

تعیین رتبه رسوبدهی زیرحوزه‌های آبخیز حبله‌رود بر اساس فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی

علیرضا حبیبی^{۱*} و حمیدرضا پیروان^۲

^۱ دکترای ژئومورفولوژی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و ^۲ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

چکیده

رتبه‌بندی فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی حوزه‌های آبخیز، در شناسایی و تعیین اولویت زیرحوضه‌ها از منظر تصمیم‌سازی و عملیاتی در مدیریت حوضه از اهمیت خاصی برخوردار است. از این‌رو، تحقیق حاضر با هدف اولویت‌بندی اجرای عملیات حفاظت خاک در زیرحوزه‌های آبخیز حبله‌رود واقع در شمال گرمسار بر اساس درجه حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش انجام شد. روش کار بر پایه نظر کارشناسی و عملیات میدانی آزمایش شبیه‌ساز باران و مقایسه با نتایج مدل‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب استوار بود. نتایج حاصل از اجرای آزمایش شبیه‌ساز باران برای رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها با نتایج حاصل از مدل‌های تجربی PSIAC، EPM و SWAT مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها بر اساس شبیه‌ساز باران در ۱۲ زیرحوضه از ۲۱ زیرحوضه با نتیجه سه مدل یاد شده هم‌خوانی کامل دارد. در شش زیرحوضه با دو مدل و در سه زیرحوضه باقی‌مانده فقط با یک مدل هم‌خوانی داشته است. نتایج شبیه‌سازی باران، بیشترین تطابق را با مدل PSIAC با رسوب ویژه ۹/۰۲ تن در کیلومتر مربع در سال ارائه کرده، بر اساس نتایج داده‌های مشاهداتی ایستگاه رسوب‌سنجی بن‌کوه، رسوب ویژه ۸/۰۲ تن در کیلومتر مربع در سال بدون در نظر گرفتن بار بستر مشخص شد که مدل PSIAC مطمئن‌ترین نتیجه برآورد رسوب را ارائه کرده است. بدین ترتیب، هم‌خوانی نتایج شبیه‌ساز باران در رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها با مدل PSIAC، نشان می‌دهد که نتایج رسوبدهی حوضه مبتنی بر واحدهای سنگ‌شناسی به کمک باران‌ساز قابل اطمینان بوده، می‌توان با تکیه بر داده‌های مشاهداتی سهل‌الوصول باران‌ساز، نسبت به اولویت‌بندی حوضه‌های مشابه به فرسایش با درجه اطمینان ۹۰ درصد اقدام و نتایج آن را در اولویت مکانی انجام کارهای حفاظتی حوضه‌ها به کار بست.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌ساز باران، رتبه‌بندی، رسوب‌زایی، مدل‌های تجربی فرسایش و رسوب، واحدهای سنگی

مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته است. بیش از ۱۲۰ مدل در جهان در مورد فرسایش خاک در مقیاس‌های مختلف استفاده می‌شود که نام و مشخصات ۹۲ مدل به‌وسیله Feiznia در کتاب رسوب‌شناسی کاربردی گزارش شده است (Feiznia, ۲۰۱۴). در تحقیقات حاضر، تا کنون

سازندهای حساس به فرسایش به‌عنوان یکی از عوامل مهم در مطالعات حوزه‌های آبخیز همواره مد نظر محققین علوم زمین بوده است. در این رابطه، مدل‌ها و روش‌های مختلفی با امتیازدهی کارشناسی

یک از این عوامل، دامنه نمره‌ای تخصیص یافته است. در هنگام مطالعه و بررسی تولید رسوب یک حوزه آبخیز با بازدید و ارزیابی صحرایی عرصه، نمره قطعی هر کدام از عوامل نه‌گانه تعیین شده و حاصل جمع نمرات عوامل نه‌گانه، برآورد کیفی و کمی تولید رسوب را خواهد داد. در این زمینه، در دهه‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در خصوص کاربرد مدل توسط Amiri (۲۰۰۸)، Servati (۲۰۰۹)، Madadi (۲۰۱۲)، Yamani (۲۰۱۲) و Habibi (۲۰۱۷) در ایران صورت گرفته است. مدل EPM برای بررسی شدت فرسایش خاک در کشور یوگسلاوی سابق به‌وسیله Gavrilovic (۱۹۸۸) ارائه شد. در حقیقت، این روش در نتیجه پژوهش‌های گسترده‌ای که برای بررسی کمی فرسایش خاک با عنوان روش طبقه‌بندی کمی فرسایش خاک^۱ انجام گرفت، حاصل شد. به‌منظور استفاده از مدل EPM، ابتدا، متغیرهای مختلف شامل ضریب شدت فرسایش (Z)، فرسایش ویژه (Wsp) و تخمین میزان رسوب‌دهی ویژه (Gsp) در حوزه‌های آبخیز محاسبه می‌شود. در این روش، چهار عامل ضریب فرسایش مشاهده‌ای حوزه آبخیز (Ψ)، ضریب استفاده از زمین (X_a)، شیب متوسط حوضه (I)، ضریب مقاومت خاک و سنگ به فرسایش (Y) برای تعیین ضریب فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های اروپای شرقی، EPM روند روبه رشدی داشته است. از جمله می‌توان به Tangestani (۲۰۰۶)، Fatolahzadeh (۲۰۱۰)، ZiaAbadi (۲۰۱۱) و Abdullah و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. مدل‌های تجربی PSIAC و EPM در سال‌های اخیر به‌وسیله محققان زیادی به‌عنوان مدل‌های فرسایشی در حوضه‌های مختلف سراسر کشور اجرا شده است.

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوزه آبخیز است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در

بین نتایج حاصل از شبیه‌ساز باران با خروجی مدل‌های تجربی و فیزیکی در مقیاس سطح زیرحوضه‌ای، مقایسه‌ای صورت پذیرفته است و تحقیقات صرفاً به اجرای مدل‌های مزبور و مقایسه با خروجی رسوب رودخانه، محدود بوده است. یکی از ضرورت‌های مهم این تحقیق، این است که نشان داده شود که می‌توان با تکیه بر نتایج دقیق باران‌ساز و داده‌های واقعی آن، نسبت به روش‌های کارشناسی موجود مانند مدل‌ها در اولویت‌بندی حوضه‌ها از نظر کارهای حفاظتی تکیه کرد. هم‌اکنون مدل‌های تجربی PSIAC و EPM در ایران به‌وسیله کارشناسان مختلف برای برآورد میزان فرسایش به‌کار می‌روند. با رشد فناوری سعی شد تا بر خلاف مدل‌های قبلی ذکر شده که برای نظرات کارشناسی اهمیت ویژه‌ای قائل می‌شوند، از مدل‌های پویا نیز استفاده شود. از جمله مدل‌های بسیار قوی، مدل نیمه توزیعی SWAT است که با لحاظ ۲۷ متغیر حل معادلات مربوطه و واسنجی بر اساس دبی خروجی رودخانه، اقدام به تعیین میزان فرسایش و رواناب و بیلان آبی حوضه می‌کند. طرفداران نظریه جعبه سفید که معتقدند باید بتوان نقش و اهمیت هر یک از متغیرهای فرسایشی باران و فرسایش‌پذیری خاک در حین آزمایش را رؤیت کرد، اهمیت بهره‌برداری از باران‌سازها در ابعاد مختلف را مورد تأکید قرار می‌دهند (Habibi, ۲۰۱۷).

