دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بررسی کارایی مدل RHEM در برآورد فرسایش آبی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سنگانه- خراسان رضوی)

م. فعله گری[۱]، ع. طالبی[۲]، م. ت. دستورانی[۲] و ع. ص. رنگ آور[۳]

۱- کارشناس ارشد آبخیزداری دانشگاه یزد نویسنده مسوول: m.felegari@gmail.com
۲- دانشیار دانشگاه یزد
۳- مربی پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، خراسان رضوی

چکیده:

مدل‌های شبیه‌سازی عمدتاً به طور فزاینده‌ای در پیش‌بینی مقدار هدر رفت خاک و انتقال رسوب مؤثر هستند. برای ارزیابی اثرات مدیریتی مختلف روی فرسایش خاک و انتخاب بهترین اقدامات مدیریتی استفاده از مدل (خصوصا مدل‌های فرآیند محور) و اعتبار سنجی آنها گامی مثبت به شمار می رود. در این تحقیق مدل RHEM (Rangeland Hydrology and Erosion Model) در برآورد فرسایش خاک در ایستگاه تحقیقاتی سنگانه در استان خراسان رضوی از طریق نصب پلات‌های اندازه‌گیری فرسایش خاک و ثبت بارندگی مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس مدل اجرا شد و مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده رواناب و رسوب با همدیگر مقایسه شدند. بعد از آن اقدام به آنالیز حساسیت مدل شد و واسنجی روی پارامترهای حساس انجام گردید و مدل با پارامترهای واسنجی شده اجرا شد. در مرحله واسنجی مقادیر کارایی (E_{NS}) و ضریب تعیین (r^2) مدل برای رسوب به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۵ و برای رواناب ۰/۶۰ و ۰/۷۰ بود. نتایج (E_{NS}) و (r^2) مدل در مرحله اعتبار سنجی برای رسوب به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۸۴ و برای رواناب ۰/۱۱ و ۰/۶۵ بود. نتایج (E_{NS}) و (r^2) نشان داد که نتایج مدل برای برآورد رسوب قابل قبول بوده و می‌تواند در برآورد هدر رفت خاک در حوزه آبخیز سنگانه استفاده شود.

واژه های کلیدی: فرسایش دامنه، رواناب، RHEM، آنالیز حساسیت، سنگانه

مقدمه

در کشور ما فرسایش هر ساله خسارات جبران ناپذیری را به اکوسیستم‌های حوزه‌های آبخیز و اقتصاد کشور وارد می‌سازد. آبخیزهای ایران در قرن حاضر و خصوصاً دهه‌های اخیر، دچار دگرگونی‌های زیادی در زمینه مدیریت و پوشش شده‌اند. برآیند نیروهای مخرب ناشی از مشکلات گذشته و حال موجب شده است که فرسایش و تولید رسوب از سطح حوزه‌ها بشدت افزایش یابد. هر چند در رابطه با مقدار

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

فرسایش و رسوب در ایران آمارهای نسبتاً متفاوتی ارائه شده است، اما براساس مدارک موجود می‌توان دریافت که مقدار رسوب در ۴۰ سال گذشته از ۵۰۰ میلیون تن خاک در سال به ۱ میلیارد تن در سال گزارش شده است (۲). متأسفانه عدم وجود الگو و مدل دقیق برآورد فرسایش، مانع از آن شده که زیان ناشی از فرسایش به صورت مطلوبی تعیین گردد.

با توجه به مشکلات بوجود آمده در رابطه فرسایش و جلوگیری از خسارات بیشتر و همچنین به منظور احیای منابع تخریب شده نیاز به برآورد و اندازه‌گیری رسوب می‌باشد، در چنین شرایطی می توان رسوب دهی خروجی حوزه‌ها را برای بدست آوردن چشم اندازی از وضعیت فرسایش و تلفات خاک آبخیز بالادست به کار برد (۲). راه مناسب دیگری که برای برآورد فرسایش و رسوب وجود دارد، اندازه‌گیری غیرمستقیم به کمک روابط و مدل های ارائه شده است. در این رابطه مدل‌های شبیه‌سازی به ابزارهای با اهمیتی جهت آنالیز فرآیندهای طبیعی دامنه‌ها و حوزه‌های آبخیز و همچنین توسعه سناریوهای مختلف مدیریتی آبخیزداری تبدیل شده‌اند (۵، ۷، ۱۰ و ۱۸).

