نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره اول، ۱۳۹۸
http://jwsc.gau.ac.ir
۲۷-۴۸

پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و میزان فرسایش خاک در آبخیز بنکوه حوضه رودخانه حبله‌رود

احسان الوندی[۱]، *امیر سعدالدین[۲] و واحدبردی شیخ[۲]

[۱]دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،
[۲]دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۳

چکیده

سابقه و هدف: هدررفت منابع آب‌وخاک از پیامدهای بهره‌برداری نامتعادل از منابع تولید است. مدیریت بهینه اراضی باعث بهره‌برداری پایدار از منابع آب‌وخاک و کاهش تخریب این منابع می‌شود. هدف این پژوهش ارائه گزینه‌های مدیریتی مبتنی بر پوشش گیاهی و پیش‌بینی اثرات آن‌ها بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک در حوزه آبخیز بنکوه با استفاده از مدل‌سازی است. بدین‌ترتیب برنامه‌ریزان و مدیران آبخیز می‌توانند با کمک این پیش‌بینی‌ها، تصمیمات مناسبی برای حل مشکلات این حوضه اتخاذ نمایند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با توجه به نوع و گسترش مشکلات در حوزه آبخیز بنکوه (حدود ۳۳۰۰ کیلومترمربع) و تعیین اهمیت نسبی آن‌ها، یازده فعالیت مدیریتی شامل قرق، درختکاری، علوفه کاری، جوامع گیاهی کنار رودخانه‌ای، تراس‌بندی، اگروفارستری (دارکشت‌ورزی)، احداث باغ، پیتینگ (چاله‌کنی)، کنتورفارو (حفر شیار)، بذرپاشی و کپه‌کاری برای برطرف نمودن مشکلات حوضه انتخاب شدند. فیزیوگرافی و توپوگرافی این حوضه شامل بخش‌های کوهستانی و دشتی است. بارندگی متوسط سالیانه آن ۳۱۸ میلی‌متر و دمای متوسط سالیانه آن ۷/۸ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع بلندترین نقطه این محدوده ۴۰۵۳ متر از سطح دریا است. به‌منظور برآورد خصوصیات رواناب سطحی (ارتفاع رواناب، فسفر و نیترات) و مقدار فرسایش خاک در شرایط موجود به‌ترتیب از مدل L-THIA و معادله تجدیدنظر شده جهانی هدررفت خاک (RUSLE) در چارچوب سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. عامل‌های RUSLE شامل R، K، LS، C و P می‌باشند که به‌ترتیب از داده‌های بارندگی، نقشه خاک، مدل رقومی ارتفاع و فن سنجش‌ازدور محاسبه شده‌اند. برای پیش‌بینی اثر هر یک از اقدامات اصلاحی بر میزان فرسایش خاک، برآورد ارزش عددی عامل‌های P و C با توجه به جداول استاندارد موجود در متون علمی مربوط و بر مبنای قضاوت خبرگان انجام شد. برای ارزیابی کارایی مدل‌های، از معیارهای آماری RMSE و MAE استفاده شد. پس از ارزیابی کارایی مدل، از مدل‌ها برای پیش‌بینی اثرات احتمالی اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک استفاده شد.

* مسئول مکاتبه: amir.sadoddin@gmail.com

یافته‌ها: نقشه فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان فرسایش خاک در سطح حوضه، از مقدار ناچیز تا ۳۳/٤۹ تن در هکتار در سال متغیر است و ۱۱/۱۲ درصد از کل منطقه در طبقه فرسایشی زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. میزان ارتفاع رواناب سالانه حوضه از ۱/۱۲ تا ۹/۲۷ سانتی‌متر متغیر است و میانگین ارتفاع رواناب سالانه حوضه ٦/۷٤ سانتی‌متر برآورد شده است. تجزیه‌وتحلیل نتایج نشان می‌دهد که اقدامات اصلاحی قرق و کپه‌کاری با توجه به همه عامل‌ها (ارتفاع رواناب، فسفر، نیترات و فرسایش خاک) بیش‌ترین اثر را خواهند داشت؛ اما بر اساس واحد سطح اقدامات اصلاحی، علوفه‌کاری، درخت‌کاری و احداث باغ به‌ترتیب باعث کاهش ۰/۱۷، ۰/۱٤ و ۰/۱۳ درصدی ارتفاع رواناب خواهند شد. علاوه بر این، از نظر عامل‌های فرسایش خاک و فسفر اقدامات احداث باغ، درخت‌کاری و علوفه‌کاری به‌ترتیب بهترین عملکرد را ارائه خواهند کرد. از نظر عامل نیترات، اقدامات احداث باغ، درخت‌کاری و جوامع گیاهی کنار رودخانه‌ای به‌ترتیب حداکثر اختلاف را با مقادیر این عامل در وضعیت فعلی حوضه نشان خواهند داد. اجرای هم‌زمان تمامی فعالیت‌های مدیریتی باعث کاهش حدود ۱۳/۲۰ درصدی ارتفاع رواناب و ۸/۳۰ درصدی فرسایش حوضه خواهد شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها با آزمون RMSE و MAE نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عامل‌های حجم رواناب و رسوب دارای کم‌ترین خطا هستند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است؛ اما شبیه‌سازی عامل‌های فسفر و نیترات خطای بیش‌تری دارند.

نتیجه‌گیری: با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی و مورفولوژی حوزه آبخیز بنکوه و همچنین عامل‌های فرسایش طبیعی و انسانی حوضه، به‌منظور جلوگیری از هدررفت منابع خاک و آب باید به مناطق بحرانی توجه ویژه‌ای شود. با توجه به مشکلات آبخیز بنکوه در زمینه منابع آب‌وخاک، اجرای اقدامات اصلاحی مناسب برای حل مشکلات حوضه ضروری است. با توجه به وسعت زیاد مناطق مستعد برای اجرای فعالیت‌های قرق و کپه‌کاری در حوضه، این اقدامات بیش‌ترین تأثیر را در بهبود خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک‌دارند. به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب اقدامات اصلاحی توجه به سایر اثرات حاصل از اجرای اقدامات در مقیاس حوضه بنکوه از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهترین اقدامات مدیریتی (BMP)، حوضه رودخانه حبله‌رود، مدل L-THIA، مدل RUSLE، منابع آب‌وخاک

مقدمه

وقوع سیل و اثرات آن در زمان‌های اخیر بی‌سابقه بوده، به‌ویژه با تغییرات آب و هوایی و تغییرات پیوسته در سطح آب دریا به‌وضوح از اهمیت جهانی برخوردار است (۲۸). همچنین فرسایش آبی مشکلات عدیده‌ای مانند کاهش حاصلخیزی و بهره‌وری خاک از طریق کاهش اراضی قابل‌کشت، تخریب اکوسامانه و پخش آلاینده‌ها از طریق ورود جریان رسوب به رودخانه‌ها را به همراه دارد (٤۵)؛ بنابراین از آن‌جا که راهکارهای مناسب و کارآمد به‌منظور حفاظت از منابع آب‌وخاک، لازمه توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی است، اجرای فعالیت‌های آبخیزداری راهکاری مناسب، برای تحقق این امر می‌باشد (۳٦). عملیات ساختمانی، عملیات بیولوژیکی و ترکیبی از فعالیت‌های ساختمانی و بیولوژیکی از جمله فعالیت‌های مدیریتی آبخیز به‌منظور کنترل فرسایش و هدررفت خاک

محسوب می‌شوند. اجرای فعالیت‌های مدیریتی از نوع غیرساختمانی اغلب دشوارتر از انواع دیگر فعالیت‌ها است، زیرا لازمه اجرای انواع فعالیت غیرساختمانی، تغییر نوع رفتار مردم و آبخیزنشینان در برخورد با منابع طبیعی می‌باشد (٦). اجرای اقدامات مدیریتی مناسب در منطقه باعث بهبود شرایط اقتصادی و اجتماعی ساکنین محلی خواهد شد و از هدررفت منابع آب‌وخاک جلوگیری خواهد کرد. منظور از اقدامات مدیریتی مناسب در یک منطقه اقداماتی است که با دخالت در سیستم موجود، در جهت تغییر شرایط به‌سمت هدف صورت می‌گیرد، به‌عبارت دیگر تغییری منحصربه‌فرد در راستای نیل به اهداف مدیریتی می‌باشد (۳۵).

تغییرات کاربری اراضی در بین سایر عوامل، کلیدی‌ترین اثر معنی‌دار را روی عملکرد هیدرولوژیکی حوزه آبخیز ازجمله رواناب، سیل و فرسایش دارند. همچنین تغییر پوشش گیاهی یکی از عامل‌های مهم در تغییر فرسایش و تولید سیل حوزه آبخیز و کاهش تنوع زیستی و منابع طبیعی است (٤٢). تأثیرات هیدرولوژیک کاربری اراضی و مدیریت پوشش گیاهی در قالب تغییر در عمق رواناب، دبی حداقل، دبی حداکثر، رطوبت خاک و تبخیر و تعرق آشکار می‌شود. این تغییرات در بیش‌تر حالات می‌توانند دارای پیامدهایی روی خاک باشند؛ بنابراین ارزیابی اثرات تغییر پوشش گیاهی به‌منظور مدیریت مناسب و جلوگیری از تخریب و هدررفت خاک در مناطق مختلف امری ضروری است (۳۷).

هدررفت خاک و بار رسوب شاخص مهم اندازه‌گیری روند و شدت تخریب زمین یک منطقه است (۳۳). اندازه‌گیری هدررفت خاک و بار رسوب حوضه‌ها دشوار است به این دلیل از مدل‌های مختلف جهت تخمین آن‌ها استفاده می‌شود (۱۳). تخمین هدررفت خاک با استفاده از مدل‌های تجربی مانند رابطه جهانی فرسایش خاک USLE[1]، رابطه جهانی فرسایش خاک تصحیح‌شده MUSLE، رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده RUSLE و نسخه تصحیح‌شده رابطه جهانی فرسایش خاک USLE-M صورت می‌گیرد. هر یک از مدل‌ها با توجه به داده‌های موجود می‌تواند در مناطقی نتایج منطقی و قابل‌قبولی ارائه دهد (٤). برای کمی‌سازی تولید رسوب در حوزه آبخیز روش‌های ژئومورفولوژیکی توسعه‌یافته که یکی از این مدل‌های پرکاربرد مدل معادله جهانی هدررفت خاک اصلاح‌شده است (٤٤). RUSLE یک مدل مؤثر، توانا و ساده است که توانایی پیش‌بینی هدررفت خاک در مقیاس سلول به سلول را دارد و زمانی بسیار مؤثرتر است که برای برآورد فرسایش خاک استفاده شود (۳۰).