هدف اصلی تحقیق حاضر، تعیین کارایی رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌های آبخیز به کمک داده‌های واقعی برداشت شده از میزان رواناب و رسوب تولیدی واحدهای کاری حوضه به کمک شبیه‌ساز باران است. در این تحقیق، برای حصول اطمینان از نتایج حاصله، مقادیر رواناب و رسوب تولیدی به‌دست آمده در سطح حوضه و زیرحوضه‌ها به‌وسیله شبیه‌ساز باران با نتایج مدل‌های تجربی PSIAC، EPM و SWAT مورد مقایسه و سنجش قرار گرفت. با مدل تجربی PSIAC، بر اساس نه عامل مؤثر بر رسوب‌دهی، نسبت به برآورد کمی و کیفی تولید رسوب اقدام می‌شود. این عوامل شامل زمین‌شناسی سطحی، خاک، اقلیم، رواناب، توپوگرافی، پوشش زمین، کاربری اراضی، وضعیت فرسایش اراضی بالادست و فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب هستند. در این روش، بسته به اهمیت هر

¹ Method of Quantitative Classification of Erosion (MQCE)

در مورد ویژگی‌ها و خصوصیات باران طبیعی انجام گیرد. از اوایل قرن بیستم، شبیه‌سازی باران و ساخت شبیه‌ساز باران‌های اولیه شروع و در مورد کاربرد آن‌ها در علوم طبیعی، به‌خصوص در مطالعه فرایند فرسایش و رواناب تحقیقات زیادی انجام شده است. آزمایش‌های مختلفی با استفاده از باران‌سازها، در زمینه فرسایش‌پذیری و رسوب‌زایی نهشته‌های رسوبی انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به نتایج کارهای انجام شده به‌وسیله Hamed (۲۰۰۲)، Arnaez (۲۰۰۷) و Jordan و همکاران (۲۰۰۸)، اشاره کرد. آن‌ها مدعی شده‌اند که باران‌ساز در مقیاس کورت برای تخمین هدررفت خاک در مقیاس حوزه آبخیز، مناسب است. Kinnell (۲۰۰۵)، به این نتیجه رسید که مدل رگرسیونی چند متغیره و استفاده از باران‌ساز با قطرات تولیدی در حد متوسط، ابزار ارزشمندی برای پیش‌بینی رسوب‌زایی حوضه می‌باشد. در ایران نیز Charkhabi و Shekhabadi (۲۰۰۳)، بافت خاک را مهمترین متغیر در ایجاد رواناب و رسوب در حوزه آبخیز گل‌آباد دانستند.

حساسیت به فرسایش سنگ‌ها به‌وسیله Feiznia و Zare (۲۰۰۳) بیان شد. آن‌ها معتقد بودند که رفتار نهشته‌های کوتاه‌تر در مقابل فرسایش، بستگی به سرشت نهشته‌ها و محیط در برگیرنده آن‌ها دارد. Shariat Jafari و همکاران (۲۰۰۵)، طبقه‌بندی حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش (ایران مرکزی و حوضه کویرهای درانجیر و ساغند) را ارائه داده‌اند. در یک حوزه آبخیز، مقاومت سنگ‌ها و مساحتی که هر کدام به خود اختصاص می‌دهند، یکسان نیست. بدیهی است، حساسیت سازندها در برابر فرسایش و وسعت رخنمون آن‌ها تعیین‌کننده میزان تولید رسوب در آن حوضه است (Yamani و همکاران، ۲۰۱۱).

Bakhtiari و همکاران (۲۰۱۴)، بر اساس ویژگی‌های بافت و ساخت سنگ‌های آذرین توده نفوذی الوند همدان نسبت به طبقه‌بندی فرسایش‌پذیری واحدهای مختلف سنگی در برابر هوازدگی اقدام کردند. Feiznia (۱۹۹۵)، مقاومت سنگ‌ها در برابر فرسایش را در اقلیم‌های مختلف ایران، ارائه کرد. همچنین، Feiznia و Zare (۲۰۰۳)،

دراز مدت طراحی شده است. Arnold و همکاران (۱۹۹۸)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT، بیلان هیدرولوژیکی برای حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا را شبیه‌سازی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیلان هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس با استفاده از مدل SWAT به‌طور واقع‌بینانه‌ای قابل شبیه‌سازی است. Tripathi و همکاران (۲۰۰۴)، نشان دادند که پیش‌بینی شدت جریان در SWAT نسبت به تعداد واحدهای واکنش هیدرولوژیکی و یا زیرحوضه‌ها حساس نبوده، اما تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و مقدار رطوبت آب در خاک تغییر می‌کنند. Neitsch و همکاران (۲۰۰۵)، بیان کردند که مدل SWAT برای پیش‌بینی اثر فعالیت‌های مدیریتی بر ایجاد و میزان رسوب در مقیاس حوزه آبخیز با تنوع خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی در بازه زمانی طولانی توسعه یافته است. این مدل از نظر محاسباتی کارآمدی مناسبی دارد و کاربران را قادر به شبیه‌سازی طولانی مدت می‌کند. Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷)، از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی حوضه رودخانه تور در شمال شرقی کشور سوئیس استفاده کرده‌اند. این مطالعه، نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و فسفر داشت. Rostamian و همکاران (۲۰۰۸)، مدل SWAT را برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب دو حوزه آبخیز بهشت‌آباد و ونک در شمال حوضه کارون مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها برای واسنجی و تحلیل حساسیت مدل از برنامه SUFI-2 استفاده کردند. در این بررسی، مقادیر رواناب برآورد شده کاملاً با مقادیر مشاهده شده شبیه بودند. محققان دیگری مانند Gholami (۲۰۰۳)، Faramarzi و همکاران (۲۰۰۹)، Talebizadeh و همکاران (۲۰۱۰)، Hosseini (۲۰۱۴) و Habibi و همکاران (۲۰۱۶) در حوضه حبله‌رود اقدام به شبیه‌سازی رواناب و رسوب کرده و ارتباط معنی‌داری بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با مقدار مشاهده‌ای به‌دست آورده است.

شبیه‌ساز باران موجب شد تا تحقیقات وسیعی با استفاده از باران‌سازها در اندازه‌های مختلف به‌وسیله دانشمندان و محققان از دهه‌های قرن نوزدهم میلادی

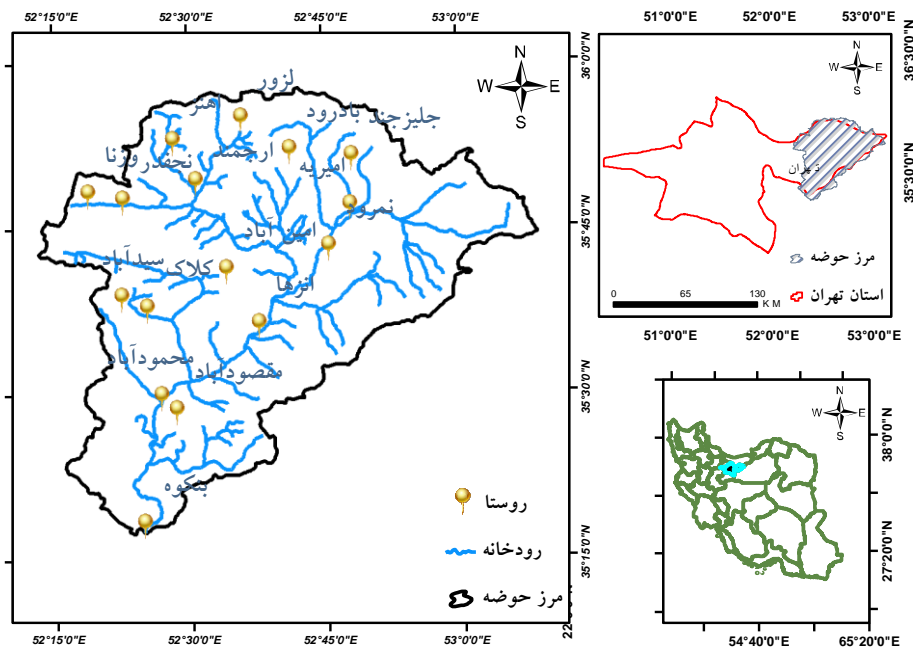
حاضر در حوضه حبله رود مد نظر قرار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز حبله رود با دبی متوسط سالیانه ۲۵۰ تا ۲۷۰ میلیون مترمکعب در حاشیه جنوبی البرز مرکزی بین ۱۲' ۵۲ تا ۹' ۵۳ طول شرقی و ۱۷' ۳۵ تا ۳۵' ۵۸ عرض شمالی واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری، در استان تهران و شهرستان‌های فیروزکوه و نمرود قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت حوضه مورد مطالعه، بیش از ۳۲۰۰ کیلومتر مربع است. بلندترین نقطه ارتفاعی این حوضه ۴۰۰۳ متر و کمینه ارتفاعی آن ۱۰۰۰ متر از سطح دریا است. حبله رود پر آب‌ترین رودخانه جنوب البرز در استان سمنان و از رودخانه‌های دائمی استان به طول ۲۴۰ کیلومتر است که از دامنه کوه‌های سایو و شاه محمد قله و هما در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان فیروزکوه در استان تهران سرچشمه می‌گیرد و به نام رودخانه گورسفید به سوی دامنه شمالی کوه ماراب جاری می‌شود. بنابراین، حوضه آبخیز اصلی آن در خارج از استان سمنان واقع شده است (Habibi و همکاران، ۲۰۱۶). این رود منبع اصلی آب کشاورزی شهرستان گرمسار بوده و تأثیر مهمی در اقتصاد و آبادانی منطقه دارد. حبله رود پس از آبیاری گرمسار، به دشت کویر منتهی می‌شود. این رود دارای شاخه‌های شور و شیرین متعددی است. از شعبات مهم این رود، نمرود و رشید سلطان است که اولی دارای آب شیرین و دومی دارای آب شور است. بیش از نیمی از آب حبله رود به وسیله نمرود تأمین می‌شود.