در این میان اهمیت فرسایش در سطح دامنه به عنوان نقطه آغازین فرسایش در حوزه‌های آبخیز از جایگاه خاصی برخوردار می‌باشد. فرآیندهایی که کنده شدن مواد، حمل و رسوبگذاری در سطح دامنه را بر عهده دارند، در قالب فرآیندهای فرسایشی بیان می‌شود که بسیار پیچیده بوده و در این حالت یک مدل برآورد فرسایش در مدیریت منابع طبیعی لازم و ضروری است (۳). مدل‌سازی فرآیند فرسایش خاک در سطح دامنه از دهه ۱۹۴۰ توسط الیسون و همکاران شروع و سپس به صورت روابطی در دهه ۱۹۶۰ توسط میر و ویشمایر (۹) ارائه شد (۱۶). در نهایت مدل WEPP[1] از مفهوم شیار و بین شیار در فرسایش خاک استفاده کرد تا فرآیندهای فرسایش در سطح دامنه را شبیه سازی کند و نقش خاک، گیاه، بقایای گیاهی و باران در این عمل را تشریح نماید (۸). مدل WEPP یک مدل با کارایی بالا در برآورد فرسایش است ولی عواملی همچون پیچیدگی استفاده از این مدل و همچنین نیاز به داده‌های ورودی زیاد، کاربرد این مدل را به خصوص در بسیاری از حوزه‌های آبخیز فاقد آمار محدود کرده است و همچنین مدل WEPP دارای محدودیت‌هایی در کاربرد آن در مراتع است، زیرا بسیاری از مفاهیم مدل و معادلات فرسایش آن از آزمایشات روی مزارع توسعه یافته‌اند (۱۱).

مدل RHEM[2] یک مدل ریاضی، توزیعی و فیزیکی است که به منظور توصیف فرآیندهای فرسایش و تولید رسوب در دامنه‌های مراتع مناطق نیمه خشک غرب آمریکا در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است، این مدل از طریق پایگاه http://dss.tucson.ars.ag.gov/rhem قابل دسترسی است (۲۴). این مدل قادر به شبیه سازی هیدرولوژی و فرسایش از طریق اطلاعات اقلیم و خصوصیات دامنه است. مدل

1- Water Erosion Prediction Project

2- Rangeland Hydrology and Erosion Model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

RHEM براساس فناوری پیشرفته مدل WEPP طراحی شده که حاوی مؤلفه‌های فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی است (۱۹). همچنین این مدل براساس داده‌های مراتع و ارتباط پارامترهای هیدرولوژیکی و فرسایشی با جامعه گیاهی و داده‌های اندازه گیری شده بارندگی، توسط فراهم کردن یک سیستم جدید برآورد معادلات براساس ۲۰۴ پلات در ۴۹ سایت در ۱۵ ایالت جنوب غرب آمریکا توسعه یافته است (۱۲).

