

نتایج حاصل از محاسبه متغیرهای ورودی مدل برای کل حوضه آبخیز در جدول ۱ و نتایج متغیرهای خروجی حاصل از اجرای مدل برای کل حوضه آبخیز در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج مرتبط با ویژگی‌های فرسایشی حاصل از مدل IntEro برای ۳۶ زیرحوضه واقع در حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی در شکل ۹ ارائه شده است.

مطالعه‌ی ساختار زمین‌شناسی و خصوصیات خاک حوضه رودخانه براساس جریان نفوذپذیری بستر، حاکی از این است که؛ مساحتی از حوضه شامل نفوذپذیری بالا (fp) ۳۰ درصد، مساحتی از حوضه شامل نفوذپذیری متوسط (fpp) ۶۰ درصد، مساحتی از حوضه شامل نفوذپذیری کم (ft) ۱۰ درصد است. علاوه براین ضریب نفوذپذیری کل حوضه نیز (S_1) حدود ۰/۶۳ محاسبه شد. نتایج بررسی ویژگی پوشش گیاهی و استفاده از زمین نشان داد که بخش اصلی حوضه رودخانه تحت کاربری زراعی قرار دارد. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد، حوضه، عاری از پوشش جنگلی بوده و مناطق تحت پوشش علف‌زار، چراگاه و باغ (ft) ۳۰ درصد منطقه را پوشش داده‌است و مناطق شخم‌خورده، و بدون پوشش علفی (fg) و زمین‌های بایر، ۷۰ درصد منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. براساس نتایج خصوصیات هیدرولوژیکی با استفاده از نقشه آبراهه حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی، مجموع طول آبراهه‌های با رتبه ۱ و ۲ ($\sum L$) ۲۱۶/۳۹ کیلومتر و کوتاه‌ترین فاصله بین سرشاخه‌ها و خروجی ۴/۹۷ محاسبه شده است. نتایج بررسی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی، نشان داد که متوسط درجه حرارت سالانه (t_0) ۷/۷۷ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارش سالانه (H_{god}) ۳۴۴/۴۷ میلی‌متر و همچنین ارتفاع بارندگی سیل‌آسا ۲۳۳/۶۸ میلی‌متر است. همچنین ضریب استفاده از زمین (Xa) و ضریب فرسایش منطقه‌ای (ϕ) به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۶۴ برآورد شد. در بحث ویژگی‌های فرسایش خاک و رواناب، نتایج نشان‌دهنده این مساله است که، غالب فرسایش حوضه، از نوع سطحی و شیاری بوده که در قسمت‌های شمالی و قسمت‌های جنوبی حوضه آبخیز به‌خوبی مشاهده می‌شود.

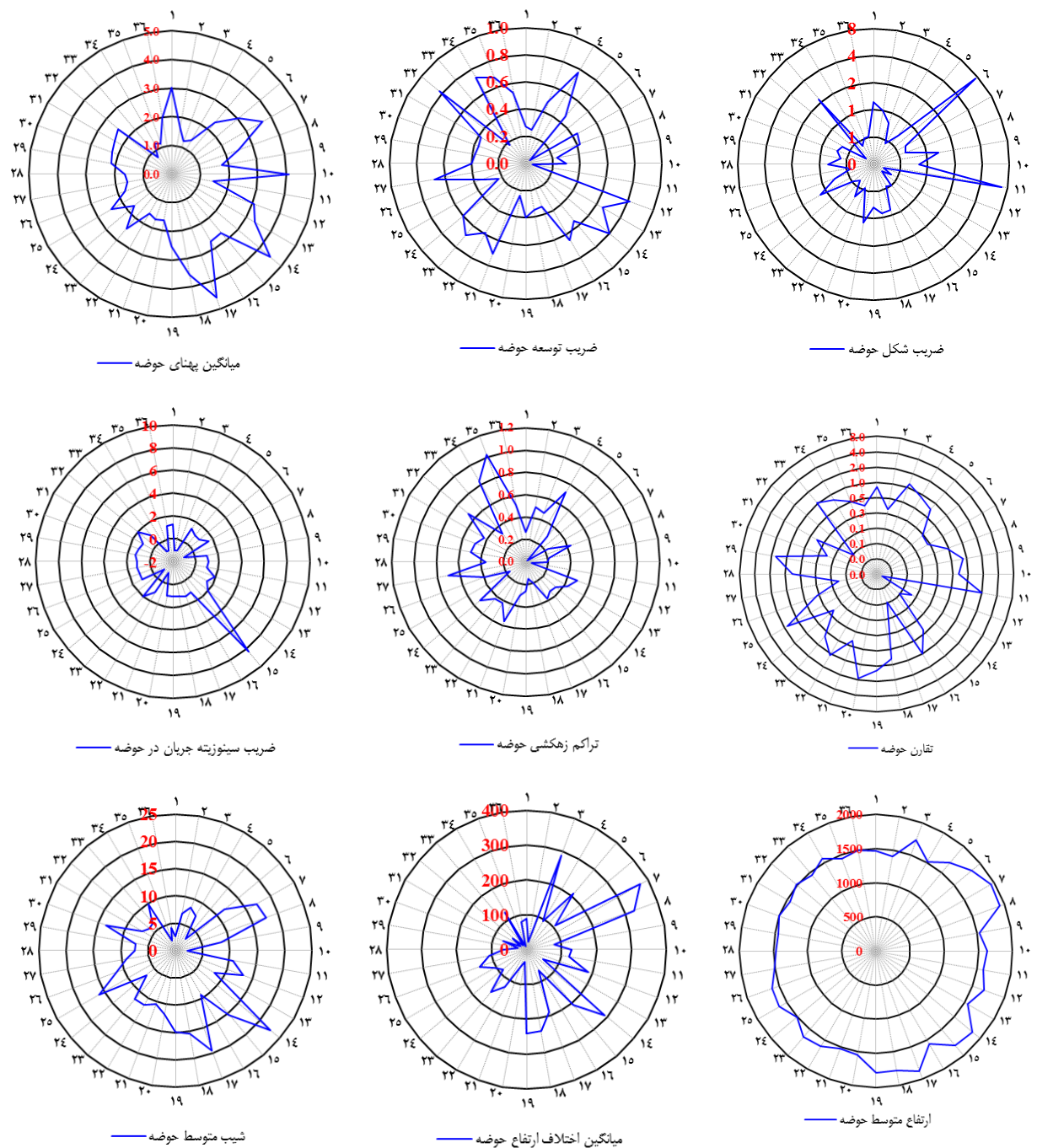
با استفاده از مدل IntEro، ضریب شکل حوضه رودخانه (A) حدود ۰/۷ محاسبه شد که نشان‌دهنده کشیده بودن حوضه آبخیز مورد مطالعه است (جدول ۲). نتایج نشان داد که در آبخیز کوزه‌تپراقی زیرحوضه ۶ با مقدار ۷/۵۴ و زیرحوضه ۳۲ با مقدار ۰/۳۲ به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر ضریب شکل حوضه رودخانه (A) را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۹). ضریب توسعه حوضه رودخانه (m) و میانگین پهنای حوضه رودخانه (B) به ترتیب ۰/۴۱ و ۲/۴۵ است. همچنین معیار تراکم زهکشی حوضه با میانگین و انحراف معیار ۰/۲۷ و ۰/۲۱ کیلومتر برکیلومتر مربع محاسبه شد که حداقل و حداکثر مقادیر، مربوط به زیرحوضه‌های ۳۵ و ۶ بود (جدول ۲ و شکل ۹). نتایج بررسی شیب متوسط حوضه حاکی از این است که، حداکثر و حداقل شیب متوسط، در زیرحوضه‌های ۱۴ و ۳۵ به ترتیب با مقدار عددی ۲۲/۷۷ و ۲/۰۴ درصد دیده می‌شود. ضریب سینوزیته جریان در حوضه رودخانه ۸/۳۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی حالت مستقیم جریان رودخانه است (جدول ۲ و شکل ۹).