روش پژوهش: این تحقیق، بر اساس بررسی‌های میدانی و مطالعه کتابخانه‌ای و استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و اطلاعات خاک‌شناسی و همچنین، اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی، رسوب‌سنجی با مراجعه به وزارت نیرو و اطلاعات سینوپتیک سازمان هواشناسی جمع‌آوری شده است. واحد کاری در این تحقیق از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک حاصل شد.

از طبقه‌بندی سلبی برای تعیین حساسیت سازندهای زمین‌شناسی نسبت به فرسایش در حوضه آبخیز سد لتیان استفاده کرده‌اند. Khaksar و همکاران (۲۰۰۶)، از طریق بازدیدهای میدانی و میزان مقاومت آن‌ها به کمک چکش اشمیت، فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبخیز مهارلو را بررسی کردند. Sowers و همکاران (۲۰۰۳)، بر اساس درجه چسبندگی مواد زمین‌شناسی، مقدار فرسایش‌پذیری واحدهای مختلف کواترنری حوضه آبخیز Silver Creek واقع در کالیفرنیا را محاسبه کردند. Mather و همکاران (۲۰۰۴)، به منظور بررسی میزان فرسایش نهشته‌های کواترنر در جنوب شرقی اسپانیا، از نقشه‌برداری مقاطع دره‌ها و بازسازی شکل دره‌ها قبل از فرسایش استفاده نمودند. در مباحث مرتبط با لندفرم‌های فرسایشی سازندها و رسوب حاصل از آن به‌وسیله Olley و همکاران (۱۹۹۳)، Wallbrink و همکاران (۱۹۹۸)، همچنین، Wasson و همکاران (۱۹۹۸) و Poesen و همکاران (۲۰۰۳)، در جهان تحقیقات مختلفی ارائه شده است. Liu و همکاران (۲۰۰۸)، با نمونه‌برداری از رسوبات در پایین‌دست رودخانه‌ها، می‌توان سازندها را از نظر فرسایش‌پذیری در سطح حوضه پهنه‌بندی کرد. از آن‌جا که یکی از مهمترین مسائل حوزه‌های آبخیز، مسئله فرسایش می‌باشد، بنابراین، بحث فرسایش‌پذیری سازندهای حوضه و شناخت نوع و مقاومت آن‌ها در برابر فرسایش اهمیت پیدا می‌کند. فرسایش‌پذیری سازندهای هر حوضه و شناخت مقاومت سنگ‌ها در برابر فرسایش به تفکیک هر زیرحوضه برای انجام عملیات حفاظتی، موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده است. یکی از اهداف اصلی آبخیزداری، مهار فرسایش خاک و جلوگیری از آن است. منابع بررسی شده نشان می‌دهد که گرچه تا کنون تحقیقات مختلفی به‌وسیله دانشمندان در زمینه استفاده از باران‌ساز در برآورد فرسایش انجام شده است، ولی در زمینه رتبه‌بندی رسوب‌دهی زیرحوضه‌های آبخیز بر اساس نتایج باران‌ساز و تلفیق آن با نتایج مدل‌های تجربی، نیمه‌توزیعی و آمار دبی-رسوب رودخانه در مقیاس حوضه‌ای تحقیقی انجام نشده است. لذا، این مهم در تحقیق



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مورد مطالعه در استان تهران

پاشنده باران و پایه فلزی قسمت پاشنده باران که قابل تنظیم بوده، به همراه قاب استیل (کرت) و آبروی یک تکه که در داخل خاک یا رسوب کوبیده شده، از حرکت جانبی در کرت آزمایشی به خاک اطراف جلوگیری کرده، باعث هدایت رواناب و رسوب به داخل بطری نمونه‌گیری می‌شود. شکل ۳، ابعاد شبیه‌ساز باران قابل حمل و اشکال فرسایش روی سازند مارنی را نشان می‌دهد. برای مشخص کردن واحدهای سنگ‌شناسی سطح حوضه، در این تحقیق، از نقشه زمین‌شناسی تهران و سمنان در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ گرمسار، کهن‌آباد، دماوند و فیروزآباد به همراه نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه دیجیتالی سازمان نقشه‌برداری برای ساختن DEM و شیب حوضه مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تلفیق سازندهای زمین‌شناسی و بر اساس ترکیب سنگی چیره، ۱۲ گروه سنگ‌شناسی مشخص شده است (جدول ۱).

در بازدید اولیه از سطح حوضه، نقش سازندها و اشکال فرسایشی کاملاً مشهود بوده است. آزمایش‌ها روی سازندهای زمین‌شناسی که فاقد پوشش گیاهی بوده با شدت بارندگی چهار میلی‌متر در دقیقه (۲۴۰)

بدین منظور، در محیط آرک سوات^۱ با دستور جداسازی^۲، ۲۱ زیرحوضه تعیین شده است (شکل ۲). زیرحوزه‌های آبخیز حبله‌رود با دستور WATERSHED_DELINEATION و معرفی DEM به مدل و تعریف ایستگاه بن‌کوه به‌عنوان خروجی حوضه ترسیم شدند. با توجه به وسعت حوزه آبخیز مورد مطالعه، تعداد ۲۱ زیرحوضه برای آن ترسیم شد. تصویر زیرحوضه‌های استفاده شده در ادامه به تفکیک زیرحوضه‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است.

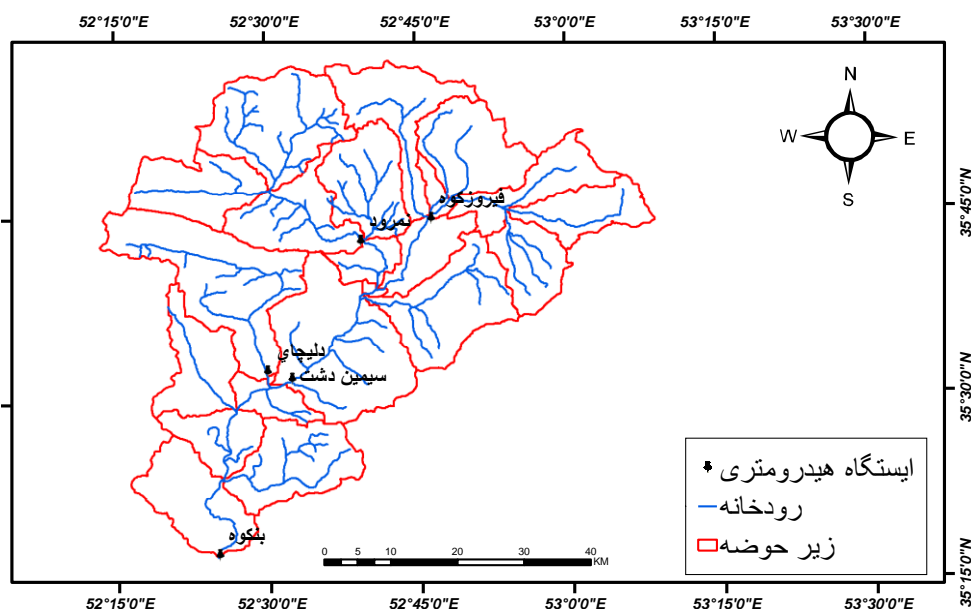
برای اندازه‌گیری رواناب و رسوب از دستگاه باران‌ساز قابل حمل صحرایی ساخته شده به‌وسیله پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده شده است. شکل ۳، به‌کارگیری باران‌ساز در شمال حوضه را نشان می‌دهد. این باران‌ساز با ارتفاع سقوط قطرات در بالای شیب ۳۷۵ میلی‌متر و متوسط قطر قطرات ۵/۶ میلی‌متر با سطح کرت ۰/۰۶۲۵ متر مربع با جرم قطره ۰/۱۰۶ گرم و تعداد ۴۹ لوله موئینه می‌باشد. قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز باران ۲۵ در ۲۵ سانتی‌متر شامل مخزن شبیه‌ساز باران با قسمت

^۱ ARC-SWAT

^۲ Watershed delineator

است. ابتدا دستگاه در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری واسنجی شد. در بازدید میدانی از سطح حوضه، مشخص شده که سازندهای حساس ماری عمده‌تاً در جنوب حوضه واقع شده است. سازندهای سخت در شمال حوضه قرار گرفته است. در این تحقیق، در دو مرحله جداگانه اقدام به برداشت میدانی در جنوب حوضه (واحدهای ماری و حساس) برای آزمایش انتخاب شده است. در روزهای بعد، با مراجعه به سمت بالای حوضه و فیروزکوه در روستای آرو و سیدآباد در شمال حوضه اقدام به انجام آزمایش میدانی (سازندهای سخت و غیر ماری) با دستگاه شبیه‌ساز باران شده است (شکل ۳).