برای شبیه‌سازی آثار تغییر پوشش گیاهی یک منطقه یا حوزه آبخیز مدل‌های آب‌شناسی و کیفیت آب زیادی توسعه‌یافته است که معمولاً با یک سامانه اطلاعات جغرافیایی ادغام شده‌اند. مدل ارزیابی اثرات آب‌شناختی بلندمدت (L-THIA[2]) یکی از آن‌هاست. مدل L-THIA توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا توسعه داده شده است. این مدل یک ابزار مناسب برای کمک به سنجش اثرات بالقوه تغییر پوشش گیاهی بر رواناب سطحی و آلودگی آب است (٤٥). این مدل به‌عنوان یک ابزار قابل‌دسترسی و سریع برای استفاده در ارزیابی آثار بلندمدت تغییر پوشش گیاهی توسعه یافته است. هسته اصلی این مدل بر مبنای روش شماره منحنی (CN) است که به‌طور گسترده‌ای برای تخمین تغییر رفتار دبی در یک آبخیز به‌کار رفته است (٤٠).

پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب و فرسایش خاک موردتوجه بسیاری از

1- Universal Soil Loss Equation
2- Long-Term Hydrologic Impact Assessment

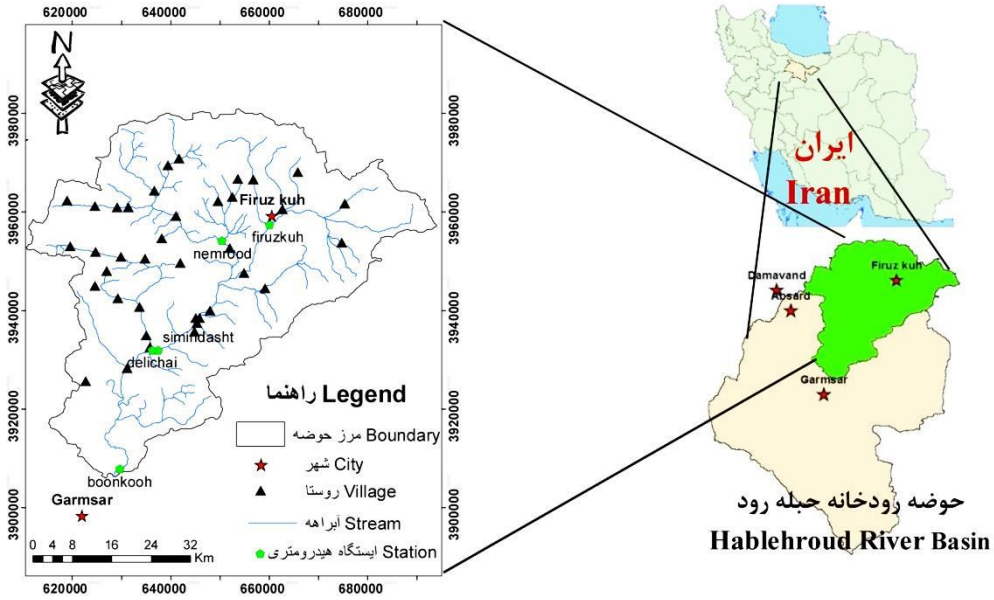
پژوهشگران در داخل و خارج از کشور قرار گرفته است. لئو و همکاران (۲۰۱۵)، ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی را بر روی هیدرولوژی و کیفیت آب، با مدل بارش- رواناب L-THIA در مقیاس حوزه آبخیز انجام دادند (۲۱). موانگی و همکاران (۲۰۱۵)، به ارزیابی تأثیر اقدامات حفاظتی آب‌وخاک بر روی کیفیت آب و تولید رسوب در حوضه ساسوموا در کنیا پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب نوار فیلتر و آبروی سبز منجر به کاهش ۸۰ درصد تولید رسوب می‌شود (۲۷). لیو و همکاران (۲۰۱۵)، طی پژوهشی ارزیابی تاثیرات اقدامات BMP و LID بر رواناب حاصل از بارندگی‌های طوفانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد حجم آب باران و آلاینده‌ها بعد از استفاده از BMP و LID هم به‌صورت انفرادی و هم به‌صورت پیوسته، کاهش یافت (۲۲). ششوکو و همکاران (۲۰۱۶)، طی پژوهشی اثرات اجرای بهترین اقدامات مدیریت (BMP) در اراضی مرتعی را با استفاده از مدل SWAT مورد استفاده قرار دادند (۳۸). لامبا و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر بهترین شیوه‌های مدیریت بر کاهش بار رسوب و فسفر در مقیاس حوزه آبخیز را با استفاده از مدل SWAT مورد مطالعه قرار دادند (۱۸). متیبا و همکاران (۲۰۱۸)، بهترین شیوه‌های مدیریتی را از نظر هزینه و اثر بخشی برای کنترل عملکرد رسوب در حوضه جوموند تونس مورد مطالعه قرار دادند (۲۶). جعفریان و همکاران (۱۳۹۶)، شبیه‌سازی اثر عملیات اصلاح و احیای مراتع بر هدررفت خاک با استفاده از مدل RUSLE را مورد مطالعه قرار دادند (۱۴). نوری و همکاران (۱۳۹۶)، تأثیر بهترین اقدامات مدیریتی در کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آب را در حوزه آبخیز سیمره مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بهترین اقدامات مدیریتی شامل اجرای کاهش مصرف کودهای شیمیایی و ایجاد نوار فیلتر در طول رودخانه می‌باشد (۲۹).

حوضه رودخانه حبله‌رود از حوضه‌های مهم و درعین‌حال بحرانی از نظر تغییر کاربری، فرسایش و سیل‌خیزی در استان تهران و سمنان به‌شمار می‌رود. به‌منظور کنترل فرسایش، سیلاب و اعمال اقدامات اصلاحی باید اقدام به کمی‌سازی فرسایش و رواناب در سطح حوضه صورت گیرد؛ بنابراین از آن‌جایی‌که در منطقه موردنظر، مطالعه هم‌زمان پیشنهاد اقدامات اصلاحی و تأثیر مستقیم این اقدامات بر میزان خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک صورت نگرفته است. بدین‌منظور هدف این پژوهش، ارائه گزینه‌های مدیریتی مبتنی بر پوشش گیاهی و پیش‌بینی اثرات آن‌ها بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک در حوزه آبخیز بنکوه (حدود ۳۳۰۰ کیلومترمربع) با استفاده از مدل‌سازی است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز بنکوه با مختصات عرض جغرافیایی °۳۵ تا ´۱۰ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ´۳۹ °۵۱ تا ´۸ °۵۳ شرقی و با مساحت ۳۲۶۹ کیلومترمربع در استان تهران واقع شده است (شکل ۱). فیزیوگرافی و توپوگرافی این محدوده شامل بخش‌های کوهستانی و دشتی است. بخش شمالی آن عمدتاً کوهستان‌ها و تپه‌ها و همچنین دشت‌های میانکوهی در محدوده استان تهران واقع شده است. بارندگی متوسط سالیانه این حوضه ۳۱۸ میلی‌متر و دمای متوسط سالیانه آن ۷/۸ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع بلندترین نقطه این محدوده ۴۰۵۳ متر از سطح دریا است. عمده‌ترین کاربری‌های اراضی شامل مراتع و چراگاه‌های فصلی، اراضی کشاورزی دیم، باغات و اراضی بایر هستند. حوضه رودخانه حبله‌رود دارای مشکلات طبیعی و انسان‌ساخت زیادی (از جمله پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و افزایش املاح و شوری آن، کاهش کیفیت خاک زراعی و شوری

اراضی، بروز سیلاب، افزایش برداشت از آب رودخانه حبله‌رود در بالادست و از چاه‌های کشاورزی، تصرفات اراضی ملی در عرصه‌های بالادست رودخانه، چرای بیش‌ازحد دام‌ها، تبدیل مراتع به دیمزارهای کم‌بازده، تخریب جنگل، توسعه شهرنشینی و توسعه صنعتی) است (۱۷).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز بنکوه- حوضه رودخانه حبله‌رود.

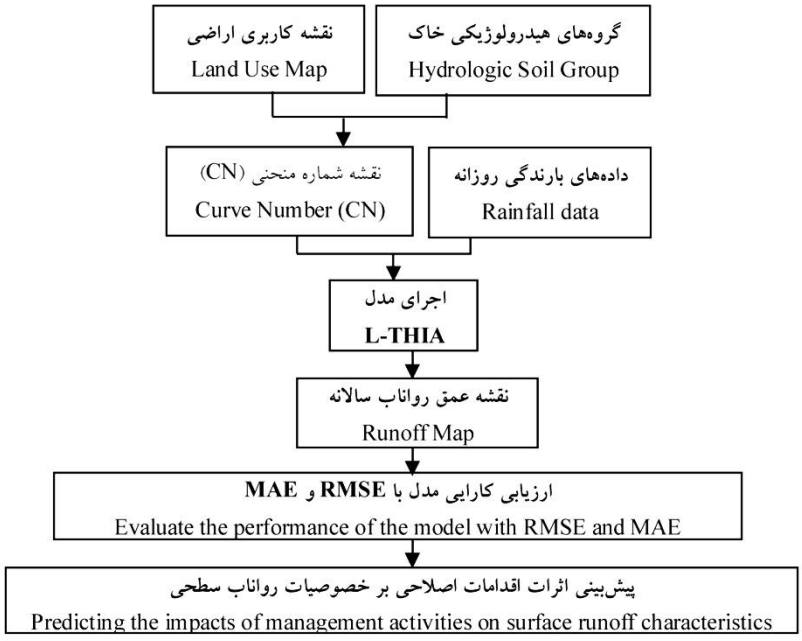
Figure 1. Location of the Bonekooh Watershed and Hablehroud River Basin.

روش تحقیق: در این پژوهش پس از شبیه‌سازی خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک برای وضعیت فعلی حوضه، به پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک در حوزه آبخیز بنکوه با استفاده از مدل L-THIA و RUSLE پرداخته شده است. در این قسمت به جزئیات روش تحقیق پرداخته شده است. لازم به ذکر است به‌منظور ارزیابی روش‌های مورداستفاده در برآورد خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک، از معیارهای متداول آماری شامل جذر میانگین مربع خطا[1] و میانگین خطای مطلق[2] استفاده شد (۲). این معیارهای آماری نشان‌دهنده میزان خطای مدل می‌باشند که بهترین مقدار آن‌ها برابر صفر است. لازم به ذکر است به‌منظور ارزیابی از آمار ثبت‌شده در ایستگاه بنکوه، در خروجی حوضه استفاده شد.