جدول ۱: نتایج حاصل از محاسبه ورودی‌های موردنیاز مدل IntErO برای کل حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

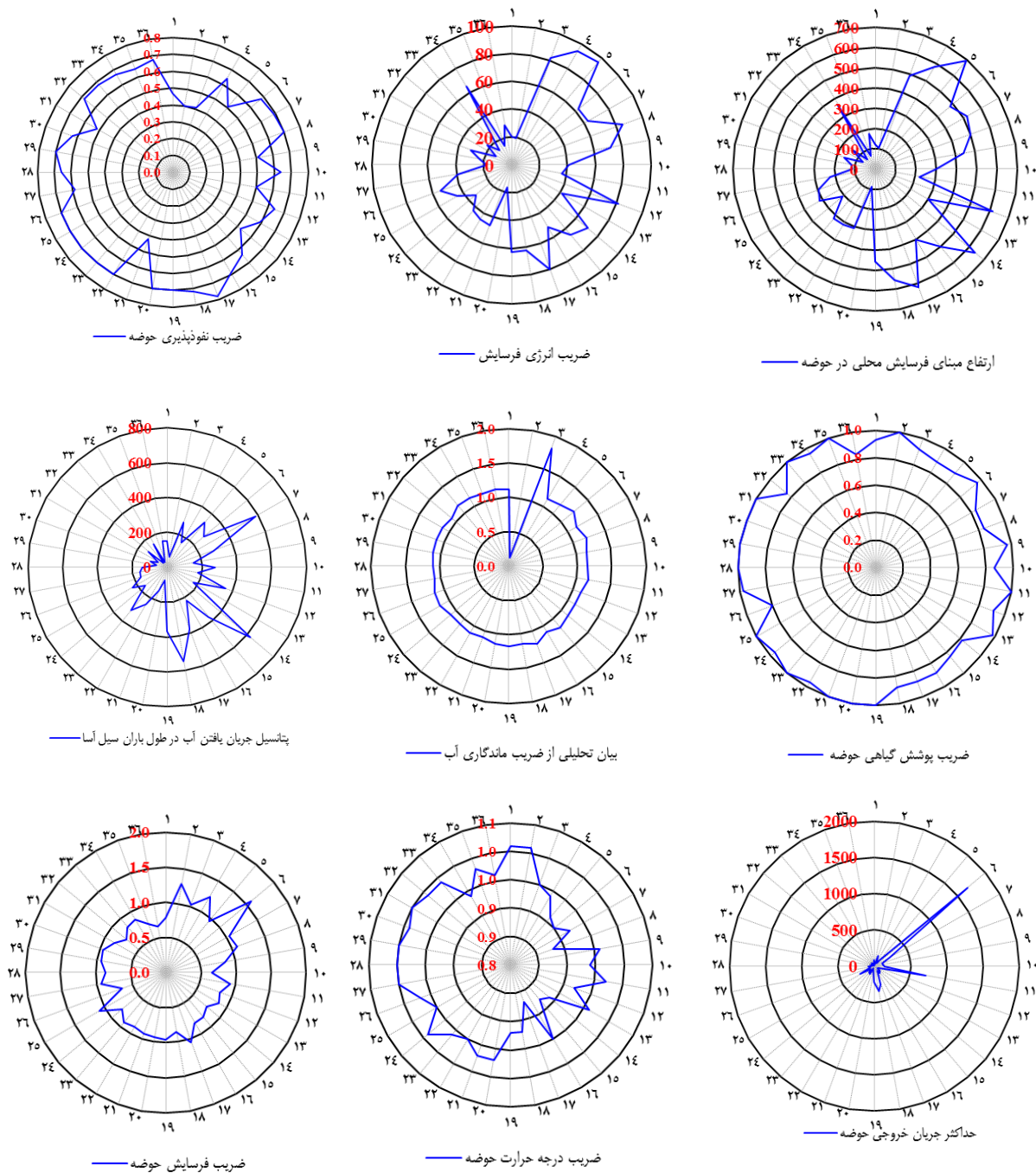
ویژگی	معیار	نماد	واحد	مقدار
هندسی	مساحت حوزه آبخیز	F	کیلومترمربع	۸۰۱/۴۰
	محیط حوزه آبخیز	O	کیلومتر	۱۴۸/۹۸
	طول آبراهه اصلی	L _v	کیلومتر	۴۱/۲۸
	مساحت بخش بزرگ‌تر حوزه آبخیز	F _v	کیلومترمربع	۵۱۵/۰۶
	مساحت بخش کوچک‌تر حوزه آبخیز	F _m	کیلومترمربع	۲۸۶/۳۴
	طول حوزه آبخیز	L _b	کیلومتر	۳۲۶/۶۲
توپوگرافی	طول خط تراز	L _{iz}	کیلومتر	۶۸/۱۸
				۹۳/۹۵
				۷۸/۱۷۵
				۶/۲۱۱
				۵۴/۲۳۵
				۶۴/۱۷۹
				۸۷/۱۲۷
				۴۶/۱۰
				۹۱/۲
	مساحت بین خطوط تراز مجاور	F	کیلومترمربع	۵۱/۴۴
				۸۷/۱۰۸
				۰۸/۱۲۰
				۵۲/۱۱۰
				۷۶/۱۹۸
				۴۹/۷۵
				۳۳/۸۷
				۵۵/۳۴
				۶۳/۱۵
				۶۷/۵
	مقدار کم‌ترین خط تراز	h ₀	متر	۱۳۸۰/۰۰
	مسافت مساوی	Δ _h	کیلومتر	۱۰۰/۰۰
	پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوزه آبخیز	H _{min}	متر	۱۳۷۸/۰۰
	بالا‌ترین نقطه ارتفاعی حوزه آبخیز	H _{max}	متر	۲۳۴۹/۰۰
حداکثر جریان خروجی	مساحتی از حوزه آبخیز شامل نفوذپذیری بالا	f _p	درصد	۳۰
	مساحتی از حوزه آبخیز شامل نفوذپذیری متوسط	f _{pp}	درصد	۶۰
	مساحتی از حوزه آبخیز شامل نفوذپذیری کم	f _o	درصد	۱۰
	مساحتی از حوزه آبخیز با پوشش جنگلی	f _s	درصد	۰/۰۰
	مساحتی از حوزه آبخیز با پوشش گراس، علفزار، چراگاه و باغ	f _t	درصد	۳۰
	مساحتی از حوزه آبخیز با زمین‌های بایر، علفزار، شخم‌خورده و بدون پوشش علفی	f _g	درصد	۷۰
هیدرولوژیکی	مجموع طول آبراهه‌های با رتبه ۱ و ۲	ΣL	کیلومتر	۲۱۶/۳۹
	کوتاه‌ترین فاصله بین سرشاخه‌ها و خروجی	L _m	کیلومتر	۴/۹۷