میلی‌متر در ساعت) با تداوم بارش ۱۰ دقیقه در سه تکرار انجام شده است. با توجه به محدودیت حجم آب در مخزن باران‌ساز مورد استفاده، با پرکردن بدون وقفه منبع آب باران‌ساز، آزمایش با تداوم ۱۰ دقیقه‌ای بارش، تأمین شد. این باران‌ساز، بارش‌های رگباری شدید را شبیه‌سازی می‌کند و به همین خاطر، کمینه شدت بارش تولیدی این باران‌ساز، انتخاب و در شرایط مشابه، نتایج رواناب و رسوب حاصل از هر سازند زمین‌شناسی، با هم مقایسه شد. سپس، نتایج آزمایش هر یک از سازندها به دیگر رخنمون این سازندها در کل حوضه تعمیم داده شده است. نقشه رسوب ویژه با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران روی سازندها در حوزه آبخیز حبله‌رود در محیط ARC-GIS ایجاد شده



شکل ۲- تفکیک حوضه به زیرحوضه‌ها با استفاده از مدل SWAT



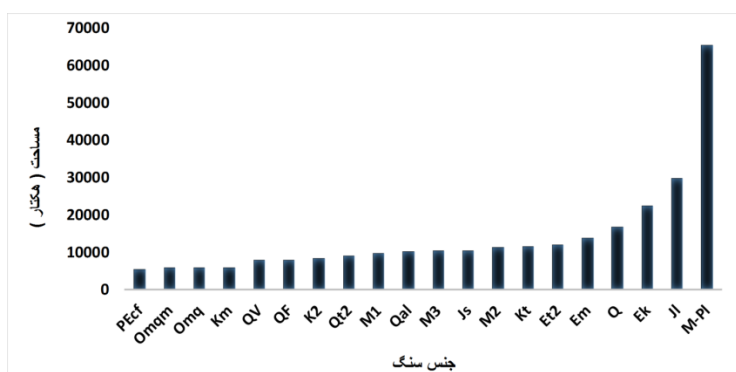
شکل ۳- آزمایش شبیه‌ساز باران بر ماسه‌سنگ لالون در ورودی روستای آرو

نتایج و بحث

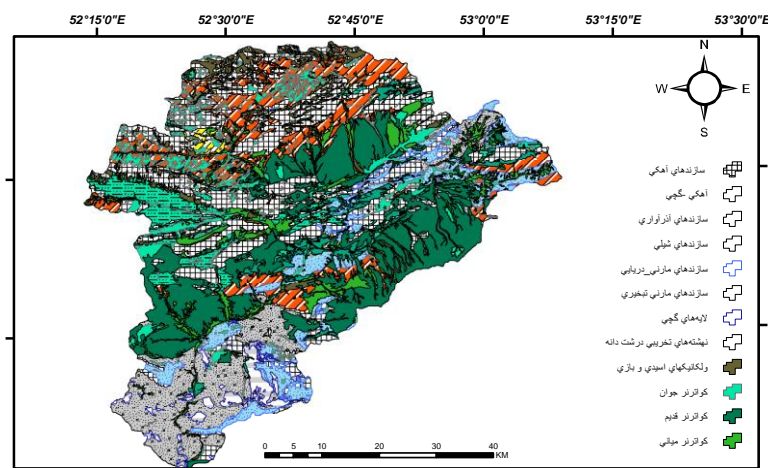
نقشه‌های پایه: سازندهای زمین‌شناسی این حوضه در محدوده زمانی پرکامبرین تا کواترنری قرار دارند و به‌ترتیب سنی مربوط به سازندهای کهر، بایندر، زایگون، لالون، مبارک، الیکا، پالند، شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، فاجان، زیارت، کرج، کند، قرمز تحتانی، قم، قرمز فوقانی، کهریزک، آبرفت تهران و سنگ‌های ولکانیکی دماوند می‌باشند. سنگ‌شناسی غالب حوضه، آهک، مارن، شیل، ماسه‌سنگ، توف و آبرفت است. میزان درصد گسترش سازندها در حوزه آبخیز حبله‌رود در شکل ۲، ارائه شده است که شامل واحدهای سنگی به قرار زیر است که شامل کنگلومرای سازند هزاردره M-PI، آهک و دولومیت ضخیم سازند لار JI، مواد آذرآواری و توف سبز سازند کرج به همراه مواد رسوبی شیل و آهک مربوط به دوره ائوسن Ek، آبرفت جدید کواترنر Q، مارن با مقداری میان‌لایه آهک و توف ائوسن میانی Em، توف میانی سازند کرج

Et₂، آهک منظم لایه تیزکوه Kt، واحد میانی قرمز بالای M₂، ماسه‌سنگ و شیل و کمی آهک سازند شمشک Js، واحد بالای قرمز بالای M₃، آبرفت کواترنر Q_{al}، واحد زیرین قرمز بالای M₁، تراس‌های میانی Qt₂، آهک خاکستری لایه‌ای کرتاسه K₂، مخروط افکنه Q_f، بازالت کواترنر Q_v، ملافیر و ژئیس کرتاسه Km، شامل آهک و لایه‌های گچ سازند قم Omq، آهک و مارن با میان لایه‌های گچ سازند قم Omqm، کنگلومرای قرمز رنگ سازند فجن PEcf است.

بعضی از سنگ‌ها دارای مساحت و درصد کمی در سطح حوضه بوده که می‌توان به آندزیت و مارن سازند کرج زیربخش کندر EaK، ولکانیک‌های ائوسن کرج EV، آهک میکرایتی متوسط لایه قاعده سازند مبارک C1m کمتر از ۰/۰۲ درصد از سطح حوضه اشاره کرد (شکل ۴).



شکل ۴- مساحت سنگ‌های حوضه حبله‌رود (هکتار)



شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی شده سازندهای زمین‌شناسی بر مبنای مشابهت سنگ‌شناسی در حوزه آبخیز حبله‌رود

جدول ۱- سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبخیز حبله‌رود بر اساس ترکیب سنگی