برآورد خصوصیات رواناب سطحی: به‌منظور مدل‌سازی عمق رواناب سالانه و آلاینده‌های آب (فسفر، نیترات)، از مدل L-THIA استفاده شده است. مدل L-THIA با استفاده از داده‌های بارندگی روزانه و مقدار CN، رواناب روزانه را برای مقادیر مختلف CN تخمین می‌زند، سپس مدل مقادیر روزانه را جمع زده و رواناب سالانه را ارائه می‌نماید که به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود. برای انجام این پژوهش، ابتدا به جمع‌آوری داده‌های مناسب از جمله اطلاعات کاربری اراضی، خاک، ۳۰ سال آمار روزانه بارش اقدام شد. مدل L-THIA، هشت طبقه کاربری زمین شامل مناطق آبی، تجاری، کشاورزی، مناطق مسکونی متراکم، مناطق مسکونی کم تراکم، مرتع و یا

1- Root Mean Square Error
2- Mean Absolute Error

علفزار، جنگل و مناطق صنعتی (۱۹) را برای اجرای مدل‌سازی در نظر می‌گیرد؛ بنابراین برای اجرای مدل، نقشه‌های کاربری زمین منطقه مطالعاتی بر مبنای چارچوب مدل طبقه‌بندی شد. لایه دیگر مورداستفاده در مدل L-THIA، داده‌های مربوط به گروه‌های هیدرولوژیکی خاک است. در این مدل لایه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک بر مبنای احتمال بالقوه تولید رواناب به چهار گروه هیدرولوژیکی A، B، C، D طبقه‌بندی می‌شود (۳۱). برای تهیه این لایه از نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حوضه رودخانه حبله‌رود استفاده شده است. در مدل L-THIA برای ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی بلندمدت، داده‌های بارش روزانه منطقه برای دوره زمانی ۳۰ ساله باید جمع‌آوری شود. بدین‌منظور از دوره مشترک آماری (۱۳۹۴-۱۳۶۵) ایستگاه‌های فیروزکوه، نمرود، سیمین‌دشت و بنکوه استفاده شد. لازم به ذکر است در این پژوهش ابتدا بررسی همگنی داده‌ها با استفاده از روش ران تست انجام شد و نواقص آماری داده‌های موجود برطرف شد. همچنین از نظر داده‌های پرت نیز مورد بررسی قرار گرفتند. پس از تهیه نقشه‌های مذکور، مدل L-THIA با استفاده از فایل متنی داده‌های بارش، نقشه کاربری فعلی و خاک اجرا شد و خصوصیات رواناب سطحی (حجم رواناب، فسفر، نیترات) استخراج شد. مراحل شبیه‌سازی خصوصیات رواناب سطحی در حوزه آبخیز بنکوه در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- مراحل شبیه‌سازی خصوصیات رواناب سطحی با استفاده از مدل L-THIA.

Figure 2. Simulation steps of surface runoff characteristics using the L-THIA model.

برآورد فرسایش سالانه خاک: مدل RUSLE به‌طور گسترده در سراسر جهان برای پیش‌بینی بلندمدت میزان فرسایش شیاری و بین شیاری در مقیاس مزرعه تا حوضه با انواع مختلف شیوه‌های مدیریتی استفاده می‌شود (۱۱). به‌منظور تهیه نقشه نهایی فرسایش خاک ابتدا همه عوامل مدل RUSLE شامل R، K، L، S، C و P به‌صورت نقشه‌هایی رستری و اندازه سلول ۷۰ متری تهیه شد و سپس با ضرب همه این لایه‌ها میزان

فرسایش خاک در سطح پیکسل محاسبه و نقشه نهایی فرسایش خاک به‌دست آمد. شایان‌ذکر است در این پژوهش نقشه فرسایش خاک در واحد سطح پیکسل (اندازه سلول ۷۰ متر) تهیه شده است. سپس با میانگین‌گیری از مقادیر فرسایش هر یک از پیکسل‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS، میانگین فرسایش برای کل حوضه برآورد شده است. مراحل اجرای مدل RUSLE به‌منظور پیش‌بینی فرسایش سالانه خاک در زیر تشریح شده است (شکل ۳).

عامل فرسایندگی باران (R): این عامل بیانگر عامل فرسایش‌دهندگی باران یا معیار فرسایش برای مدت بارندگی موردنظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند که این شاخص (EI30) از ترکیب انرژی جنبشی باران (E) و بیش‌ترین شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای منطقه (I30) به‌دست می‌آید (۳). برای مناطقی که جزئیات داده‌های اقلیمی وجود ندارد، R را می‌توان با استفاده از شاخص فورنیر تخمین زد (٤٦). رابطه شاخص فورنیر F به‌صورت زیر است.

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pi^2}{P} \quad (۱)$$

که در آن، Pi متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است. سپس با جای‌گذاری شاخص فورنیر در روابط زیر که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹٤) برای مناطق فاقد داده‌های تفضیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است، مقدار عامل R برای ایستگاه‌ها برآورد می‌شود.

$$R\text{-}Factor = (0.07397 * MFI^{1.847}) \quad (۲)$$

MFI<55 mm

$$R\text{-}Factor = (95.77 - 6.081 * MFI + 0.4770 * MFI^2) \quad (۳)$$

MFI>55 mm

که در آن، R عامل فرسایندگی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$) است. در این پژوهش به‌منظور برآورد شاخص فرسایندگی باران از داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه ۱۳ ایستگاه هواشناسی با دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (۱۳۹٤-۱۳۷۵) استفاده شد. در نهایت، با توجه به مقدار فرسایندگی باران هر ایستگاه با استفاده از روش کریگینگ در نرم‌افزار ArcGIS نقشه فرسایندگی باران منطقه تهیه شد.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K): عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)، سرعت فرسایش‌پذیری خاک به‌ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه‌گیری می‌شود و اغلب با استفاده از خصوصیات خاک تعیین می‌شود (۸). عامل فرسایش‌پذیری در مدل RUSLE را می‌توان از طریق منحنی‌های مربوطه تعیین کرد. در این پژوهش، با استفاده از نقشه بافت خاک حوضه رودخانه حبله‌رود و میزان امتیاز مربوط به هر نوع بافت خاک با استفاده از روش استوارت و همکاران (۱۹۷۵)، نقشه عامل K در محیط ArcGIS تهیه شد.

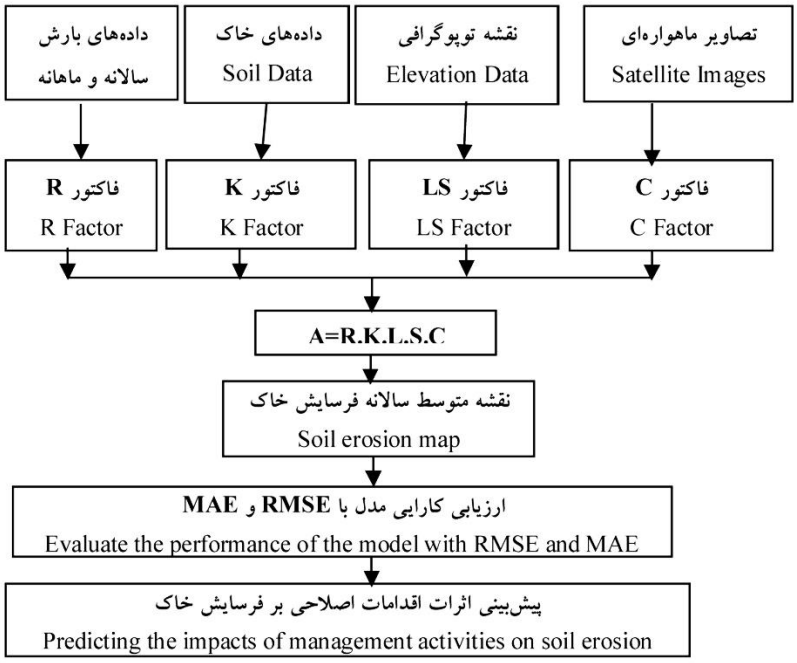
عامل طول و درجه شیب (LS): در این پژوهش ابتدا تابع Fill روی DEM قبل از استفاده برای استخراج عامل LS اجرا شد. سپس نقشه‌های جهت جریان، جریان تجمعی و شیب از DEM ۷۰ متری منطقه در افزونه Arc Hydro در محیط GIS تهیه شد. در نهایت برای به‌دست آورد ضریب LS از رابطه ۱۰ در محیط Raster Calculator استفاده شد.

$$LS=(Flow\ accumulation \times Cell\ resolution/22.1)^{0.4} \times Sin(slope \times 3.14/180)/0.09)^{1.3} \quad (٤)$$

$$C = \exp[-\alpha\ NDVI/(\beta - NDVI)] \quad (۵)$$

که در آن، α, β پارامترهای بدون واحد هستند و مقادیر آن به‌ترتیب برابر ۲ و ۱ است.

عامل عملیات حفاظتی (P): عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک که در آن، میزان خاک فرسایش یافته از منطقه با کشت نواری و بر روی خطوط تراز یا تراس‌بندی‌شده به خاک ازدست‌رفته با کشت خطی در جهت شیب (از بالا به پایین) است. چنان‌چه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد، مقدار آن‌یک در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جا که عامل حفاظت P در صورت نبود اطلاعات کافی درباره چگونگی مدیریت اراضی می‌تواند از معادله حذف شد، در این پژوهش به سبب نبود اطلاعات کافی در زمینه عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک در منطقه، عامل P در شرایط وضعیت فعلی حوضه محاسبه نشده است؛ اما به‌منظور پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر فرسایش و این‌که بتوانیم اثرات اقدامات اصلاحی را برآورد کنیم از عامل P استفاده شد.



شکل ۳- مراحل تهیه نقشه فرسایش خاک در نرم‌افزار ArcGIS.

Figure 3. Steps of soil erosion mapping in ArcGIS software.

پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی: با توجه به تغییرات کاربری شدید در آبخیز بنکوه و موقعیت قرارگیری حوضه، لزوم اجرای فعالیت‌های مدیریتی مناسب، ضروری به‌نظر می‌رسد. پس از شناسایی مشکلات متنوع موجود در سطح آبخیز موردمطالعه و تعیین اهمیت نسبی آن‌ها، یازده فعالیت مدیریتی برای برطرف نمودن مشکلات حوضه تهیه شد. قواعد اجرای هر فعالیت مدیریتی در حوضه بنکوه نیز با توجه به شرایط طبیعی حاکم بر آن، شناخت و بازدید از منطقه، بررسی منابع علمی و نظرخواهی از کارشناسان واحد اجرا و بخش دانشگاهی تعیین شد. قواعد ایجاد هر یک از فعالیت‌های مدیریتی پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است.