	ارتفاع بارندگی سیل‌آسا	h _b	میلی‌متر	۲۳۳/۶۸
هواشناسی	متوسط درجه حرارت سالانه	t ₀	درجه سانتی‌گراد	۷/۷۷
	متوسط بارش سالانه	H _{god}	میلی‌متر	۳۴۴/۴۷
داده‌های شدت فرسایش خاک	ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش	Y	بدون واحد	۱/۱
	ضریب استفاده از زمین	X _a	بدون واحد	۰/۷۸
	ضریب فرسایش منطقه‌ای	φ	بدون واحد	۰/۶۴

جدول ۲: نتایج حاصل از مدل IntErO برای کل حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

مقدار	واحد	نماد	خروجی
۰/۷	بدون واحد	A	ضریب شکل
۰/۴۱	بدون واحد	m	ضریب توسعه
۲/۴۵	کیلومتر	B	میانگین پهنای حوزه آبخیز
۰/۵۷	بدون واحد	a	تقارن حوزه آبخیز
۰/۳۷	کیلومتر بر کیلومترمربع	G	تراکم شبکه زهکشی
۸/۳۳	بدون واحد	K	ضریب سینوزیته جریان
۱۶۸۱/۳۷	متر	H _{sr}	ارتفاع متوسط
۳۰۳/۳۷	متر	D	میانگین اختلاف ارتفاع
۱۳/۲۱	درصد	I _{sr}	شیب متوسط
۸۷۱/۰۰	متر	H _{ieb}	ارتفاع مبنای فرسایش محلی در حوزه آبخیز
۵۲/۱۱	بدون واحد	E _r	ضریب انرژی فرسایش
۰/۶۳	بدون واحد	S ₁	ضریب نفوذپذیری
۰/۹۱	بدون واحد	S ₂	ضریب پوشش گیاهی
۱/۰۳	متر	W	بیان تحلیلی از ضریب ماندگاری آب به‌عنوان درصدی از جریان ورودی
۲۱۸۴/۰۲	متر بر کیلومتر در ثانیه	2 _g DF ^{1/2}	پتانسیل انرژی جریان آب در طول باران‌های سیل‌آسا
۸۹۹/۶۹	مترمکعب در ثانیه	Q _{max}	حداکثر جریان خروجی
۰/۹۴	بدون واحد	T	ضریب درجه حرارت
۰/۸۷	بدون واحد	Z	ضریب فرسایش
۲۰۴۸۲/۸۲	مترمکعب در سال	W _{god}	کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطحی
۰/۲۶	بدون واحد	Ru	ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش
۱۷۳۷۰۴/۹	مترمکعب در سال	G _{god}	فرسایش خاک واقعی
۲۱۵/۵	مترمکعب بر کیلومترمربع در سال	G _{god} /km ²	فرسایش خاک واقعی ویژه