گروه	درصد	مساحت و فراوانی	سنگ‌شناسی	گروه	درصد	مساحت و فراوانی	سنگ‌شناسی
سازندهای مارنی تبخیری	۴۳۴۶۲/۹	۱۳/۴۳	واحد زیرین قرمز بالایی، واحد میانی قرمز بالایی، واحد بالایی قرمز بالایی، قرمز بالایی، نمک قرمز زیرین، واحد زیرین-میانی قرمز بالایی، واحد میانی سازند قرمز بالایی	M1, M2, M3, M, Ols, M1-2, M2m			آهک روشن رنگ کرتاسه، آهک منظم لایه تیزکوه، آهک نازک لایه ورمیکوله الیکا، دولومیت خاکستری لایه ای الیکا، آهک متبلور سفید بالای الیکا، سازند الیکا، دولومیت آهک، شیل و ماسه سنگ مبارک، سازند قم شامل آهک و لایه‌های کچ، آهک خاکستری لایه ای کرتاسه، آهک و دولومیت ضخیم لایه لار، آهک و آهک مارنی دلیچای، آهک خاکستری و کمی مارن روته، لایه‌های آهکی سازند کرج، آهک میکرایتی متوسط لایه قاعده سازند مبارک، دولومیت و شیل سلطانیه
سازندهای مارنی دریایی	۲۲۸۱۶/۹	۷/۰۵	مارن و مارلستون، آهک و توف ائوسن میانی سازند کند، گچ و مارن ائوسن بالایی، مارن سازند قم، مارن توفی سبز آبی با لنزهایی از گچ ائوسن بالایی آندزیت و مارن سازند کرج زیربخش کندر، شیل ماسه‌سنگ و دولومیت باروت، سازند باروت، شیل سیاه زغال‌دار شمشک، ماسه‌سنگ و شیل و کمی آهک سازند شمشک، شیل پایینی سازند کرج، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرای کرتاسه، ماسه‌سنگ و شیل قرمز رنگ سازند دورود	Em, EKn, Eg, O mqm, Eomt	۶۵۸۹۵/۲۹	سازندهای آهکی	KI2, Kt, TR1 e, TR2 e, TR3 e, TRe, Cm, Omq, K2, JI, Jd, Pr, EKl, C1m, PCs
سازندهای شیلی	۱۷۹۷۲/۰۸	۵/۵۳	سازند کرج، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرای کرتاسه، ماسه‌سنگ و شیل قرمز رنگ سازند دورود	EaK, P CBT, P C, Br/ Kh, Jss h, Js, E s1, Ks, Pd	۲۸۱۱۲/۷	کواترنر جوان	Qc, Qa l, Q
ولکانیک‌ها ی اسیدی و بازی	۱۴۹۸۸/۸۹	۴/۶۳	ملافیر و ژئپس کرتاسه، سیل بازالتی ترشیری (الیگوسن)، بازالت کواترنر، دیاباز به شدت دگرسان شده کرتاسه، ولکانیک‌های ائوسن کرج، بازالت سازند شمشک	Km, T b, QV, di, EV, JV	۱۱۷۹۶/۹	کواترنر میانی	Qt2, Q t1, QF, Sm
لایه‌های گچی	۵۹۹۰/۵۲	۱/۸۵	گچ قرمز زیرین، لایه‌های گچی سازند کرج، دیابیر گچی الیگوسن گچ سازند قم	Olg, g, EK , omqg	۶۶۷۸۲/۹	کواترنر قدیم	PL- Q, M- Pl, Qt1 /M-Pl
آهکی- گچی	۳۱۹۱/۹	۰/۹۸	آهک و گچ زیارت	EZ	۵۹۲۴/۸۶	نهشته‌های تخریبی درشت دانه متراکم	PEscf, PEf, P Ecf, Ol c, Kc
					۱/۸۳		
					۳۶۵۹۰/۸۴	سازندهای آذر آوری	Ek, Et2, Etbk

بید و تبریزی و باغات سیب و باغات گردو است. در جنوب حوضه که هوا معتدل‌تر بوده، کشت پنبه همراه با باغات انار و زنجیر وجود دارد. دشت‌های وسیع و حاصل‌خیز مساحت زیادی ندارند. در دشت فیروزکوه زراعت غلات، علوفه، دانه‌های روغنی، سیب‌زمینی و باغات سیب توأم با قلمستان‌های بید و تبریزی موجود است. در روستای آرو وسعت زیادی به ویلاسازی اختصاص یافته است. حوضه مورد مطالعه، بیشتر دارای کاربری مرتع و کوهستانی است (شکل ۶).

برای ارزیابی توان رسوب‌زایی سازندها نیاز بود، قابلیت اراضی و کاربری‌های منطقه را مورد مطالعه قرار داد تا دید جامعی از شرایط حاکم بر حوزه آبخیز به‌دست آید. بازدید اولیه میدانی نشان داد که قسمت عمده اراضی آبی و باغات در طرفین رودخانه و سرشاخه‌ها وجود دارد. ترکیب گیاهی زراعت‌ها و باغات در مناطق مختلف حوضه متفاوت بوده، ترکیبات گیاهی باغات در نوار رودخانه‌های بسیار محدود و عموماً شامل غلات، علوفه، سیب‌زمینی، قلمستان‌های

می‌کنند. کاربری‌ها و مساحت حوضه بر اساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۱۶ منطقه تعیین شد (جدول ۲).

دام‌پروری و باغداری در حوضه گسترش زیادی دارند. زمین‌های سست که عموماً اراضی ماری بوده در جنوب حوضه گسترش یافته است. همین اراضی به تنهایی حجم گسترده‌ای از رسوبات حوضه را تولید



شکل ۴- پراکنش پوشش گونه‌های گون و درمنه در روستای آرو (نگارندگان، ۱۳۹۵)

جدول ۲- کاربری‌ها و مساحت حوضه بر اساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۱۶ منطقه

نام کاربری	مساحت (هکتار)	درصد
زراعت	۸۰۴۷/۹	۲/۴۹
باغ	۵۴۴۵/۶	۱/۶۹
زمین‌های بایر	۸۸۴/۶	۰/۲۸
مرتع با تاج‌پوشش خوب	۷۴۲۰۴/۹	۲۲/۹
جنگل با تاج‌پوشش کم	۱۵۱۹/۲	۰/۴۷
مرتع با تاج‌پوشش نسبتاً متوسط	۱۸۷۳/۲	۵۷/۸۷
مرتع با تاج‌پوشش فقیر	۳۲۲۶۰/۸	۹/۹۸
مناطق شهری	۲۷۴/۸	۰/۹
آبگیر و آب‌بندان	۶/۳۵	۰/۰۲
بیشه‌زار و بوته‌زار	۱۳۴۵۲/۳	۴/۱۶

می‌پوشانند. به همین دلیل، مخروط‌های واریزه‌ای در دامنه‌های جنوبی البرز از ابعاد بزرگی برخوردارند و در همه جا عنصر مهم چشم‌انداز تخریبی هستند. شیب بعضی از این عوارض در دره کرج از ۳۰ درصد تجاوز می‌کند. Alaei Taleghani (۲۰۱۲)، در بررسی شکل ظاهری زمین، توپوگرافی، شیب و تراکم شبکه آبراه‌های حوضه مورد مطالعه با توجه به اختلاف ارتفاع و شیب به واحدهای کوهستان، تپه‌ماهور، دشت و واحد رودخانه تقسیم شده است و از نظر تراکم زهکشی و شکل دامنه کوهستان و تپه‌ماهور به تیپ دامنه منظم و نامنظم تفکیک شدند. دامنه‌های منظم با تراکم کم زهکشی، چین‌خوردگی و اعمال تکتونیک

رطوبت دامنه‌های جنوبی البرز و غربی تالش تابع رطوبت فلات داخلی است. به همین دلیل، رطوبت نسبی این واحد کم و فاقد جنگل می‌باشد. در چنین شرایطی، تجزیه شیمیایی و بیوشیمیایی محدود و سنگ‌های عریان همه جا به اشکال مختلف در ناهمواری‌ها به چشم می‌خورد. در این دامنه‌ها، حاکمیت تخریب مکانیکی موجب تشکیل فرآورده‌های تخریبی زیاد شده و اغلب گیلویی‌ها و بیرون‌زدگی سنگی و همچنین، مخروط‌های واریزه‌ای چشم‌انداز دامنه‌ها هستند. به دلیل نقش رسوب‌های ریزدانه در ساختار کوه‌ها و دوره طولانی یخبندان به همراه فرآورده‌های تخریبی زیادی سطح دامنه‌ها را

است. کوهستان در این حوضه با مساحت ۲۷۹۲۵۳ هکتار و دشت‌ها ۴۴۶۴۹ هکتار می‌باشد که به ترتیب ۸۶/۲ و ۱۳/۷۸ درصد است. بر اساس نقشه واحد اراضی در سطح حوضه، شش واحد اراضی شناسایی شده است. در سطح حوضه مورد مطالعه، ۷۴/۲۷ درصد از سطح آن واحد اراضی ۳ و واحد ۱ نیز کوه‌های مرتفع ۲۲/۱ درصد را شامل می‌شود (جدول ۳).