در این پژوهش پس از ارزیابی کارایی مدل‌ها برای وضعیت فعلی حوزه آبخیز بنکوه، به پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک پرداخته شده است. لازم به ذکر است برآورد طیف ارزش عددی عامل‌های P و

C در روش RUSLE به‌منظور پیش‌بینی اثر هر یک از اقدامات اصلاحی پیشنهادی بر میزان فرسایش خاک در سطح حوزه آبخیز بنکوه با توجه به جداول و روابط مخصوص (استاندارد موجود) و بر مبنای قضاوت خبرگان (۵ نفر) انجام شده است. شایان ذکر است خبرگان این پژوهش اعضای هیئت علمی دانشگاه با زمینه تخصصی فرسایش و رسوب بودند.

جدول ۱- قواعد ایجاد فعالیت‌های مدیریتی پیشنهادی برای حوضه بنکوه.

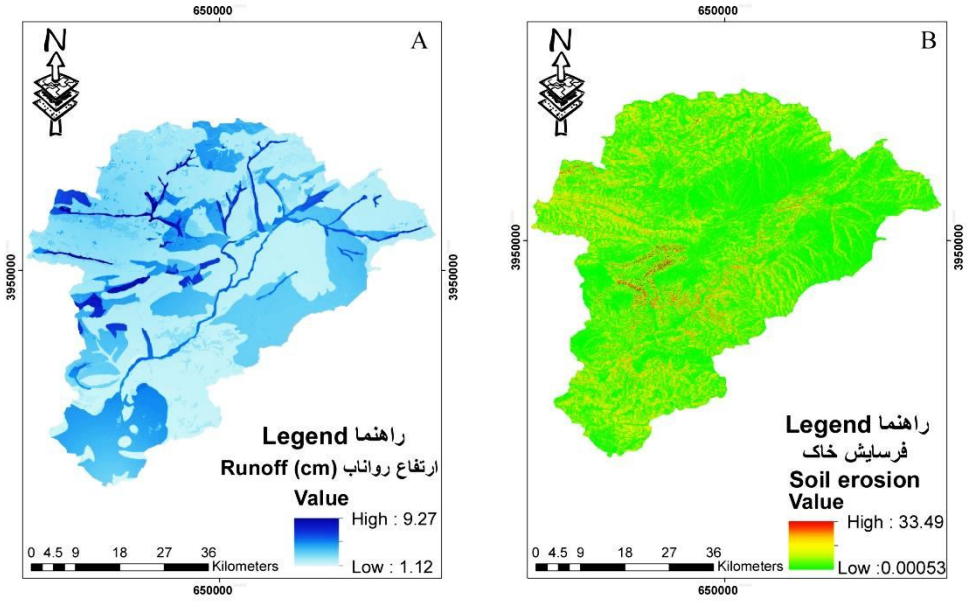
Table 1. The rules of developing the proposed management activities for the Bonekooh Watershed.

ردیف / Row	عنوان فعالیت	ویژگی‌های مناطق مستعد اجرا / Characteristics
1	قرق Rangeland exclusion	ارضی مرتعی، بارندگی ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، شیب بیش از ٦٠ درصد، خاک کم‌عمق تا نیمه عمیق و ارتفاع بدون محدودیت (١٦). Rangeland area, 150-300 (mm) Rainfall, up to 60% slope, shallow and semi-deep soil, no height restrictions.
2	درخت‌کاری Afforestation	مناطق با سابقه جنگلی و جنگلی کم تراکم، بارندگی بیش از ٤٠٠ میلی‌متر، خاک عمیق- نیمه عمیق و ارتفاع ۱۰۰ تا ٢٦٠٠ متر (١٧) Low forest density, up to 400(mm) Rainfall, deep and semi-deep soil, elevation 100-2600 (m).
3	علوفه کاری Forage cultivation	اراضی زراعی، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، شیب بیشتر از ۵۰ درصد، خاک عمیق- نیمه عمیق و ارتفاع بدون محدودیت (١٧) Cultivated area, up to 250(mm) Rainfall, up to 50% slope, deep and semi-deep soil, no height restrictions.
4	جوامع گیاهی کنار رودخانه‌ای Riparian	نواحی کنار رودخانه، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، خاک عمیق و نیمه عمیق. حریم با عرض ۵۰ متر از محور مرکزی آبراهه برای رتبه ۵ و ٦، با عرض ۲۵ متر از محور مرکزی آبراهه برای رتبه ۳ و ٤ و ۱۲/۵ متر از محور مرکزی آبراهه با رتبه ۲. (٦) Areas bordering river, up to 250(mm) Rainfall, deep and semi-deep soil.
5	تراس‌بندی Terracing	اراضی زارعی، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، شیب ۱۰ تا ۳۰ درصد، خاک عمیق (١٦). Cultivated area, up to 250(mm) Rainfall, 10-30 ٪slope, deep soil.
6	اگروفارستری (دارکشت‌ورزی) Agroforestry	اراضی زارعی، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، شیب ۱۰ تا ۳۰ درصد، خاک نیمه عمیق (٦). Cultivated area, up to 250(mm) Rainfall, 10-30% slope, semi-deep soil.
7	احداث باغ Orchard development	اراضی زارعی، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، شیب ۳۰ تا ۵۰ درصد، خاک عمیق- نیمه عمیق (٦). Cultivated area, up to 250(mm) Rainfall, 30-50 ٪slope, deep and semi-deep soil.
8	پیتینگ (چاله‌کنی) Pitting	اراضی مرتعی، بارندگی ۱۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر، شیب کم‌تر از ۸ درصد، خاک کم‌عمق تا متوسط (٢٣). Rangeland area, 120 –250 (mm) Rainfall, down to 8% slope, shallow and semi-deep soil.
9	کنتورفارو (حفرشیار) Contour furrow	اراضی مراتعی، بارندگی ۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، شیب کم‌تر از ۲۰ درصد، خاک نیمه عمیق تا عمیق (٢٣). Rangeland area, 250 – 350 (mm) Rainfall, down to 20% slope, deep and semi-deep soil.
10	بذرپاشی Seeding	اراضی مراتعی، بارندگی بیش از ۲۵۰ میلی‌متر، شیب ۲۵ تا ٤٥ درصد، خاک نیمه عمیق تا عمیق (٢٣). Rangeland area, up to 250(mm) Rainfall, 25-45 ٪slope, deep and semi-deep soil.
11	کپه‌کاری Pile seeding	اراضی مراتعی، بارندگی بیش از ۳۰۰ میلی‌متر، شیب ٤٥ تا ٦٠ درصد، خاک کم‌عمق تا متوسط (٢٣). Rangeland area, up to 300(mm) Rainfall, 45-60 ٪slope, shallow and semi-deep soil.

نتایج

با توجه به نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک منطقه، نقشه شماره منحنی حوضه تهیه شد. میزان شماره منحنی از ۵۸ تا ۹٤ برای منطقه برآورد شد. همان‌طور که در شکل ٤ (الف) مشخص است میزان ارتفاع رواناب سالانه حوضه از ۱/۱۲ تا ۹/۲۷ سانتی‌متر متغیر است و میانگین ارتفاع رواناب سالانه حوضه ٦/۷٤ سانتی‌متر برآورد شده است. مناطق با پتانسیل بسیار بالای تولید سیل بیش‌تر در اراضی شهری و مراتع تنک با نفوذپذیری بسیار کم حاکم است.

مقدار فرسایش خاک برای کل حوضه از ۰/۰۰۰۵۳ تا ۳۳/٤۹ تن در هکتار در سال به‌دست آمد. شکل ٤ (ب) نقشه نهایی فرسایش خاک را برای حوضه بنکوه نشان می‌دهد. پهنه‌بندی فرسایش خاک به پنج طبقه فرسایشی خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد تقسیم‌بندی شد. طبقه فرسایشی خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد به‌ترتیب ۵۹/۳٦، ۱٦/۱۲، ۱۳/٤۰، ۹/۲۳ و ۱/۸۹ درصد از کل حوزه آبخیز را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین میزان متوسط فرسایش منطقه ٦/۱۱ تن در هکتار در سال برآورد شد. مناطق با فرسایش زیاد تحت‌تأثیر تغییرات عوامل LS، K و C هستند؛ که این عوامل همبستگی بیش‌تری را با فرسایش خاک نشان می‌دهند.



شکل ٤- ارتفاع رواناب (سانتی‌متر) (الف) و فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) (ب) برآورد شده با استفاده از مدل L-THIA و RUSLE.

Figure 4. Runoff (A) and soil erosion (B) simulated using the RUSLE and L-THIA models in the Bonekooh Watershed.

نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مقادیر شبیه‌سازی‌شده خصوصیات رواناب سطحی و رسوب در سطح حوضه بنکوه با آزمون RMSE و MAE در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، عامل‌های حجم رواناب و رسوب از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق

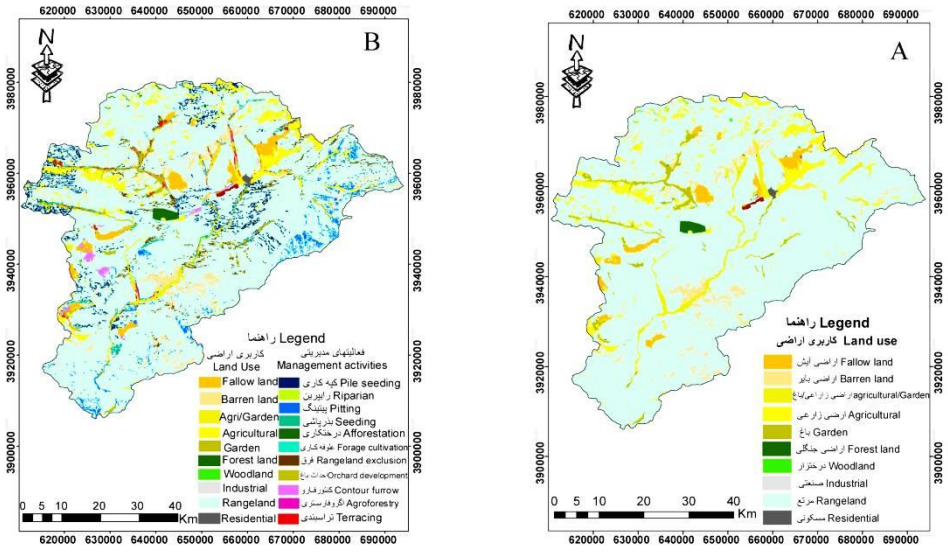
خطا، دارای کم‌ترین خطا هستند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی این عوامل است؛ اما مقادیر شبیه‌سازی عامل‌های فسفر و نیترات نسبت به عوامل حجم رواناب و رسوب خطای بیش‌تری را نشان می‌دهند.