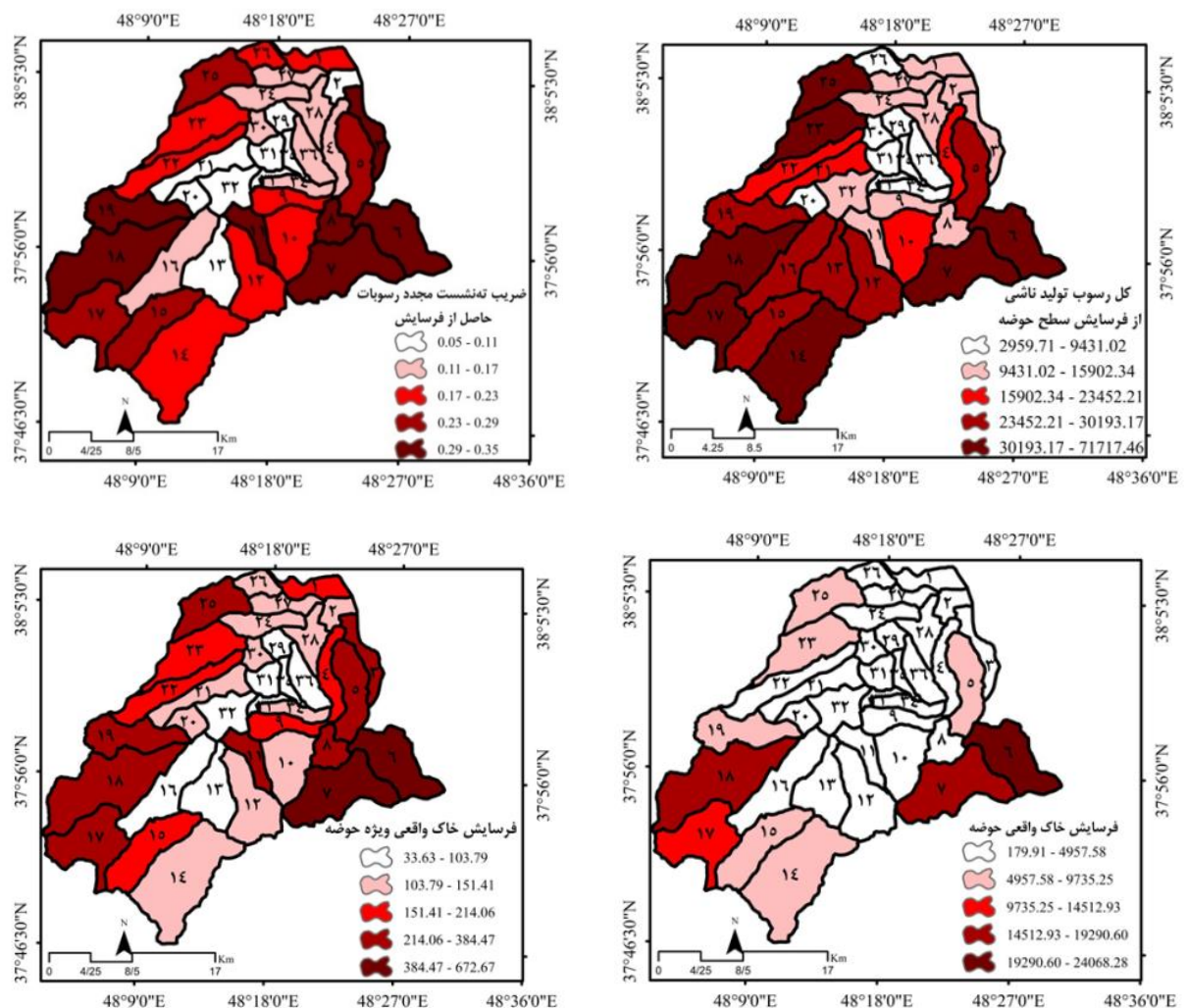
شکل ۹: نتایج حاصل از مدل IntERO برای حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی



ادامه شکل ۹: نتایج حاصل از مدل IntErO برای حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی

ارتفاع مبنای فرسایش محلی در حوضه رودخانه کوزه‌تپراقی ۸۷۱ متر و ضریب انرژی فرسایش با توجه به اختلاف ارتفاع به فاصله افقی حوضه رودخانه ۵۲/۱۱ محاسبه شد. علاوه بر این، حداکثر و حداقل ضریب انرژی فرسایش را به ترتیب زیرحوضه‌های ۵ و ۳۱ به خود اختصاص دادند (جدول ۲ و شکل ۹). بررسی نتایج ضریب نفوذپذیری حوضه نشان داد که زیرحوضه ۱۷ با مقدار عددی ۰/۷۸ حداکثر نفوذپذیری و زیرحوضه ۲ با مقدار عددی ۰/۴۰ حداقل مقدار را دارند. از این رو مشخص شد که زیرحوضه‌های بالادست از نفوذپذیری بیشتری برخوردارند. این نتایج گویای این مساله است که زیرحوضه‌هایی با مقادیر عددی ضریب نفوذپذیری بیشتر، دارای اراضی مرتعی بوده و از این رو وجود پوشش گیاهی علفی، موجب نفوذ بیشتر آب در حوضه می‌شود. ضریب پوشش گیاهی حوضه با میانگین و انحراف معیار ۰/۹۴ و ۰/۰۷ به دست آمد که در بیشتر زیرحوضه‌ها مقدار عددی این ضریب برابر با یک بود (جدول ۲ و شکل ۹). نتایج پتانسیل انرژی جریان آب در طول باران‌های سیل‌آسا با میانگین