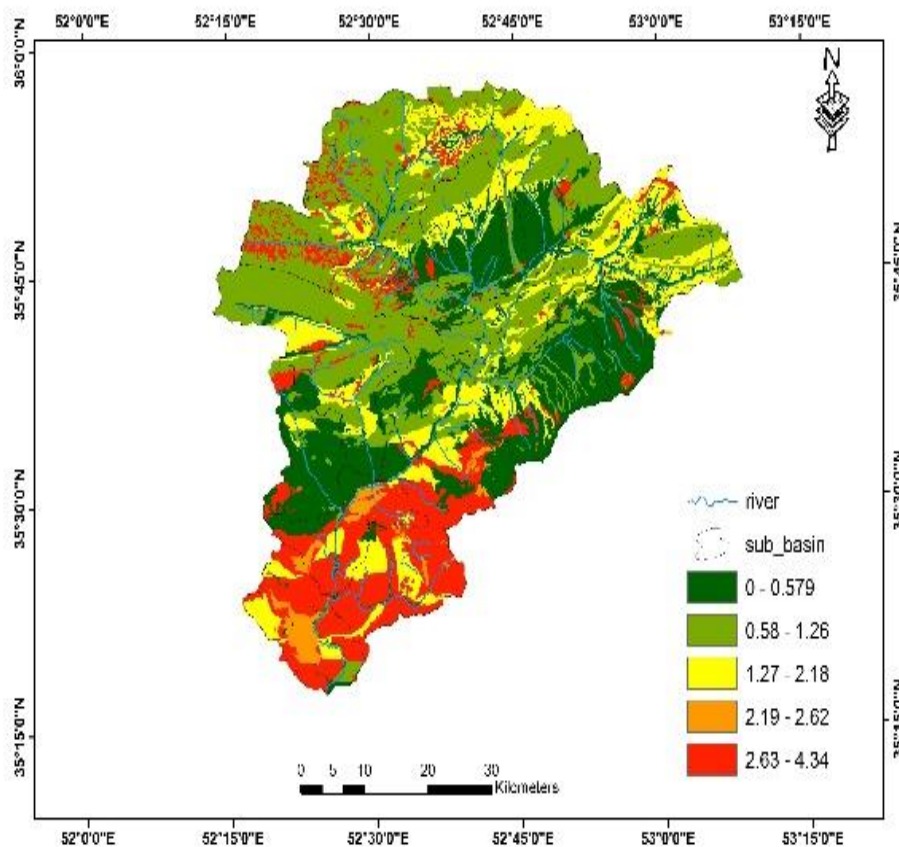
ملایم و شیب یکنواخت دیده می‌شود و تیپ دامنه نامنظم نشانگر تراکم زیاد زهکش‌ها و به هم ریختگی دامنه است. در نقشه ارزیابی منابع و قابلیت اراضی ایران به وسیله موسسه خاک و آب ۱۰ تیپ اصلی فیزیوگرافی با نام لاتین AF, CF, F.L, A, P, T, H, M, X و شامل کوه‌ها، تپه‌ها، فلات‌ها و تراس‌های آبرفتی، دشت‌های دامنه‌ای، دشت‌های رسوبی، اراضی پست، دشت‌های سیلابی، واریزهای بادبزی، آبرفت‌های بادبزن سنگریزه‌دار و اراضی متفرقه شناسایی شده

جدول ۳- خصوصیات قابلیت اراضی حوضه حبله‌رود (۱:۱۰۰۰۰۰)، موسسه تحقیقات خاک و آب

واحد اراضی (اجزاء)	مشخصه اصلی فیزیوگرافی	مشخصات کلی خاک	کاربری اراضی	محدودیت‌ها	مساحت به هکتار
1.1	کوه‌های بسیار مرتفع عموماً با قله مضرس متشکل از سنگ‌های سخت آهکی، ماسه‌ای، شیل، کنگلومرا و بعضاً آذرین	بدون پوشش یا با پوشش کم عمق خاک بافت متوسط تا سنگین	- اراضی بایر - حاشیه رودخانه‌های دائمی مناسب احداث باغات و تفرجگاه	- شیب زیاد - محدودیت پوشش خاکی - فرسایش شدید	۷۱۶۵۱/۴
2.1	تپه‌های مرتفع با قله مدور متشکل از سنگ‌های سخت آهکی و ماسه‌ای و آتشفشانی	عموماً لخت و بدون پوشش و یا با خاک بسیار کم عمق	- اراضی بایر	- شیب تند - فرسایش محدودیت عمق خاک	۵۳۹۰
3.1	فلات‌ها و تراس‌های فوقانی کوژ پشته‌ای با پستی و بلندی بسیار زیاد که بر روی تشکیلات آهکی و سنگریزه و سنگ قرار گرفته است.	خاک‌های کم عمق سنگریزه‌دار با بافت متوسط تا سنگین	- قابلیت کم برای چراگاه	- پستی و بلندی و سنگریزه - فرسایش شوری و بالا	۲۴۰۶۵۳
4.1	دشت‌های دامنه‌ای با شیب بسیار ملایم که از مواد سخت و نرم کوه‌های اطراف به وجود آمده است.	خاک‌های عمیق با بافت لومی رسی تا رسی و بدون سنگریزه	- قابلیت خوب برای زراعت آبی	بودن سطح آب زیرزمینی در بعضی قسمت‌ها	۶/۷۶
8.1	واریزهای بادبزی شکل سنگریزه‌دار با مقداری پستی و بلندی و آبراهه‌های کم عمق	خاک‌های کم عمق تا نیمه عمیق سنگریزه‌دار در بعضی قسمت‌ها بر روی طبقه تمرکز گچ و آهک قرار گرفته در بعضی قسمت‌ها	- قابلیت کم برای زراعت آبی و باغات در بعضی قسمت‌ها - قابلیت کم برای چراگاه	- سیلاب‌های تند و اتفاقی - سنگریزه	۴۶۰۰
9.1	آبرفت‌های بادبزی شکل بالائی با مقدار بسیار زیاد سنگریزه و پستی و بلندی متوسط	خاک‌های خیلی کم عمق تا کم عمق مطبق با بافت متوسط روی سنگریزه	- قابلیت کم برای باغات	- محدودیت عمق خاک همراه با مقدار زیادی سنگریزه	۱۷۲۰

فرسایش زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شده است. در نهایت، مقایسه‌ای بین برآورد حاصل از اجرای شبیه‌ساز باران با مدل‌های موجود و رسوب ویژه ایستگاه رسوب‌سنجی در خروجی حوزه آبخیز حبله‌رود انجام شده است.

اجرای باران‌ساز: برای تهیه نقشه شدت فرسایش از روش‌های تجربی PSIAC، EPM و مدل پویای SWAT استفاده شد. نتایج رسوب ویژه بر حسب تن در هکتار در جدول ۵ ارائه شده است. تمامی زیرحوضه‌ها بر حسب شدت فرسایش به سه گروه



شکل ۵- رسوب ویژه حاصل از یک تک واقعه بارش با شدت چهار میلی‌متر در دقیقه با تداوم بارش ۱۰ دقیقه‌ای با استفاده از شبیه‌ساز باران با تعمیم نتایج کرت آزمایشی

ایستگاه سنجه دبی-رسوب ایستگاه بن‌کوه در خروجی حوضه ملاک عمل قرار گرفت. بر اساس داده‌های رسوب ثبت شده در ایستگاه خروجی حوزه آبخیز حبله‌رود شامل ۱۳۱۴ نمونه در یک دوره ۴۲ ساله (۱۳۴۷-۱۳۸۹)، میزان بار رسوبی معلق ویژه برابر با $8/03$ تن در هکتار در سال به روش حد وسط داده‌ها با ضریب همبستگی $0/92$ ، $y = 6.5838X^{2.7041}$ به‌دست آمده است با اضافه کردن مقدار بار کف حدود ۲۰ درصد به میزان بار معلق مشاهداتی، رقم نهایی بار کل رسوب مشاهداتی $9/63$ تن در هکتار به‌دست آمد. مقایسه این مقدار با میزان متوسط وزنی تولید رسوب مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل پسیاک نسبت به دو

اجرای مدل‌های برآورد رسوب: نقشه‌های مدل‌های تجربی PSIAC و EPM برای حوضه حبله‌رود تهیه شده است. نقشه نهایی مدل SWAT نیز به‌وسیله نگارندگان برای طبقه‌بندی رسوب تهیه شد. پس از اجرای آزمایش‌ها به‌وسیله باران‌ساز در صحرا میزان رواناب و رسوب واحدهای سنگ‌شناسی جمع‌آوری شد و نمونه‌ها برای توزین میزان رسوب و رواناب به آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری منتقل شد. متوسط وزنی تولید رسوب ویژه در کل حوضه با روش‌های EPM، PSIAC و SWAT به‌ترتیب برابر با $6/9$ ، $9/02$ و $11/12$ تن در هکتار محاسبه شد. برای تعیین دقت روش به‌کار رفته، داده‌های مشاهداتی

مدل دیگر از دقت برآورد بالاتری برخوردار است (جدول ۴).