در بیشتر موارد فرسایش در مراتع در پلات‌ها و در مقیاس دامنه توسط فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی حکم فرما بوده است و مقدار فرسایش در این موارد اغلب می‌تواند نسبت به خاک‌های مزراع کمتر باشد (۲۲) معادلات هیدرولیکی و فرسایش پذیری برای گروه‌های مختلف گیاهان (گندمیان، علفی ها و بوته ای ها) براساس پوشش گیاهی و پارامترهای خاک محاسبه شده است. این مدل براساس رابطه ریاضی بین مقدار رسوب، رواناب، خصوصیات دامنه و عوامل فرسایش دهنده خاک عمل می کند (معادله ۲ و ۴). برآوردهای مدل، رواناب، فرسایش و مقدار رسوبات انتقالی و حجم آنها در مقیاس مکانی دامنه و مقیاس زمانی رویداد بارندگی است و همچنین مدل قادر است اثرات تغییرات پوشش گیاهی، تغییر اقلیم، تغییر عملکردهای مدیریتی روی فرسایش را محاسبه کند (۱۲). ورودی‌های مدل مذکور اقلیم، بافت خاک، طول شیب، تندی شیب، تاج پوشش و پوشش برای هر دامنه می‌باشد. در کل مطالعاتی که در سطح جهان روی این مدل انجام شده به شرح زیر می یاشد:

وی و همکاران (۲۲) به منظور ارزیابی و استفاده بهتر از مدل RHEM به آنالیز حساسیت مدل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در این مدل بارندگی بالاترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها دارد. وی و همکاران (۲۱) به بررسی روش مونت کارلو به منظور تعیین خطای مدل RHEM پرداختند و به این نتیجه رسیدند که خطا مدل با افزایش مقدار بارندگی افزایش می یابد. موفتا و پیرسون (۱۱) به آزمایش تمرکز جریان روی درمنه زارهای سوخته و غیر سوخته با استفاده از مدل RHEM پرداختند، مطالعات آنها نشان داد که رواناب بعد از آتش سوزی بین ۲ تا ۵ برابر افزایش پیدا می‌کند و در پی آن فرسایش به طور متفاوت در سایت‌های آزمایشی مختلف افزایش یافت. همچنین آتش‌سوزی روی فرسایندگی جریان متمرکز شده، تنش برشی بحرانی، عرض جریان، ضریب زبری دارسی تاثیر می‌گذارد. ولتز و همکاران (۲۳) به ارزیابی تکنیک‌های حفاظت خاک در چراگاه‌ها با استفاده از مدل RHEM پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این روش می‌توان تأثیر کمی عملیات‌های حفاظت خاک را در فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک را برآورد کرد. کنس و همکاران (۶) تأثیر ترکیب گونه‌های گیاهی مختلف روی فرسایش و هیدرولوژی را در دو سایت با آتش‌سوزی و بدون آتش سوزی با استفاده از مدل RHEM بررسی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

کردند، به این نتیجه رسیدند که آتش‌سوزی و نوع پوشش روی پارامترهای نفوذ، رواناب، فرسایش تاثیر مستقیم دارد.

نیرینگ و همکاران (۱۲) مدل RHEM را جهت برآورد رسوب و رواناب روی ۲۰۴ پلات آزمایشی در ۴۹ سایت در مراتع آمریکا به‌کار بردند و ضرایب (r^2) برای رواناب و رسوب برآورد شده ۰/۸۷ و ۰/۵۰ بود که نشان دهنده توانایی بالای مدل در برآورد رواناب و رسوب در مراتع بود.

مواد و روش ها

مدل RHEM بر حل معادلات موج سینماتیک و پیوستگی رسوب استوار است و در بازه‌های زمانی مختلف و با استفاده از روابط زیر صورت می پذیرد.

معادلات نفوذ در مدل RHEM مستقیماً از مدل WEPP گرفته شده‌اند. مقدار نفوذ با استفاده از مدل Green-Ampt Mein-Larson برای بارشهای متناوب محاسبه شد. رواناب زمانی ایجاد می‌شود که مقدار بارش بیشتر از مقدار نفوذ باشد.

$$K_e t = F_i - \psi\theta_d \ln\left(1+\frac{F_i}{\psi\theta_d}\right) \qquad (۱)$$

که در آن K_e مقدار نفوذ ($m\ s^{-1}$)، t زمان بعد از ماندابی شدن (تجمع آب) (s)، ψ میانگین پتانسیل موئینگی (m)، θ_d کمبود رطوبت خاک (mm^{-1})، به طوریکه اختلاف بین ضریب تخلخل و مقدار رطوبت اولیه محاسبه می‌شود.