۲۱۸۴/۰۲ متر بر کیلومتر در ثانیه به‌دست آمد که حداکثر و حداقل آن به‌ترتیب به زیرحوضه‌های ۱۴ و ۳۳ اختصاص دارد. حداکثر جریان خروجی در زیرحوضه ۶ با مقدار عددی ۱۶۷۶/۸۵ مترمکعب در ثانیه و حداقل آن در زیرحوضه ۲ با مقدار عددی ۳/۱۳ مترمکعب در ثانیه محاسبه شد (شکل ۹). براساس نتایج حاصل از محاسبه ویژگی‌های فرسایشی، نقشه‌های مرتبط با کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطح حوضه (Wgod)، ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش (Ru)، فرسایش خاک واقعی حوضه (Ggod) و فرسایش خاک واقعی ویژه حوضه ($Ggod/km^2$) ترسیم شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از محاسبه ویژگی‌های فرسایشی برای ۳۶ زیرحوضه آبخیز کوزه‌تپراقی

نتایج نشان می‌دهد که مقدار میانگین و انحراف ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش برای کل حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی برابر با 0.26 ± 0.09 بوده است. حداکثر و حداقل مقدار ضریب شدت فرسایش خاک، به‌ترتیب در زیرحوضه‌های ۶ و ۱۰ برآورد شد. نتایج به‌دست آمده بیانگر این مساله است که، اکثر زیرحوضه‌های مورد مطالعه فرسایش شدیدی دارند. کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطح حوضه با میانگین و انحراف معیار $20482/82$ و $15650/84$ مترمکعب در سال محاسبه شد که حداکثر و حداقل آن، به‌ترتیب در زیرحوضه‌های ۶ و ۳۳ به چشم می‌خورد. علت بالا بودن مقدار فرسایش ویژه در زیرحوضه ۶ را می‌توان با بهره‌برداری شدید صورت گرفته در آن مرتبط دانست (شکل ۱۰). هم‌چنین در این زیرحوضه، تقریباً

مقادیر بالایی از شیب، تراکم جاده، ارتفاع رواناب و میزان بارندگی بالا مشاهده شده (Hazbavi et al, 2020) که تأییدکننده اثرهم‌افزایی عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی در وقوع فرسایش بالا در این زیرحوضه است. توزیع مکانی شاخص‌های فرسایش و رسوب در شکل ۱۰ مؤیداین مساله است که اکثر زیرحوضه‌های مورد مطالعه در وضعیت متوسط قرار گرفته‌اند. محاسبه شاخص‌های مورد بررسی نشان داد که بهره‌برداری بیش از حد، موجب ایجاد اختلال در عملکرد مناطق پایین‌دست حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی شده‌است. براساس محاسبات صورت گرفته، کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطح حوضه W_{god} برابر با $222854/65$ مترمکعب در سال است. ضریب ته‌نشست مجدد رسوبات حاصل از فرسایش (Ru) برابر با $0/26$ محاسبه شد. فرسایش خاک واقعی حوضه (G_{god}) و فرسایش خاک واقعی ویژه حوضه (G_{god}/km^2) به‌ترتیب $172704/90$ مترمکعب در سال و $215/50$ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال محاسبه شدند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

ویژگی‌های ریخت‌شناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هواشناسی از جمله عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش و رسوب یک حوزه آبخیز است. در همین راستا، در پژوهش حاضر، مدل IntErO با قابلیت نمایش گرافیکی و کاربرد آسان مورد استفاده قرارگرفت در این مدل، تمام ویژگی‌های مؤثر بر فرآیند فرسایش و رسوب را برای برآورد مؤلفه‌های فرسایش و رسوب حوزه آبخیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان‌دهنده تغییرپذیری مکانی مؤلفه‌های فرسایش و رسوب در سطح حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی واقع در استان اردبیل بوده است. بنابراین اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و مدیریتی و اتخاذ بهترین اقدامات مدیریتی از جمله تولید رواناب، جمع‌آوری آب باران، توسعه گردشگری و غیره باید متناسب و مطابق با تغییرپذیری هر کدام از ۲۲ مؤلفه فرسایشی به‌دست آمده از مدل مورد مطالعه صورت گیرد. علاوه براین برآورد ضریب فرسایش حوضه، در حدود $0/87$ نشان می‌دهد حوزه آبخیز مورد مطالعه از شدت فرسایش شدید برخوردار است. در راستای این نتایج، Alaei و همکاران (۱۳۹۸) مقدار عددی ضریب فرسایش حوضه را برای کل حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی برابر $1/02$ گزارش کردند. اجمالاً نتایج نشان داد که مقادیر فرسایش خاک واقعی ویژه در پایین‌دست حوزه آبخیز مورد مطالعه بیش‌تر از بالادست است. نتایج حاضر با نتایج به‌دست آمده Alaei و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر بالا بودن میزان حساسیت بوم‌شناختی مناطق پایین‌دست حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی نسبت به مناطق بالادست هم‌خوانی دارد. بر اساس نتایج حاصل از کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطحی و ضریب ته‌نشست مجدد رسوب، می‌توان اذعان کرد که بایستی برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی بر اساس اولویت به زیرحوضه‌های واقع در بالادست حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی اختصاص داده شود. زیرا با کنترل رسوب در بالادست می‌توان مدیریت بهتری در کل حوزه آبخیز اتخاذ نمود. نتایج مطالعات Alaei و همکاران (۲۰۱۹) الف نشان داد که بخش غربی حوزه آبخیز دارای کم‌ترین پیوستگی سیمای سرزمین و در اولویت برنامه‌های حفاظتی هستند که با مناطق تحت خطر فرسایش به‌دست آمده در پژوهش حاضر دارای هم‌پوشانی هستند. در پژوهشی دیگر، Hazbavi و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تغییرات مکانی سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی اذعان کردند که ۶۱ درصد از حوضه در طبقه متوسط قرار دارد. هم‌چنین مشخص شد که عمده فشار وارده بر وضعیت سلامت اکولوژیکی آبخیز مورد مطالعه مرتبط با عوامل هیدرولوژی و اقلیمی است که فرآیند فرسایش خاک در درجه اول برآیند تعامل همین دو عامل نام‌برده است. علاوه بر این، مطالعات مختلفی از جمله Jahantigh و Jahantigh (۲۰۲۰) و Asghari Sarasekanrood و همکاران (۲۰۱۹) به متفاوت بودن نقش کاربری‌ها در میزان و شدت فرآیندهای فرسایش خاک و رسوب‌گذاری اشاره کرده‌اند که با نتایج این مطالعه، هم‌خوانی داشت. به‌نحوی که در کاربری‌های مختلف تغییرپذیری مکانی زیادی بین مؤلفه‌های فرسایش و رسوب حاصله مشاهده شد. طبق نتایج مشخص شد که به‌جزء مؤلفه‌های ارتفاع متوسط حوضه، ضریب ماندگاری آب، ضریب نفوذپذیری و ضریب پوشش گیاهی که دارای تغییرپذیری کم و یا یکنواخت در سطح ۳۶ زیرحوضه مورد مطالعه بوده‌اند، سایر مؤلفه‌ها دارای تغییرپذیری مکانی زیادی هستند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که مدیران اجرایی با توجه به میزان بودجه اختصاص داده شده و نیز هدف اصلی، نسبت به کنترل مؤلفه‌های فرسایشی مهم و دارای اولویت بالا اقدام نمایند.