جدول ۲- پارامترهای آماری مورد بررسی برای تعیین کارایی مدل‌های L-THIA و RUSLE.

Table 2. The statistical parameters used for performance analysis of the L-THIA & RUSLE models.

MAE	RMSE	حوضه بنکوه/ Bonekooh Watershed
1.51	1.86	حجم رواناب (m^3) Runoff volume
1.64	1.84	رسوب ($ton\ km^{-2}$) Sediment
1.54	2.42	فسفر (ton/y) Phosphor
1.75	2.08	نیترات و نیتریت (ton/y) Nitrate

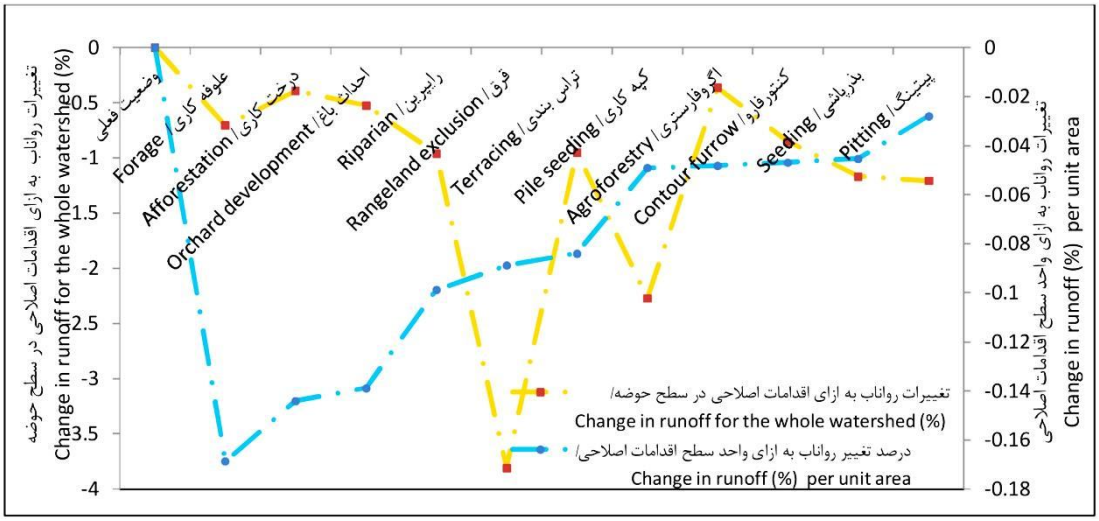
همان‌طور که اشاره شد یازده فعالیت مدیریتی در این حوضه انتخاب شده است. در شکل ۵ مناطق مستعد اجرای هر یک از این فعالیت‌های مدیریتی پیشنهادی در سطح حوزه آبخیز بنکوه ارائه شده است. پراکنش مکانی فعالیت‌های مدیریتی پیشنهادی در سطح آبخیز نشان داد ۱۰۵۵/۷۵، ۳۹۱/۰۶، ۷۰۵/۰۱، ۳۵۳/٦٤، ۲٥٤/۲٦، ۱۸٥۷/۳، ٤۷٤٤/۲٤، ٤۰۳۷/۰۱، ٤٥۰۷/٦۷، ۲۳۰۰/۸۳ و ۹۰٦/۲۲ هکتار از سطح حوضه به‌ترتیب شرایط تراس‌بندی، علوفه کاری، اگروفارستری، احداث باغ، درخت‌کاری، کنتورفارو، قرق، پیتینگ، کپه‌کاری، بذرپاشی و بهبود جوامع گیاهی کنار رودخانه‌ای را دارا هستند.



شکل ۵- نقشه کاربری اراضی فعلی (a) و مناطق مستعد اجرای فعالیت‌های مدیریتی پیشنهادی (b).

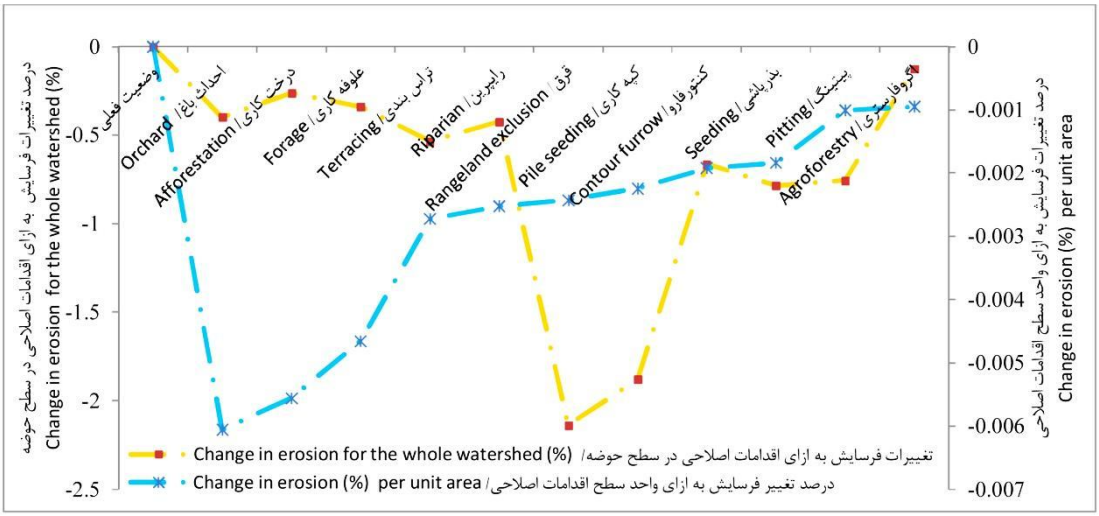
Figure 5. The current land use map (a) and he proposed management activities (b).

درصد تغییرات مقادیر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک برآورد شده برای هر یک از یازده فعالیت مدیریتی نسبت به وضعیت فعلی حوضه در شکل‌های ٦ تا ۹ ارائه شده است. خط صفر نشان‌دهنده وضعیت فعلی حوضه بوده و هرچه مقادیر فعالیت‌های مدیریتی از این خط دور شوند بیانگر تغییرات بیش‌تر این فعالیت مدیریتی نسبت به وضعیت فعلی حوضه است. لازم به ذکر است اجرای هم‌زمان تمامی فعالیت‌های مدیریتی باعث کاهش ۱۳/۲۰ درصدی ارتفاع رواناب و ۸/۳۰ درصدی فرسایش خواهد شد.



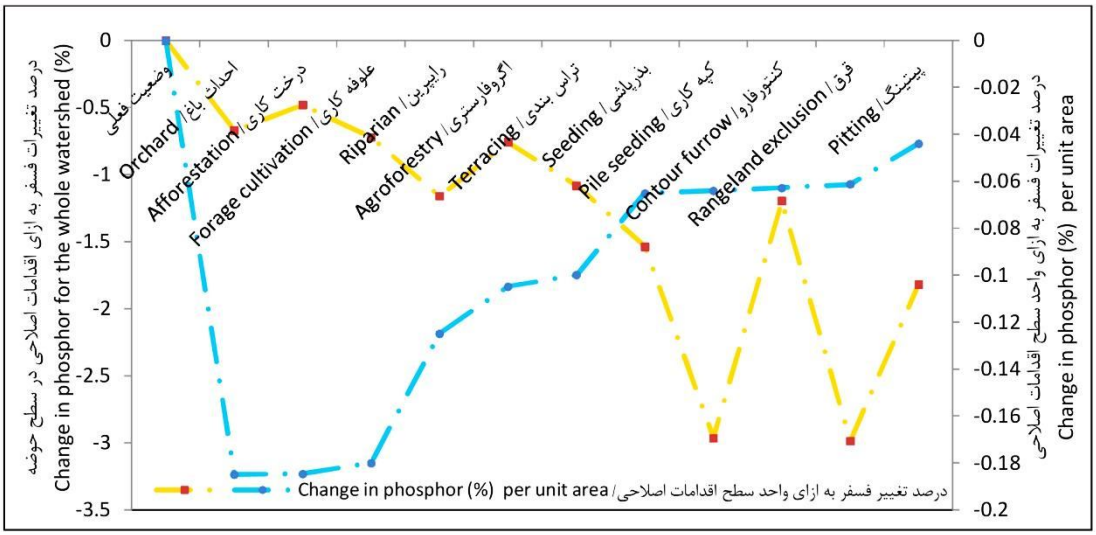
شکل ٦- تغییرات مقادیر ارتفاع رواناب برآورد شده برای اقدامات اصلاحی مختلف نسبت به وضعیت فعلی در حوزه آبخیز بنکوه.

Figure 6. Change of estimated runoff in percent for different management actives compared to the current condition in the Bonekooh Watershed.



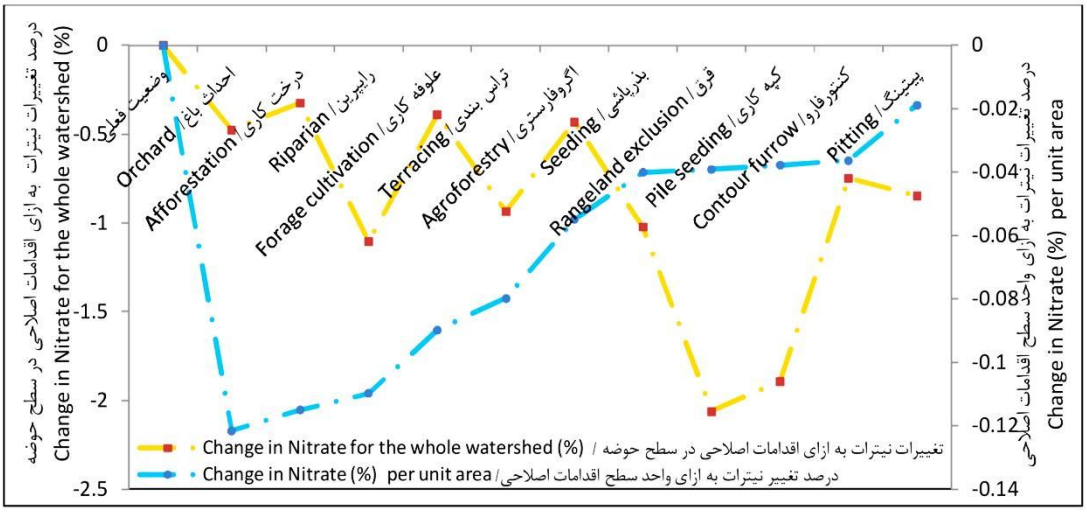
شکل ۷- تغییرات مقادیر فرسایش خاک برآورد شده برای اقدامات اصلاحی مختلف نسبت به وضعیت فعلی در حوزه آبخیز بنکوه.