میزان تولید رسوب ویژه جمع‌آوری شده از سطح کرت باران‌ساز در آزمایش هر واحد سنگ‌شناسی محاسبه شد و سپس، نتایج هر کرت به سطح پراکنش آن واحد سنگ‌شناسی در حوضه تبدیل شد تا در مقیاس حوضه و زیرحوضه، امکان مقایسه بین نتایج فراهم شود و به این ترتیب، رتبه‌بندی زیرحوضه‌های

آبخیز از منظر تولید رسوب به دست آمد. در ضمن، میزان رسوب ویژه هر زیرحوضه به کمک مدل‌های برآورد رسوب مانند EPM، PSIAC و SWAT به تفکیک هر زیرحوضه در محیط ARC-GIS محاسبه شد تا رتبه‌بندی تولید رسوب زیرحوضه‌ها در این مدل‌ها با نتایج رتبه‌بندی باران‌ساز، مقایسه و میزان انطباق و تشابه نتایج بررسی شود.

جدول ۴- برآورد رسوب معلق بر اساس داده‌های هیدرومتری به دو روش منحنی حد وسط دسته‌ها و یک خطی

ایستگاه بنکوه (۱۳۸۹-۱۳۴۷) آمار بلند مدت			
روش رسم منحنی سنجه دی-رسوب			
برآوردهای رسوب	روش فائو (CF FAO)	روش میانگین داده‌ها (Mean Load)	روش معمول (Conventional)
رسوب کل دوره آماری (t)	۳۱۵۵۲۵۶/۹۵	۱۵۹۵۶۸۸۴۶/۵۴	۷۱۵۹۵۹۱۳/۵۳
میانگین رسوب روزانه ($tday^{-1}$)	۱۳۹/۴۲	۷۰۵۰/۹۱	۳۱۶۳/۶۲
رسوب سالانه (tyr^{-1})	۵۰۹۲۳/۸۵	۲۵۷۵۳۴۰/۰۷	۱۱۵۵۵۱۲/۶۸
رسوب ویژه (tkm^2yr^{-1})	۱۵/۸۷	۸۰۲/۵۴	۳۶۰/۰۸

جدول ۵- رسوب ویژه محاسبه شده به تفکیک هر زیرحوضه بر اساس نتایج مدل‌ها و شبیه‌ساز باران و طبقه‌بندی آن به سه طبقه زیاد، متوسط و کم

زیرحوضه‌ها	مدل EPM		مدل PSIAC		مدل SWAT		باران‌ساز	
	رتبه	مقدار (تن در هکتار)	رتبه	مقدار (تن در هکتار)	رتبه	مقدار (تن در هکتار)	رتبه	مقدار (تن در هکتار)
۱	کم	۳/۹	کم	۶/۸	کم	۸/۳۳	کم	۰/۶۷
۲	کم	۳/۹۴	کم	۶/۸	کم	۸/۴۱	کم	۰/۷۴
۳	کم	۴/۳۵	متوسط	۹/۴	متوسط	۱۱/۶۷	متوسط	۱/۴۹
۴	متوسط	۴/۹۶	کم	۵/۹۱	کم	۷/۴۷	متوسط	۱/۰۵
۵	متوسط	۵/۰۲	متوسط	۱۱/۵	زیاد	۱۴/۱۴	زیاد	۱/۸۳
۶	متوسط	۵/۰۶	متوسط	۱۱/۲	زیاد	۱۳/۲۸	زیاد	۱/۷۴
۷	متوسط	۵/۰۹	متوسط	۸/۰۵	متوسط	۱۰/۰۱	متوسط	۱/۱۷
۸	متوسط	۵/۸۷	متوسط	۱۱/۰۹	زیاد	۱۳/۳۱	زیاد	۱/۷۸
۹	متوسط	۶/۰۴	متوسط	۷/۴۳	متوسط	۹/۲۳	کم	۰/۹۸
۱۰	متوسط	۶/۱۸	متوسط	۹/۴	متوسط	۱۱/۴۳	متوسط	۱/۲۹
۱۱	متوسط	۶/۲۴	متوسط	۹/۷	متوسط	۱۱/۰۳	متوسط	۱/۲۳
۱۲	متوسط	۶/۲۵	متوسط	۸/۰۹	متوسط	۱۰/۳۱	متوسط	۱/۱۶
۱۳	متوسط	۶/۴۱	متوسط	۹/۴	متوسط	۱۱/۵۲	متوسط	۱/۳۲
۱۴	متوسط	۶/۸۸	متوسط	۹/۴	متوسط	۱۱/۲۴	متوسط	۱/۴۸
۱۵	متوسط	۶/۹۲	متوسط	۷/۶۱	متوسط	۹/۹	متوسط	۱/۳۶
۱۶	زیاد	۸/۵۸	زیاد	۸/۴	متوسط	۱۱/۵۱	متوسط	۱/۸۸
۱۷	زیاد	۸/۶۶	زیاد	۶/۸	کم	۸/۴۵	کم	۰/۸۶
۱۸	زیاد	۹/۲۴	زیاد	۷/۶۱	متوسط	۸/۸۵	کم	۰/۸۹
۱۹	زیاد	۱۰/۸۱	زیاد	۱۱/۳	زیاد	۱۵/۳۲	زیاد	۲/۶۸
۲۰	زیاد	۱۱/۲۷	زیاد	۱۰/۵	زیاد	۱۱/۷۸	زیاد	۲/۱۳
۲۱	زیاد	۱۳/۲۸	زیاد	۱۳/۱	زیاد	۱۶/۷۶	زیاد	۲/۹۴

جدول ۶- رتبه‌بندی شدت تولید رسوب و درصد فراوانی آن به تفکیک هر مدل و زیرحوضه

ردیف	مدل	زیرحوضه‌ها و درصد فراوانی	رتبه فرسایش‌پذیری	
			زیاد	متوسط کم
۱	شبیه‌ساز باران	درصد فراوانی	۴۸/۸۴	۴۰/۸۵
		زیرحوضه‌ها	۵،۶،۸،۱۶،۱۹،۲۰،۲۱	۳،۴،۷،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵
۲	SWAT	درصد فراوانی	۳۶/۰۷	۴۲/۲۱
		زیرحوضه‌ها	۵،۶،۸،۱۹،۲۰،۲۱	۳،۷،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵،۱۶
۳	PSIAC	درصد فراوانی	۳۶/۲۵	۴۹/۸۷
		زیرحوضه‌ها	۵،۶،۸،۱۹،۲۰،۲۱	۳،۷،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵،۱۶،۱۸
۴	EPM	درصد فراوانی	۴۲/۶۶	۴۸/۹۳
		زیرحوضه‌ها	۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱	۴،۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵

نتایج و بحث

ارائه کرده است. قابل ذکر است که در مدل PSIAC، نه عامل موثر بر فرسایش و تولید رسوب، بررسی و امتیازدهی می‌شود و دقت خروجی آن بستگی به دانش و تجربه کارشناس دارد. همان‌طور که گفته شد، بر اساس داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه بن‌کوه، مدل PSIAC بهترین برآورد را ارائه کرده است. مقایسه رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها از طریق باران‌ساز از میان ۲۱ زیرحوضه، ۱۹ زیرحوضه با نتایج مدل PSIAC تطابق کامل داشته است و لذا، با انجام آزمایش شبیه‌ساز باران و حصول ارقام واقعی از حوزه می‌توان با اطمینان ۹۰ درصد، نسبت به این مهم در سطح دیگر حوضه‌های کشور اقدام کرد و با تکیه بر داده‌های مشاهده‌ای سهل‌الوصول باران‌ساز، امکان رتبه‌بندی حوضه‌ها به فرسایش وجود دارد و بر اساس نتایج رتبه‌بندی به‌دست آمده، می‌توان اولویت مکانی انجام کارهای حفاظتی نشان داد که زیرحوضه‌های ۵، ۶، ۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ با توجه به حضور سازندهای مارنی و نتایج حاصل از آزمایش شبیه‌ساز باران مهمترین زیرحوضه‌ها بر اساس نتایج رتبه‌بندی به‌دست آمده، را در سطح حوضه تعیین کرد.