معادله (۲)، معادله موج سینماتیک استفاده شده است:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=v \qquad (۲)$$

که در آن h عمق جریان (m)، q دبی در واحد عرض سطح ($m^3.m^{-1}.s^{-1}$) و x فاصله از بالای سطح (m)، q دبی رواناب (m) که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q=\alpha h^{1.5} \qquad (۳)$$

که در آن α ضریب عمق- دبی است. محاسبات بار رسوب مدل RHEM در رواناب در طول شیب، شامل جداسازی و رسوب‌گذاری حاصل از پاشمان، جریان سطحی و جریان اشباع شده، با استفاده از معادله پیوستگی رسوب محاسبه می‌شود:

$$\frac{dG}{dX}=D_{ss}+D_c \qquad (۴)$$

که در آن G ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$) بار رسوب در جریان، D_{ss} فرسایش پاشمانی و سطحی، D_c جریان اشباع شده، محاسبات عددی معادله ۴ همانند محاسبات مدل WEPP می‌باشد، و همچنین پارامترهای D_c و D_{ss} براساس داده‌های استخراج شده از مراتع محاسبه شده‌اند.

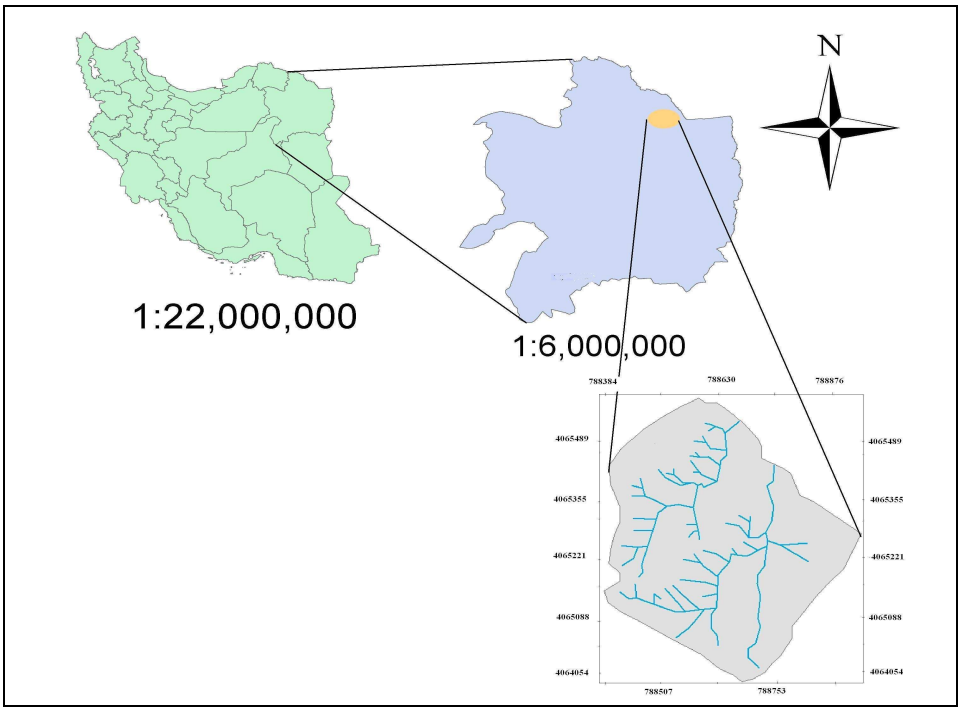
مدل RHEM یک معادله جدید فرسایش پاشمانی و سطحی را ارائه داده که این معادله از داده‌های فرسایش مراتع توسعه یافته است (۲۲).

$$D_{ss}=k_{ss}.I^{1.052}.q^{0.592} \qquad (۵)$$

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

که D_{ss} ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$) مقدار فرسایش و سطحی برای منطقه، K_{ss} ضریب فرسایش سطحی و پاشمانی برای انواع پوشش‌های گیاهی، I (mg^{-1}) شدت بارندگی و q (mg^{-1}) سرعت رواناب می‌باشد.