در خصوص کاربرد مدل IntErO در ایران، Khaledi Darvishan و همکاران (۲۰۱۸) شدت فرسایش در حوزه آبخیز خامسان واقع در کردستان را درحد متوسط بیان کردند. Spalevic و همکاران (۲۰۱۶) فرسایش سطحی در زیرحوضه S7-2 واقع در حوزه آبخیز شیرین‌دره، شمال شرق ایران با مساحت ۲۵ کیلومتر مربع را مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج به‌دست آمده، مقدار کل رسوب تولیدی برابر با ۱۵۱۹۱ متر مکعب در سال، و فرسایش واقعی خاک را برابر با ۴۳۹۷ مترمکعب بر کیلومترمربع و میزان فرسایش واقعی ویژه آن را برابر با ۱۷۸ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال بوده است. علاوه براین، حداکثر جریان خروجی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله را برابر با ۶۵ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شد. در نپال، Chalise و همکاران (۲۰۱۹) با مقایسه نتایج حاصل از دو مدل RUSLE و IntErO بیان کردند که علی‌رغم ارائه نتایج توزیعی توسط مدل RUSLE در محیط ArcGIS، مدل IntErO قابلیت نمایش اطلاعات بیش‌تری دارد و در تعیین هدررفت خاک در سیمای یک سرزمین از اهمیت زیادی برخوردار است. به عنوان نمونه مدل RUSLE تنها مقدار فرسایش واقعی خاک را محاسبه می‌کند، اما مدل IntErO، علاوه بر آن تولید رسوب را نیز ارائه می‌دهد و امکان محاسبه نسبت تحویل رسوب را فراهم می‌کند. نتایج به‌دست آمده، میزان هدررفت سالانه خاک حاصل از اندازه‌گیری‌های کرت فرسایشی، RUSLE و IntErO را به ترتیب برابر با ۹/۵، ۶/۴ و ۱۰/۷۴ تن بر هکتار برآورد کرد. این مساله نشان می‌دهد که، نتایج حاصل از مدل IntErO نزدیک‌تر به مقدار اندازه‌گیری کرت‌های فرسایشی در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۸ بوده است. در این پژوهش، مقدار کل رسوب تولیدی ناشی از فرسایش سطحی برابر با ۹۳۶۴۳۰/۶۵ مترمکعب در سال برای حوزه آبخیز با مساحت ۸۷۱/۶۴ کیلومتر مربع محاسبه شد. از آن‌جا که، مدل RUSLE تنها فرسایش شیاری و بین شیاری را تخمین می‌زند و مشارکت سایر فرآیندهای ژئومورفولوژیکی از قبیل شیارهای بزرگ، فرسایش خندقی، فرسایش کناره رودخانه‌ای و رودخانه‌ای و نیز زمین‌لغزش را لحاظ نمی‌کند. به‌همین دلیل نتایج حاصل از مدل IntErO بالاتر از نتایج مدل RUSLE ذکر شده است.

از آن‌جایی که مدیریت خاک شامل شش جزء اصلی از جمله استفاده از میزان و نوع مناسب خاک‌ورزی، نگهداری مواد آلی، نگهداری مواد مغذی مناسب گیاهان، جلوگیری از آلودگی، حفظ تعادل اسیدیته و کنترل فرسایش خاک است (Simmons and Nafziger, 2014)، نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند در مدیریت مناسب خاک، به عنوان کلید تولید پایدار کشاورزی و استفاده بهینه از منابع طبیعی (Spalevic et al, 2014) قابلیت کاربرد داشته باشد. پیشنهاد می‌شود، قابلیت کاربرد مدل IntErO با سایر مدل‌های ارزیابی فرسایش و رسوب در شرایط مختلف آب و هوایی و اکولوژیکی مورد مقایسه قرار گیرد. علاوه براین توصیه می‌شود، در مطالعات آتی به تحلیل میزان اثرگذاری هر کدام از مؤلفه‌ها بر مقدار فرسایش حوزه آبخیز پرداخته، و واسنجی نتایج حاصل از مدل مورد مطالعه در حوزه‌های آبخیز دارای آمار به منظور ارائه جمع‌بندی مناسب و دقیق مورد توجه قرار گیرد.

۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از کمک‌های جناب آقای مهندس محمدحسین قویمی‌پناه در تحلیل داده‌ها در محیط ArcGIS تشکر و قدردانی نمایند.

فهرست منابع

1. Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., Sharari, M., Hazbavi, Z. 2019a. Assessment and comparison of landscape connectivity of KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. Iranian Journal of Applied Ecology. 8(4): 19-34. (In Persian)
2. Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., Hazbavi, Z., Sharari, M. 2019b. Assessment and comparison of watershed integrity indices in hydrologic units of KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. M.Sc. Thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Faculty of Agriculture and Natural Resources Department of Natural Resources. 128 p. (In Persian)
3. Asghari Saraskanroud, S., Faal Naziri, M., Ardashirpay, A.A. 2019. Studying the effects of land use on soil erosion with WLC algorithm. Case of study: Agh Laghan Chay Basin. Environmental Erosion Research Journal. 2019; 9(2): 53-71. (In Persian)

4. Ashraf, A., 2019. Risk modeling of soil erosion under different land use and rainfall conditions in Soan River Basin, Sub-Himalaya region and mitigation options. *Modeling Earth Systems and Environment*. 6: 417-428.
5. Barovic, G., Leandro Naves Silva, M., Veloso Gomes Batista., P., Vujacic, D., Soares Souza, W., Cesar Avanzi, J., Behzadfar, M., Spalevic, V. 2015. Estimation of sediment yield using the IntEro model in the S1-5 Watershed of the Shirindareh River Basin, Iran. *Agriculture & Forestry*. 61(3): 233-243.
6. Biro, K., Pradhan, B., Buchroithner, M., Makeschin, F. 2013. Land use/land cover change analysis and its impact on soil properties in the Northern part of Gadarif region, Sudan. *Land Degradation and Development*, 24: 90-102.
7. Chalise, D., Kumar, L., Spalevic V., Skataric, G. 2019. Estimation of sediment yield and maximum outflow using the IntErO model in the Sarada River Basin of Nepal. *Water*. 11(15): 25-39.
8. Djekovic, V., Andjelkovic, A., Milosevic, N., Gajic, G., Janic, M. 2013. Effect of reservoir on flood-wave transformation. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. North University Center of Baia Mare. 8(2): 107-112.
9. Esmali, A., Abdollahi, Kh. 2011. Watershed management and Soil conservation. University of Mohaghegh Ardabili. Second press, 574 p. (In Persian)
10. Hazbavi, Z., Parchami, N., Alaei, N., Babaei, L. 2020. Assessment and analysis of the KoozehTopraghi Watershed health status, Ardabil Province, Iran. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*. 9(3): 121-142.
11. Hessel, R., Jetten, V. 2007. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a Small Loess Plateau Catchment. *Engineering Geology*. 91: 56-71.
12. Jahantigh, M., Jahantigh, M. 2020. Investigating of land use change effect on some soil physical-chemistry characteristics and erosion in arid areas (Case study: Hirmand of Sistan). *Environmental Erosion Research Journal*. 9(4): 92-118. (In Persian)
13. KatebiKord, A., Homayounfar, V., Khaledi Darvishan, A.V., Mohamad Amini, H. 2015. Introducing the IntErO model for estimating the maximum outflow and soil erosion intensity in the watershed scale. 10th Watershed Management Sciences and Engineering Conference (Adaptive Watershed Management), February 18-19, 2015, Birjand, 7 p. (In Persian)
14. Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.N., Pachepsky, Y., van der Putten, W.H. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*. 2: 111-128.
15. Khaledi Darvishan, A., Derikvandi, M., Aliramaee, R., Khorsand, M., Spalevic, V., Gholami, L., Vujacic, D. 2018. Efficiency of IntEro Model to Predict Soil Erosion Intensity and Sediment Yield in Khamsan Representative Watershed (West of IRAN). *AGROFOR International Journal*. 3(2): 22-31.
16. Lal, R. 2020. Managing soils for resolving the conflict between agriculture and nature: the hard talk, *European Journal of Soil Science*. 71(1): 1-9.
17. Lai, Y. G., Greimann, B.P. 2010. Predicting contraction scour with two dimensional depth averaged model. *Journal of Hydraulic Research*. 48(3): 383-387.
18. Lai, Y.G., Greimann, B.P. 2008. Rock erosion modeling on selected alluvial rivers in Taiwan, Technical Report SRH-2008-08, Technical Service Center, Bureau of Reclamation. Denver, CO.
19. Mohamadi, S. 2017. The efficiency of artificial neural network, neuro-fuzzy and multivariate regression models for runoff and erosion simulation via rainfall simulator. *Environmental Erosion Research Journal*. 25(1): 90-113. (In Persian)
20. Morgan, R.P.C. 1996. Soil erosion and conservation. Second Edition. Silsee Colleg. Cranfield University:198 p.
21. Prokop, P., Poręba, G.J. 2012. Soil erosion associated with an upland farming system under population pressure in Northeast India. *Land Degradation and Development*. 23: 310-321.
22. Rosas, M.A., Gutierrez, R. 2020. Assessing soil erosion risk at national scale in developing countries: the technical challenges, a proposed methodology and a case history, *Science of the Total Environment*. doi: /10.1016/j.scitotenv.2019.135474
23. Shen, Z., Chen, L., Hong, Q., Qiu, J., Xie, H., Liu, R. 2013. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area. *Science of the Total Environment*. 454-455: 383-392.
24. Simmons, W.F., Nafziger, E.D. 2014. Soil management and tillage. *Illinois Agronomy Handbook*. 133-142.
25. Spalevic, V., Curovic, M., Tanaskovic, V., Djurovic, N., Lenaerts, T., Nyssen, J. 2014. Application of the IntErO model for the assessment of the soil erosion intensity and runoff of the River Basin, Dragovo Vrelo, Montenegro. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*. 1: 1072-1079.