Figure 7. Change of estimated soil erosion in percent for different management actives compared to the current condition in the Bonekooh Watershed.



شکل ۸- تغییرات مقادیر فسفر برآورد شده برای اقدامات اصلاحی مختلف نسبت به وضعیت فعلی در حوزه آبخیز بنکوه.

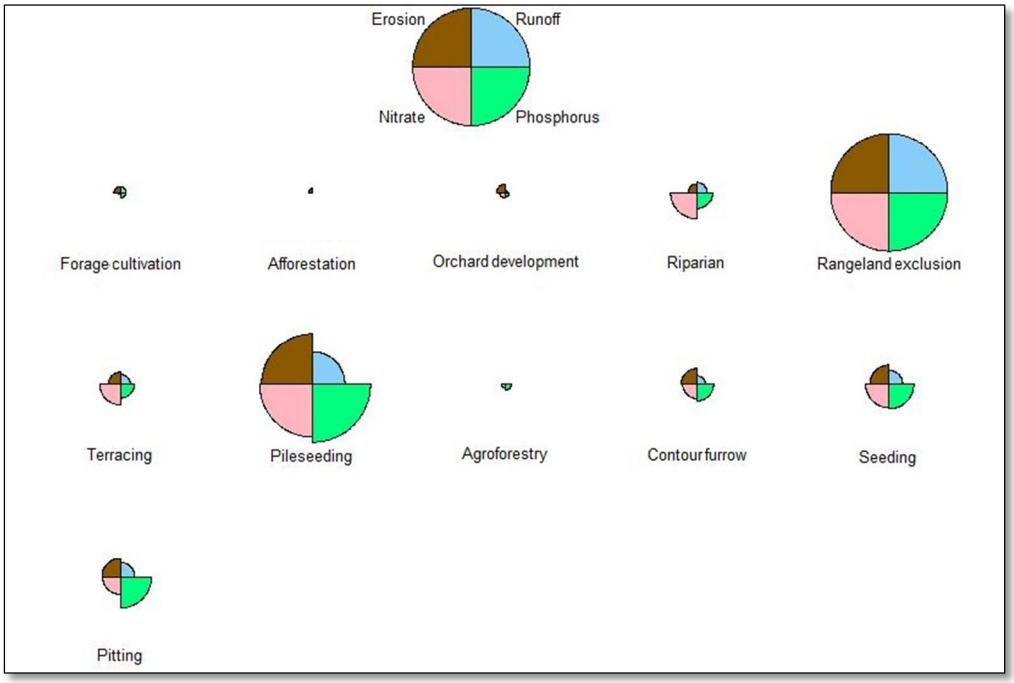
Figure 8. Change of estimated phosphor in percent for different management actives compared to the current condition in the Bonekooh Watershed.



شکل ۹- تغییرات مقادیر نیترات برآورد شده برای اقدامات اصلاحی مختلف نسبت به وضعیت فعلی در حوزه آبخیز بنکوه.

Figure 9. Change of estimated Nitrate in percent for different management actives compared to the current condition in the Bonekooh Watershed.

اثرات هر یک از یازده اقدام اصلاحی روی خصوصیات رواناب سطحی (ارتفاع رواناب، فسفر، نیترات) و فرسایش خاک به‌منظور مقایسه به‌صورت نمودار قطاعی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است از نظر همه شاخص‌های ارزیابی اقدامات اصلاحی قرق و کپه‌کاری بیش‌ترین تأثیر را در کاهش ارتفاع رواناب، فسفر، نیترات و فرسایش خاک داشته‌اند.



شکل ۱۰- شاخص‌های اثربخشی اقدامات اصلاحی مختلف در آبخیز بنکوه.

Figure 10. Impact indicators for management activities in the Bonekooh Watershed.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک با استفاده از مدل L-THIA و RUSLE موردمطالعه قرار گرفت. نتایج بسیاری از پژوهش‌ها بر تأثیر مهم بارندگی در فرایند فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز مختلف تأکید دارند (۱۵ و ۳٤). بدین‌منظور در این مطالعه از داده‌های بارش ماهانه و سالانه در برآورد پارامترهای موردنیاز شاخص فورنیه برای دوره آماری ۲۰ ساله استفاده شده است. لازم به ذکر است بارش روزانه برای توصیف تغییرات میزان فرسایش خاک در فصول مختلف شاخص بهتری است، اما دسترسی آسان، سهولت در محاسبات و ثبات در یک منطقه مزیت داده‌های بارش سالانه است (۳۰). مقدار عامل R در منطقه مورد مطالعه از ۱/۰۹ تا ۲/٤۸ (MJ mm $ha^{-1}h^{-1}y^{-1}$) متغیر بود. بیش‌ترین مقدار فرسایندگی باران در شمال‌غربی حوضه و کم‌ترین آن در نواحی جنوبی حوضه بود. به‌عبارت دیگر، کاهش عامل R، رابطه نزدیکی با کاهش ارتفاع و باران از شمال‌غربی حوضه به سمت جنوب حوضه دارد. شایان ذکر است، به‌منظور استفاده از روش‌های دقیق‌تر و مناسب‌تر برای برآورد عامل فرسایندگی باران نیازمند تجهیز و پایش داده‌های دقیق‌تر هستیم.

در این مطالعه مقدار عامل K برای منطقه در دامنه ۰/۱٦ تا ۰/٤۲ (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}) تعیین شد. مقادیر بیش‌تر K نشان‌دهنده غالب بودن خاک‌های لومی و سیلتی در منطقه است که سبب افزایش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود. قسمت‌های شرقی و جنوبی حوضه مقادیر بالاتر عامل فرسایش‌پذیری خاک را به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است طی پژوهش انجام‌شده توسط حبیبی و همکاران (۲۰۱٦) و همچنین بررسی‌های به‌عمل آمده، اکثریت مناطق شرقی و جنوبی حوضه را سازندهای مارنی پوشش می‌دهند که پتانسیل بالایی برای ایجاد فرسایش و تولید رسوب دارند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، مقدار عامل طول و درصد شیب (LS) بین ۰/۱ تا ۳۳/۳ محاسبه شد. به‌طورکلی، افزایش طول و درصد شیب به‌علت تشدید سرعت و قدرت فرسایندگی جریان سطحی مقدار فرسایش خاک را در واحد سطح افزایش می‌دهد. همچنین قسمت‌های غربی و شمالی حوضه از ارتفاع بیش‌تر و شیب بیش‌تری برخوردار هستند که این عامل باعث تشدید فرسایش در این مناطق شده است. مقایسه نقشه طول و درصد شیب با نقشه نهایی فرسایش نشان داده است که با افزایش طول و درصد شیب منطقه شدت و میزان فرسایش نیز افزایش‌یافته است که با نتایج فلاح و همکاران (۲۰۱۵) و محمدی و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد.

در این پژوهش، نقشه عامل C بر اساس شاخص NDVI و رابطه ۵ تهیه شد. مقدار C با NDVI رابطه خطی معکوس دارد، یعنی وقتی مقدار NDVI به‌سمت ۱- نزدیک می‌شود منطقه فقیر از پوشش گیاهی و وقتی به‌سمت ۱ نزدیک می‌شود منطقه دارای پوشش گیاهی است (۲۰). مقادیر عامل پوشش گیاهی برای منطقه مورد مطالعه از ۰/۰۰۶۳ تا ۰/۹۱ به‌دست آمد. نقشه عامل C نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی است و کم‌ترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد. به‌طورکلی می‌توان گفت، به‌دلیل وسعت زیاد اراضی مرتعی، اکثریت منطقه مورد مطالعه مقادیر بیش‌تری از عامل C را به خود اختصاص داده‌اند.

لازم به ذکر است مقدار فرسایش خاک برای کل حوضه از ۰/۰۰۰۵۳ تا ۳۳/۴۹ تن در هکتار در سال به‌دست آمد. مناطق با فرسایش زیاد و خیلی زیاد بیش‌تر تحت‌تأثیر تغییرات عوامل LS، K و C هستند. از دلایل بیش‌تر بودن فرسایش و تولید رسوب در زیرحوضه‌های بنکوه و سیمین‌دشت می‌توان به تمرکز سازندهای مارنی و کاهش پوشش گیاهی در این مناطق اشاره کرد.

نتایج نشان داد میزان ارتفاع رواناب سالانه حوضه از ۱/۱۲ تا ۹/۲۷ سانتی‌متر متغیر است. مناطق با مقادیر بیش‌تر ارتفاع رواناب نشان‌دهنده نفوذپذیری کم به‌دلیل وجود مراتع تنک، همچنین بارندگی و شیب زیاد منطقه است. با توجه تولید سیل بالای قسمت اعظم حوضه، برای جلوگیری از فرسایش اراضی و خسارت جانی و مالی احتمالی ناشی از این پتانسیل بالا و همچنین کنترل و استفاده بهینه از حجم سیلاب برای جبران بخش مهمی از نیازهای آبی منطقه، باید در برنامه‌ریزی‌های محیطی مورد توجه قرار گیرد تا بتوانیم جنبه‌های منفی این پتانسیل بالا را در جهت مثبت سوق دهیم؛ بنابراین باید اقدامات اساسی در جلوگیری از ایجاد رواناب و سیل در مواقع بارش صورت گیرد.

بدین‌منظور در این پژوهش سعی شد پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی بر خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک در حوزه آبخیز بنکوه مورد مطالعه قرار گیرد؛ بنابراین ابتدا ارزیابی کارایی مدل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، این مدل کارایی مناسبی را به‌منظور پیش‌بینی اثرات اقدامات اصلاحی در سطح حوضه دارا است. در پژوهش‌های آحیابلیم و همکاران (۲۰۱۲)، لیو و همکاران (۲۰۱۵) و لیو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات سناریوهای مدیریتی در مقیاس حوزه آبخیز پرداخته شده است. نتایج این پژوهش‌ها با این پژوهش هم‌راستا بوده و نشان‌دهنده کارایی این مدل در بررسی پیش‌بینی اثرات سناریوهای مدیریتی برای آینده می‌باشد.