به علت سهولت دستیابی به ورودی‌های مورد نیاز مدل وکاربرد محدود و موفق مدل در برخی نقاط جهان و همچنین عدم کاربرد آن در ایران، تحقیق حاضر به منظور ارزیابی توانایی و قابلیت این مدل در برآورد مقادیر رسوب تولیدی در سطح دامنه در حوزه سنگانه مشهد صورت پذیرفت. شکل (۱) موقعیت پایگاه تحقیقاتی سنگانه را در کشور نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیّت پایگاه تحقیقاتی سنگانه در کشور.

منطقه مورد مطالعه

خصوصیات عرصه پایگاه تحقیقاتی سنگانه

در سال ۱۳۷۵ برای بررسی پارامترهای مؤثر در تولید رسوب در عرصه‌های طبیعی و از طریق پلات‌های آزمایشی، پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه به مساحت بیش از ۵۰ هکتار که تقریباً معرف تیپ غالب مراتع مناطق خشک استان خراسان رضوی بوده و در برگیرنده شرایط مختلف زمین‌شناسی، پوشش‌گیاهی، عمق خاک، توپوگرافی و سایر عوامل احتمالی مؤثر در فرسایش خاک می‌باشند در ۱۰۰ کیلومتری شمال‌شرق مشهد

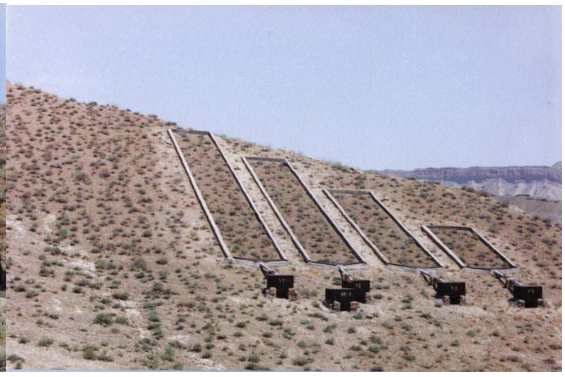
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

ایجاد گردید موقعیت جغرافیایی این منطقه شامل طول "۳۰ '۱۵ °۶۰ و عرض "۱ '۴۱ °۳۶ می‌باشد.

احداث پلات‌ها

پس از مطالعه و تهیه نقشه های زمین شناسی، خاکشناسی، پوشش گیاهی و شیب و انطباق آنها با یکدیگر، مناطق مناسب احداث پلاتهای آزمایشی رواناب و رسوب تعیین و تعداد ۹۲ پلات آزمایشی (تعداد یک تا پنج پلات با شرایط یکسان و عرض ثابت ۲ و طولهای ۵-۱۰- ۱۵-۲۰- ۲۵ متر) نصب گردید (اشکال ۲ و ۳). پلات‌های آزمایشی اندازه‌گیری رواناب و رسوب در شرایط مختلف پوشش‌گیاهی، شیب و عمق خاک احداث و در انتهای هر پلات مخزن فلزی جمع‌آوری رواناب تعبیه گردیده است و اقدام به جمع آوری رواناب و رسوب از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۰ شده است. برای اطّلاعات شدّت، مدّت و مقدار مربوط به هر واقعه بارندگی، دو دستگاه باران نگار نیز در پایگاه نصب است (۱۴).