26. Spalevic, V., Behzadifar, A., Tavares, A., Moteva, M., Tanaskovik, V. 2016. Soil loss estimation of S7-2 Catchment of the Shirindareh, Iran using the River Basin Model. *AgroFor International Journal*. 1(1): 113-116.
27. Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K.G. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. John Wiley & Sons.
28. Vrieling, A., Jong, S.M., Sterk, G., Rodrigue, S.C. 2009. Timing of erosion and satellite data: a multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 10: 267-281.
29. Wang, L., Zhang, F., Fu, S., Shi, X., Chen, Y., Jagirani, M., Zeng, Ch. 2019. Assessment of soil erosion risk and its response to climate change in the Mid-Yarlung Tsangpo River region. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 607-621
30. Wilson, G.V., Cullum, R.F., Römkens, M.J.M. 2008. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe. *Catena*. 73: 98-106.

Comprehensive Estimation of Erosion and Sediment Components using IntErO Model in the KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province

Zeinab Hazbavi^{*1}: Ph.D., Assistant Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Elham Azizi: M.Sc. Student in Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Zahra Sharifi: M.Sc. Student in Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Nazila Alaei: Former M.Sc. Student, Watershed Management Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Raof Mostafazadeh: Ph.D., Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Morteza Behzadfar: North Khorasan Provincial FRWO, Iran

Velibor Spalevic: Professor, Institute of Forestry and the University of Montenegro, Biotechnical Faculty, Podgorica, Montenegro

Article History (Received: 2020/04/12

Accepted: 2020/08/01)

Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion is one of the most important environmental issues that causes various ecological, social and economic problems. Today, the use of various models for estimating and predicting hydrological data of watersheds is increasing. Soil erosion risk assessment is a special form of land resources evaluation, and its purpose is to divide the land into small areas based on the type of erosion and its amount, which is essential in the soil conservation planning. Developing comprehensive soil erosion models applicable in different environmental conditions is highly important. The Intensity of Erosion and Outflow (IntErO) model is a new graphical model that has a user-friendly software and could present a comprehensive view from watershed erosional components. Awareness of important coefficients such as watershed development, river basin tortuousness, erosion energy of the basin's relief, the region's permeability, vegetation cover, and deposit retention coefficients that provided by IntErO model has a key role to adapt proper watershed management and conservative measures, particularly the best management practices (BMPs) that are currently considered by policymakers and executive managers.

2- Methodology

Due to the positive reports on the proper efficiency of the IntErO model in some parts of the areas such as Bosnia & Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Czech Republic, Italy, Brazil, and recently in North Khorasan and Kurdistan provinces, the present study was conducted with the aim of obtaining comprehensive information on the erosional characteristics of the KoozehTopraghi Watershed located in the southern part of Ardabil Province. The studied watershed with an area of 801.40 km² was divided into 36 sub-watersheds according to topographical and hydrological properties. Totally, the IntErO program package for estimating soil erosion and sediment yield components uses 26 input data including geometric,

¹ Corresponding Author: z.hazbavi@uma.ac.ir

topographic, maximum outflow, hydrological and soil erosion intensity properties. All primary maps for total watershed and its 36 sub-watersheds were processed and provided in the ArcGIS 10.6 environment. Then, according to the required standards of the model, the data bank was provided in the Excel 2016 environment and accordingly uploaded to the IntErO software. Finally, after running the IntErO model, 22 components related to the soil erosion process of KoozehTopraghi Watershed were obtained.

3- Results

According to the results of the IntErO model, the spatial variability was confirmed in relation to the most of erosional components through 36 sub-watersheds which indicate the diversity of ecological and biophysical conditions at the whole watershed. In general, the maximum and minimum of soil erosion coefficient (Z) were estimated in the sub-watersheds 6 and 10, respectively. According to the obtained results, most of the study sub-watersheds have experienced severe erosion. It was also found that the mean of the production of erosion material in the river basin (Wgod) was equal to $222854.65 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$, respectively whereby its minimum and maximum were obtained in the sub-watersheds 6 and 33, respectively. The reason for the high amount of specific sediment yield in some sub-watersheds can be attributed to their severe exploitation for human needs and consequently severe erosion. The results also showed that the mean value and standard deviation of the coefficient of the deposit retention (Ru) for the whole watershed was 0.26 ± 0.09 . The values of real soil loss (Ggod) and specific real soil loss (Ggod/km^2) were evaluated as $172704.90 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ and $215.50 \text{ m}^3 \text{ km}^2 \text{ y}^{-1}$. The results showed that there was a lot of permeability in the upland sub-watersheds. In these sub-watersheds, due to the existence of rangelands and higher vegetation cover, more water penetrates.

4- Discussion & Conclusions

In general, the results showed that the erosion values at the lowlands of the study watershed are much higher than at the highlands. The present results are consistent with the other researches that reported the high level of ecological sensitivity in the lowlands of the KoozehTopraghi Watershed. The results of the present study can be used as a useful managerial tool in the field of sustainable agricultural production and optimal use of natural resources. Finally, it is recommended to compare the applicability of the IntErO model in different environmental conditions, considering its comprehensiveness in analyzing the erosional status. The results of this study, in addition to its capability for modeling different watershed ecological, hydrological and managerial processes, their analysis is useful to prioritize the critical regions as well as sustainable and effective implantation of restoration and conservative practices in the KoozehTopraghi Watershed.

Key Words: Erosion intensity; Land degradation; Rangelands; Soil loss; Spatial pattern.