همان‌طور که در نتایج ارائه شد، متوسط ارتفاع رواناب حوضه ٦/٧٤ سانتی‌متر و میزان متوسط فرسایش ٦/١١ تن در هکتار در سال برآورد شده است؛ اما در حالت اجرای تمامی فعالیت‌های مدیریتی به‌صورت هم‌زمان میزان متوسط ارتفاع رواناب ۵/۸۷ سانتی‌متر و فرسایش حوضه ۵/٦۰ تن در هکتار

برآورد شده است؛ بنابراین اجرای هم‌زمان فعالیت‌های مدیریتی باعث کاهش ۱۳/۱۹ درصدی ارتفاع رواناب و ۸/۳۰ درصدی فرسایش حوضه شده است. همچنین مقادیر درصد تغییرات کاهش فرسایش و ارتفاع رواناب در همه فعالیت‌های مدیریتی نسبت به وضع موجود یک روند افزایشی داشته است؛ بنابراین می‌توان گفت ارزیابی اثرات سناریوهای مدیریتی کاربری اراضی بر روی ارتفاع رواناب و فرسایش خاک برای آبخیز بنکوه نشان می‌دهد که با اعمال اقدامات اصلاحی، مقادیر ارتفاع رواناب و فرسایش خاک کاهش‌یافته است. نتایج این بخش با یافته‌های بینح و همکاران (۲۰۱۰) در کاهش فرسایش با اجرای سناریوهای مدیریتی در مقایسه با وضع موجود همخوانی دارد. به‌علاوه با نتایج سلیمانی و همکاران (۲۰۰۹) در رابطه با اصلاح کاربری اراضی برای کاهش بار رسوب و فرسایش، همسو بوده است.

همان‌طور که در بخش نتایج مشخص است درصد تغییرات ارتفاع رواناب در واحد سطح اقدامات اصلاحی نشان داد، اقدامات علوفه کاری، درخت‌کاری و احداث باغ به‌ترتیب حداکثر اختلاف و اقدامات پیتینگ، بذرپاشی و کنتورفارو حداقل اختلاف را نسبت به وضعیت فعلی حوضه دارند؛ بنابراین می‌توان گفت اقدامات علوفه‌کاری، درخت‌کاری و احداث باغ باعث بیش‌ترین کاهش ارتفاع رواناب نسبت به وضعیت فعلی در واحد سطح شده‌اند. نتایج این بخش با یافته‌های بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۶) همسو بوده به‌طوری‌که در پژوهش ایشان سناریوهای مدیریتی درخت‌کاری باعث کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تا اوج گردیده است. دلایل این امر بیانگر موقعیت قرارگیری این فعالیت‌ها در شیب‌های زیاد منطقه و همچنین پوشش متراکم آن‌هاست. با اجرای فعالیت علوفه‌کاری در شیب‌های بالای ۵۰ درصد تا حدودی از وقوع رواناب شدید ناشی از بارندگی جلوگیری خواهد شد. همچنین با توجه به چندساله بودن یونجه، این گیاه به‌طور کامل از سطح زمین برداشت‌نشده و در ماه‌های حساس به وقوع سیل، رواناب کم‌تری جاری خواهد شد. لازم به ذکر است درختان جنگلی و گیاهان باغی با افزایش سطح تاج پوشش فرایند ربایش توسط برگ‌ها را تسهیل می‌کنند؛ اما نتایج درصد تغییرات ارتفاع رواناب به‌ازای مساحت کل اقدامات اصلاحی نشان داد اقدامات قرق و کپه‌کاری به‌ترتیب حداکثر اختلاف و اقدامات اگروفارستری و درختکاری حداقل اختلاف را نسبت به وضعیت فعلی حوضه دارند. از دلایل این امر می‌توان گفت با توجه وسعت زیاد اراضی مرتعی در سطح حوضه فعالیت‌های قرق و کپه‌کاری مساحت نسبتاً زیادی از حوضه را به خود اختصاص داده‌اند، اما فعالیت درخت‌کاری در بین بقیه فعالیت‌ها کم‌ترین مساحت را دارد.

با توجه به نتایج پژوهش از نظر عامل فسفر اقدامات اصلاحی احداث باغ، درخت‌کاری و علوفه‌کاری و از نظر عامل نیترات اقدامات احداث باغ، درخت‌کاری و جوامع گیاهی کنار رودخانه‌ای به‌ترتیب حداکثر اختلاف را با وضعیت فعلی حوضه در واحد سطح اقدامات اصلاحی از خود نشان دادند؛ اما نتایج درصد تغییرات فسفر و نیترات به‌ازای مساحت کل اقدامات اصلاحی نشان داد اقدامات قرق و کپه‌کاری به‌ترتیب حداکثر اختلاف را نسبت به وضعیت فعلی حوضه دارند.

با توجه به نتایج پژوهش، درصد تغییرات فرسایش خاک در واحد سطح اقدامات اصلاحی نشان داد، اقدامات احداث باغ، درخت‌کاری و علوفه‌کاری به‌ترتیب حداکثر اختلاف و اقدامات اگروفارستری، پیتینگ و بذرپاشی حداقل اختلاف را نسبت به وضعیت فعلی فرسایش حوضه دارند. فعالیت‌های اگروفارستری و پیتینگ با توجه به موقعیت قرارگیری

در دامنه‌های کم‌شیب کم‌ترین تأثیر را در کاهش فرسایش خاک داشته‌اند؛ بنابراین می‌توان گفت اقدامات احداث باغ، درخت‌کاری و علوفه کاری به‌ترتیب بیش‌ترین کاهش فرسایش خاک را نسبت به وضعیت فعلی حوضه در واحد سطح دارند؛ بنابراین افزایش مساحت این اقدامات مدیریتی می‌تواند باعث کاهش فرسایش و بهبود شرایط آبخیز بنکوه شود؛ اما نتایج درصد تغییرات فرسایش خاک به‌ازای مساحت کل اقدامات اصلاحی نشان داد اقدامات قرق و کپه‌کاری به‌ترتیب حداکثر اختلاف و اقدامات اگروفارستری و درخت‌کاری کم‌ترین اختلاف را نسبت به وضعیت فعلی حوضه دارند.

بنابراین از آن‌جا که اقدامات اصلاحی علوفه کاری، درخت‌کاری و احداث باغ در کاهش ارتفاع رواناب و فرسایش خاک در واحد سطح اقدامات اصلاحی نقش به‌سزایی را ایفا می‌کنند، اما با توجه به وسعت زیاد اراضی مرتعی در سطح حوضه بنکوه و مناطق مستعد برای اجرای فعالیت‌های قرق و کپه‌کاری، این اقدامات بیش‌ترین تأثیر را در بهبود خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک به‌ازای مساحت کل اقدامات اصلاحی دارند.

شایان ذکر است، شبیه‌سازی خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های L-THIA و RUSLE به‌دلیل کمبود داده‌ها با عدم قطعیت‌هایی روبرو است؛ بنابراین نتایج این پژوهش بیش‌تر به مقایسه اثرگذاری نسبی اقدامات اصلاحی بر روی خصوصیات رواناب سطحی و فرسایش خاک تأکید دارد.

در مجموع می‌توان گفت در حوزه آبخیز بنکوه با توجه به شرایط توپوگرافی و مورفولوژیکی حوضه و همچنین عوامل فرسایش طبیعی و انسانی، باید به مناطق بحرانی از نظر فرسایش و رواناب توجه ویژه‌ای شود تا از هدررفت منابع خاکی و آبی و پیامدهای ناشی از آن‌ها جلوگیری شود؛ بنابراین با توجه به مشکلات آبخیز بنکوه در زمینه منابع آب‌وخاک، اجرای اقدامات اصلاحی در این حوضه ضروری است. در این میان گزینه‌های مدیریتی مبتنی بر پوشش گیاهی به‌دلیل کم‌هزینه‌تر بودن، سازگار بودن با مسائل اکولوژیکی و اثربخشی طولانی‌تر بیش‌تر مدنظر قرار دارند. نکته مهم و شایان توجه این است که برای توفیق بیش‌تر در فرایند انتخاب و اجرای گزینه‌های مدیریتی باید به ارزش‌ها و اولویت‌های ذینفعان مختلف در حوضه توجه شود. همچنین به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب اقدامات اصلاحی، در کنار اثرات فیزیکی، توجه به اثرات اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی اقدامات اصلاحی ضروری است.

منابع

1. Ahiablame, L., Engel, B.A., and Chaubey, I. 2012. Representation and evaluation of low impact development practices with L-THIA-LID: an example for site planning. Environ. Poll. 1: 2. 34-45.
2. Akbarifard, S., Qaderi, K., and Aliannejad, M. 2017. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum flood-routing model using water cycle algorithm, J. Water. Manage. Res. 8: 16. 33-43.
3. Arekhi, S., and Niazi, Y. 2010. Investigating application of GIS and RS to estimate soil erosion and sediment yield using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran), J. Water Soil Cons. 17: 2. 1-28. (In Persian)
4. Bagarello, V., Di Stefano, C., Ferro, V., Giordano, M., and Pampalone, V. 2012. Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, south Italy. Appl. Eng. Agric. 28: 2. 199-206.

5. Bahremand, A., Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L., and Kunikova, E. 2006. Application of WetSpa model for assessing land use impacts on floods in the Margecany-Hornasd Watershed. Slovaia. J. Water Sci. Technol. 53: 10. 37-45.
6. Bai, M., Sadoddin, A., and Salman Mahini, A.R. 2014. Prediction of the effects of implementing ecological management scenarios on landscape structure for Chehel - Chai Watershed in Golestan province of Iran. J. Geograph. Space. 13: 44. 19-46. (In Persian)
7. Binh, Ph.D., Wu, Ch., and Hsieh, Sh. 2010. Land use change effects on discharge and sediment yield of Song Cau Catchment in northern Vietnam. J. Environ. Sci. Engin. 5: 1. 92-101.
8. Bonilla, C., José, A., Reyes, L., and Magri, A. 2010. Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. J. Agric. Res. 70: 1. 159-169.
9. Fallah Suraki, M., Kavian, A., and Omidvar, E. 2015. Zoning of soil erosion hazard in the Haraz Watershed by using model RUSLE2. National Conference on Climate Change and Engineering Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran- September 17.
10. Farhan, Y., Dalal, Z., and Farhan, I. 2013. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS and GIS techniques: A case study of the Kufranja Watershed, northern Jordan. J. Water Resour. Prot. 5: 12. 1247-1261.
11. Ganasri, B., and Ramesh, H. 2015. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. Geoscience Frontiers. Pp: 1-9.
12. Habibi, H., Amir Safari, A., and Karam, A. 2016. Determining of the amount of sediment yield Marl lands in watershed in rainfall simulator scale. J. Water. Engin. Manage. 8: 3. 275-289. (In Persian)
13. Haregeweyn, N., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., de Vente, J., Nyssen, J., Deckers, J., and Moeyersons, J. 2012. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia. Land Degrad. Dev. 24: 2. 188-204.
14. Jafarian, Z., Beshtar, V., and Kavian, A. 2017. Simulation effects of improvement and restoration operations of rangeland on soil loss using RUSLE model, Physical Geography research quarterly. 49: 1. 55-69. (In Persian)
15. Kamaludin, K., Lihan, T., Ali Rahman, Z., Mustapha, M., Idris, W., and Rahim, S. 2013. Integration of remote sensing, RUSLE and GIS to model potential soil loss and sediment yield (SY). Hydrol. Earth System Sci. 10: 4567-4596.
16. Karimi Sangchini, E., Ownegh, M., Sadoddin, A., Tahmasebi Pur, N., and Rezaee, H. 2017. A system dynamics model to predict the effects of vegetation-based management scenarios on structural landscape ecology in Hablehrud River Basin, Watershed Engineering and Management. 9: 1. 58-70. (In Persian)
17. Keshtkar, A.R., Salajegheh, A., Sadoddin, A., and Allan, M.G. 2013. Application of Bayesian networks for sustainability assessment in catchment modeling and management, case study: the Hablehrood river catchment. Ecological Modeling. 268: 48-54.
18. Lamba, J., Thompson, A., Karthikeyan, K.G., Panuska, J., and Good, L. 2016. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model, Inter. J. Sed. Res. 31: 386-394.
19. Li, N., Xu, Y., and Guo, H.C. 2007. Analysis of Long-Term Impact of urbanization on surface runoff in Xitiaoxi river basin. Environmental Informatics Archives. 5: 346-353.
20. Lim, K.J., Choi, J., Kim, K., Sagong, M., and Engel, B.A. 2003. Development of sediment assessment tool for effective erosion control (SATEEC) in small scale watershed. Transactions of the Korean Society of Agricultural Engineers. 45: 5. 85-96.