برای ارزیابی کارایی نتایج رسوب‌دهی واحدهای سنگی حوضه به کمک دستگاه شبیه‌ساز باران و تعیین کارایی آن در رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها، ابتدا نتایج حاصل از اجرای سه مدل EPM، PSIAC و SWAT و دستگاه شبیه‌ساز باران به‌صورت رسوب ویژه محاسبه شد و به تفکیک هر زیرحوضه نتایج به‌دست آمده در سه طبقه فرسایشی زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شدند. نتایج رتبه‌بندی فرسایشی زیرحوضه‌ها بر اساس شبیه‌ساز باران نشان داد که در ۱۲ زیرحوضه از ۲۱ زیرحوضه با نتیجه رتبه‌بندی فرسایشی سه مدل EPM، PSIAC و SWAT هم‌خوانی کامل دارند.

در رتبه فرسایش‌پذیری زیاد نسبت به شبیه‌ساز باران شش زیرحوضه ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۸، ۶، ۵ با دو مدل و در سه زیرحوضه باقی‌مانده ۲۱، ۲۰ و ۱۹ فقط با یک مدل هم‌خوانی داشته است. بیشترین تطابق را با مدل PSIAC نشان داده که بر اساس نتایج داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه رسوب‌سنجی بن‌کوه مشخص شد که مدل PSIAC مطمئن‌ترین نتیجه برآورد رسوب را

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
2. Arnaez, J., T. Lasanta, P. Ruiz-Flano and L. Ortigosa. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, 93: 324-334.
3. Amiri, F, H. Arzani, M.R. Chaichi, S.J. Khajeeddin and M. Farahpour. 2009. The effectiveness of the modified PSIAC and EPM model for estimating soil erosion in determining the range of rangeland. *Journal of Rangeland*; 3(1): 138-154.

4. Amiri, F. 2010. Estimate of erosion and sedimentation in semi-arid basin using empirical models of erosion potential within a geographic information system. *Air, Soil and Water Research*, 3: ASWR-S3427.
5. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resource Association*, 34: 73-89.
6. Abdullah, M., R. Feagin and L. Mousavi. 2017. The use of spatial empirical models to estimate soil erosion in arid ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(2): 78. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5784-y>.
7. Alaei Taleghani, M. 2012. *Geomorphology of Iran*. Qomes Publications. 360 pages.
8. Fatolahzadeh, T. and M. Servati. 2014. Determination of erosion severity using quantitative and qualitative models in case study of Namrood Drainage Basin. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 4(1): 21-27.
9. Feiznia, S. and M. Zare. 2003. Geological survey sensitivity to erosion and sediment yield in Latiyan Watershed. *Iranian Journal of Natural Resources*, 56: 365-381.
10. Feiznia, S. 2008. *Applied sedimentology with emphasis on soil erosion and sediment production*. Publisher of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 364 pages (in Persian).
11. Feiznia, S. 1995. Resistance to intergranular corrosion rocks in different climates of Iran. *Journal of Natural Resources*, 47: 556-570.
12. Feiznia, S. and M. Zare. 2003. Geological survey sensitivity to erosion and sediment yield in Latian Watershed. *Iranian Journal of Natural Resources*, 56:365-381 (in Persian).
13. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin, and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23: 486-501.
14. Gavrilovic, Z. 1988. The use of an empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. *Proceeding of International Conference on River Regime*, John Wiley and Sons, 12: 411-422.
15. Gholami, Sh. 2003. The simulation of daily sediment yield by using distributed SWAT model in mountainous catchments (Amameh Catchments). *Research and Construction*, 59: 29-33 (in Persian).
16. Habibi, A.R. 2017. Comparison between erosion induced by water and wind of geomorphic units in the Karoon River Catchment using Irifer and PSIAC. *Geographical Space*, 57: 19-30.
17. Habibi, A.R. 2016. Investigation and simulation amount of runoff and sediment in semiarid climate of Iran, case study: Hablehrood Catchment. PhD Thesis, Kharazmi University, 143 pages.
18. Hamed, Y., Y. Albergel Pepin, J. Asseline, S. Nasri, P. Zante, R. Berndtsson, M. Niazy and M. Balah. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semi-arid catchment. *Catena*, (50): 1-16.
19. Hosseini, M. 2014. Water balance simulation of Garahsou Basin of Kermanshah Province using SWAT model. *Watershed Engineering and Management*, 6: 63-73 (in Persian).
20. Jordan, A. and L. Martinez-Zavala. 2008. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Journal of Forest Ecology and Management*, 255: 913-919.
21. Kinnell, P.I.A. 2005. Sediment transport by medium to large drops impacting flows at sub terminal velocity. *Journal of Soil Science Society of America*, 69(3): 902-905.
22. Khaksar, K., M. Ghodarzi, M.R. Gharibreza and M. Rahmati. 2006. Determine the susceptibility of geological formations in Maharlu Watershed erosion. *Earth Sciences*, 16(62): 116-129.
23. LIU, Ch., J. SUI, C. Zhao-Yin and L. Wang. 2008. Sediment load reduction in Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 23: 44-55.
24. Madadi, A. and S. Nikpour. 2012. Estimation of soil erosion and sediment production in Zal River Basin using PSIAC, MPSIAC and GIS methods. *Journal of Quantitative Geomorphology Researches*, 2(1): 133-154.
25. Mather, A.E., M. Stokes and J.S. Griffiths. 2004. Quaternary landscape evolution: a framework for understanding erosion, southeast Spain. *Land Degradation and Development*, 13(2): 89-109.
26. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Soil and Water Research Laboratory, 494 pages.
27. Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4): 91-133.
28. Rostamian, R., A. Jaleh Afyuni, M. Mousavi, S.F. Heidarpour, M. Jalalian and K. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences*, 53: 977-988.

29. Shariat Jafari, M., J. Ghyomiyan and H.R. Peyrowan. 2005. The classification of intrinsic sensitivity to erosion of soil and rock units (Iran central area Dranjyr deserts and Saghand). Engineering Geology and the Environment Conference, Tarbiat Modarres University, Tehran, 1180-1190.
30. Shariat Jafari, M., J. Ghyomiyan and H.R. Peyrowan. 2006. Sensitive nature of the geological formation to weathering and erosion in sedimentary basins located in the area, in the continental structure of the center. Publishing Tarbiat Moalem University, 6: 710-722.
31. Sheklabadi, M., H. Khademi and A.M. Charkhabi. 2003. Runoff and deposition yield in different material parent in Golabad Watershed, Ardestan. Journal of Agriculture and Natural Resources Science and Technology, 7(2): 85- 100 (in Persian).
32. Servati, M.R., R. Jafari and S. Asgari. 2008. Estimation of soil erosion and sediment production in Ilam Dam Basin using MPSIAC model. Geographical Research, 40(64): 29-35.
33. Sowers, J.M., J.T. Pearce and W. Littis. 2003. Geomorphology of the historical Silver Creek watershed. Walnut Creek, 925: 256-607.
34. Talebizadeh, M., S. Morid, M. Ayyoubzadeh and M. Ghasemzadeh. 2010. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. Water Resources Management, 24: 1747–1758.
35. Tangestani, M.H. 2006. Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 27(5): 585-597.
36. Tripathi, M.P., R.K. Panda, N.S. Raghuwanshi and R. Singh. 2004. Hydrological modeling of a small watershed using generated rainfall in the soil and water assessment tool model. Hydrological Processes, 18: 1811–1821.
37. Wallbrink, P.J., A.S. Murray, J.M. Olley and L.J. Olive. 1998. Determining sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia, using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. Water Resources Research, 34: 879–887.
38. Wasson, R.J., R.K. Mazari, B. Starr and G. Clifton. 1998. The recent history of erosion and sedimentation on the Southern Tablelands of southeastern Australia: sediment flux dominated by channel incision. Geomorphology, 24(4): 291-308.
39. Yamani, M. and A.A. Hadiya. 2004. Assessment of sediment and erosion in the watersheds leading to the Strait of Hormuz (the range between the rivers of Shuoor and Jask). Physical Research, 36(50): 117-141.
40. Yamani, M., H. Amonia and A. Kheyrizadeh. 2011. The assessment of erodible formations represents fluvial sediments through morphoscopy. Journal Research Environmental Erosion, 7: 17-28.
41. Zia Abadi, L. and H. Ahmadi. 2011. Comparison of EPM and geomorphology methods for erosion and sediment yield assessment in Kasilian Watershed. Desert, 16(2): 100-108.