21. Liu, Y., Ahiablame, L., Bralts, V., and Engel, B. 2015. Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff, J. Environ. Manage. 147: 12-23.
22. Liu, Y., Bralts, V.F., and Engel, B.A. 2015. Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. Science of the Total Environment. 511: 298-308.
23. Moghaddam, M.R. 2011. Range and range management, Tehran University Press, 470p. (In Persian)
24. Mohammadi, M., Fallah, M., Kavian, K., Gholami, L., and Omidvar, E. 2017. The application of RUSLE Model in spatial distribution determination of soil loss Hazard. J. Ecohydrol. 3: 4. 645-658. (In Persian)
25. Moore, I.D., and Wilson, J.P. 1992. Length slope factor for the Revised Universal Soil Loss equation: simplified method of solution. J. Soil Wat. Corner. 47: 5. 423-428.
26. Mtibaa, S., Hotta, N., and Irie, M. 2018. Analysis of the efficacy and cost-effectiveness of best management practices for controlling sediment yield: A case study of the Joumine watershed, Tunisia, Science of the Total Environment. 617: 1-16.
27. Mwangi, J.K., Shisanya, C.A., Gathenya, J.M., Namirembe, S., and Moriasi, S. 2015. A modeling approach to evaluate the impact of conservation practices on water and sediment yield in Sasumua Watershed, Kenya. Soil and Water Conservation. 70: 2. 75-90.
28. Nkwunonwo, U.C., Whitworth, M., and Baily, B. 2015. A Review and critical analysis of the efforts towards urban flood reduction in the lagos region of Nigeria, Nat., Hazards Earth Syst., Sci. Discuss. Pp: 3897-3923.
29. Noori, Z., Salajegheh, A., Malekian, A., and Moghadamnia, A. 2018. Investigating the effects of best management practices on the reduction of point and non-point source pollution of water using SWAT model (Case Study: Seimareh River). Iran. J. Soil Water Res. 48: 5. 995-1006. (In Persian)
30. Pandey, A., Chowdary, V., and Mal, B. 2007. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. Water Resources Management. 21: 4. 742-746.
31. Perry, P., and Nawaz, R. 2008. An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United kingdom. Landscape and Urban Planning. 86: 1-13.
32. Renard, K.G., and Freimund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. J. Hydrol. 157: 287-306.
33. Sadeghi, S.H.R., and Saeidi, P. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. J. Hydrol. Sci. 55: 5. 821-831.
34. Sadeghi, S.H.R., Moatamednia, M., and Behzadfar, M. 2011. Spatial and temporal variations in the Rainfall Erosivity Factor for Iran. J. Agr. Sci. Tech. 13: 451-464.
35. Sadoddin, A., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., Croke, B.W., and Newham, L.T. H. 2011. A Bayesian model decision support system for salinity management. First International Conference of Sustainable Watershed Management (SuWaMa), Istanbul, Turkey.
36. Sadoddin, A., Shahabi, M., and Bai, M. 2017. Integrated watershed assessment and management Principles and approaches for modeling and decision making. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Publishing. 170p. (In Persian)
37. Sekara, W.G., Gupta, N.A., Valeo, C., Hasbani, J.G., Qiao, Y., Delaney, P. and Marceau, D.J. 2012. Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada. J. Hydrol. 4: 41. 220-232.
38. SheshukovKyle, A., Douglas-Mankin, K., Sinnathamby, S., and Daggupati, P. 2016. Pasture BMP effectiveness using an HRU-based subarea approach in SWAT, J. Environ. Manage. 166: 276-284.

39. Solaimani, K., Modallaldoust, S., and Lotfi, S. 2009. Investigation of land use changes on soil erosion process using geographical information system. Inter. J. Environ. Sci. Technol. 6: 3. 415-424.
40. Tang, Z., Engel, B.A., Pijanowski, B.C., and Lim, K.J. 2005. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. Environmental impact at a watershed scale. J. Environ. Manage. 76: 45-35.
41. Teh, S.H. 2011. Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on CAMERON HIGHLANDS, MALAYSIA for hydropower development, A 30 ECTS credit units Master´s thesis, Pp: 1-71.
42. Turner, B.L., Moss, R.H., and SKole, D.L. 1993. Relating land use and global Land-cover change: A proposal for an IGBP- HDP core project global change report, Stokholm, Sweden. Pp: 221-223.
43. Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., and Montanarella, L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe, EUR19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 34p.
44. Vipul Shinde, K., Tiwari, S., and Manjushree, S. 2010. Prioritization of micro watersheds on the basis of soil erosion hazard using remote sensing and geographic information system. J. Water Resour. Environ. Engin. 2: 3. 130-136.
45. Wang, G., Gertner, G., Fang, S., and Anderson, A.B. 2003. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 69: 8. 889-898.
46. Yang, L., Ma, K., Guo, Q., and Bai, X. 2008. Evaluating long-term hydrological impacts of regional urbanisation in Hanyang, China, using a GIS model and remote sensing. J. Sust. Dev. World Ecol. 15: 350-356.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(1), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir

Predicting the impacts of management activities on surface runoff characteristics and soil erosion in the Bonekooh Watershed – Hablehroud River-Iran

E. Alvandi[1], *A. Sadoddin[2] and V.B. Sheikh[2]

[1]Ph.D. Student of Watershed Managment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, [2]Associate Prof., Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 05.30.2018; Accepted: 11.24.2018

Abstract

Background and Objectives: The loss of water and soil resources are the consequences of unbalanced exploitation of production resources. Optimal land management leads to sustainable exploitation of water and soil resources and hence reduces the depletion of these resources. The aim of this research is to develop a list of vegetation-based management activities and to predict the impacts of the activities on surface runoff characteristics and soil erosion in the Bonekooh Watershed using a modeling exercise. The predictions can assist watershed planners and managers to make appropriate decisions solving the problems in the watershed.

Materials and Methods: In this research, considering the type and extent of the environmental problems in the Bonekooh Watershed (about 3300 km^2) and determining their relative importance, 11 management activities including rangeland exclusion, afforestation, forage cultivation, riparian restoration, terracing, agro-forestry, orchard development, pitting, contour furrow, seeding, and pile seeding were chosen to solve the watershed problems. The mean annual precipitation and air temperature of this river catchment are 318 mm and 7.8 ^oC, respectively. The height of the highest point is 4053 meters above sea level. The L-THIA model and the Global Soil Loss Equation (RUSLE) model within the framework of the GIS were used to estimate the surface runoff characteristics (runoff, phosphorus and nitrate) and the amount of soil erosion, respectively. The RUSLE factors include R, K, LS, C, and P, which are calculated from rainfall data, regional soil maps, digital elevation models, and remote sensing techniques, respectively. The values of P and C factors in the RUSLE were estimated according to the standard tables provided in the relevant literature and based on expert judgment. Statistical criteria of RMSE and MAE were used to evaluate the efficiency of the models for the current status of the watershed. Subsequent to model evaluation, the models were used to predict the possible impacts of various management activities on surface runoff characteristics and soil erosion.

Results: Soil erosion map shows that the amount of soil erosion changes from an insignificant value to 33.49 (tons per hectare per year) in the region. Also, 11.12 percent of the total area is located in the high and very high erosion classes. Annual runoff varies from 1.12 to 9.27 cm with an average of 6.74 cm. The analysis indicates that rangeland exclusion and pile seeding management activities in the watershed will have the most impact considering all indices (surface runoff, soil erosion, Phosphorus, Nitrate). But per unit of management activities, forage cultivation, afforestation, and orchard development have the most impact on runoff depth index, respectively. Additionally, considering both soil erosion and phosphorus indices, orchard

* Corresponding Author; Email: amir.sadoddin@gmail.com

development, afforestation, and forage cultivation activities will have the best performance, respectively. In addition, in terms of nitrate index, orchard development, afforestation and riparian activities will present maximum differences with the index value for the current status of the watershed. Implementing of all management activities will result a decrease of runoff depth by about 13.20% and a reduction of soil erosion by 8.30% in the watershed. The results of model evaluation using RMSE and MAE tests show that the simulation of surface runoff and sediment components has the least error, which indicates the high accuracy of the model in the simulation; but the simulation of phosphorus and nitrate components have more error.

Conclusion: Given the topographic and morphologic conditions of the Bonekooh watershed, and also natural and human-made erosion factors for the watershed, critical areas should be considered in order to prevent the loss of soil and water resources. Because of existing water and soil resources problems in the Bonekooh Watershed, it is required to implement appropriate management activities to fix the problem. Due to the vast extent of areas being suitable for implementing rangeland exclusion and pile seeding activities in the watershed, these activities have the greatest impact on improvement of surface runoff characteristics and soil erosion. To make an improved decision in choosing the best management activities, it is suggested to consider other impacts arising from implementing the activities at the watershed scale from economic, social and ecological point of views.

Keywords: Best Management Practices (BMP), L-THIA model, RUSLE model, The Hablehroud River, Water and soil resources