واحد فیزیوگرافی پایگاه تپه‌های مدور کم ارتفاع با پوشش خاکی می‌باشد. که این تپه‌ها دارای دامنه‌ای از خاک‌های کم‌عمق تا عمیق می‌باشد. عمق خاک در قسمت‌های مختلف پایگاه بین ۵ تا بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر و بافت آن‌ها در محدوده لوم شنی تا لوم رسی شنی است. سنگ‌ریزه موجود در سطح خاک بین صفر تا ۴۰ درصد متغیر بوده و تغییرات اسیدیته، هدایت الکتریکی، میزان آهک، مواد آلی و گچ این اراضی به ترتیب بین ۸/۳-۷/۲، ۸-۱ دسی زیمنس بر متر، ۱۰/۴ -۰/۳درصد، ۳/۳-۰/۸ درصد و ۱۹-۰ درصد می‌باشد. با توجه به بررسی‌های صحرایی و نتایج آزمایشگاهی و نیز رژیم رطوبتی و حرارتی، خاک عرصه به روش Soil Taxonomy به دو رده خاک‌های انتی‌سول و اریدی‌سول تفکیک گردیدند. متوسط بارندگی سالانه پایگاه براساس آمار ۱۰ ساله باران‌نگارهای پایگاه کمتر از ۱۸۰ میلی‌متر می‌باشد. تیپ پوشش گیاهی غالب سایت درمنه، پوا بوده و در بعضی از قسمت‌ها گونه‌های یک‌ساله تیپ اصلی را تشکیل می‌دهند. درصد پوشش گیاهی در قسمت‌های مختلف پایگاه تحقیقاتی بین ۰ تا ۸۰ درصد متغیر می‌باشد (۱۵).



شکل ۲- نمونه‌ای از پلات‌های احداثی سیمانی در خاک کم عمق

شکل ۳- نمونه‌ای از پلات‌های احداثی فلزی در خاک عمیق.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

مقدار رسوب مشاهده‌ای با برداشت حجم ۱ لیتر از کل حجم مخزن جمع کننده رواناب به صورت میلی گرم (mg/L) اندازه‌گیری شد. سپس به منظور اجرا کردن مدل تعداد ۲۰ پلات با طولهای ۵، ۱۰ و ۲۰ متر (m) و تعداد ۸ بارش در سالهای مختلف انتخاب شد و کلیه مقادیر ورودی مدل شامل طول شیب، تندی شیب، درصد پوشش تاجی، پوشش زمینی، به مدل وارد شد و اجرا گردید و در مرحله بعد مقدار رسوب مشاهده‌ای و برآوردی مقایسه گردید.

به منظور آنالیز حساسیت مدل RHEM و بررسی تاثیر تغییر ورودی‌ها در میزان رسوب خروجی، مدل با تغییرات ۲۰٪± در ورودی‌ها اجرا و درصد تغییرات رسوب آنها برآورد گردید. سپس ورودی‌های حساس به منظور واسنجی مدل شناسایی و معرفی گردیدند و مدل با پارامترهای واسنجی شده اجرا شد و مقادیر رواناب و رسوب برای مرحله اعتبار سنجی برآورد شد. به منظور ارزیابی مقدارهای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، ضرایب خطای میانگین (RMSE)[1]، میانگین خطای انحراف (اریبی خطا) (MBE)[2]، میانگین مطلق خطا (دقت) (MAE)[3] و ضرایب کارایی (E_{NS})[4] محاسبه شد.

RMSE با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (o_i - P_i)^2}{n} \right)^{1/2} \qquad (۶)$$

P_i و O_i مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده هستند n تعداد کل مقادیر زوجی است.

مقدار RMSE مقادیر مشاده شده و پیش بینی شده را روی هم منطبق می‌کند و کمترین مقادیر RMSE نشان از خطای کمتر مدل دارد.

کارآیی مدل (E_{NS}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (o_i - \bar{o})^2} \qquad (۷)$$

که O_i میانگین مقادیر مشاهده شده است. دامنه مقادیر E_{NS} از $-\infty$ تا ۱، مقدار ۱ کاملاً مناسب است.

معادلات MBE و MAE از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Z^*(X_i) - Z(X_i)) \qquad (۸)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} | Z^*(X_i) - Z(X_i) | \qquad (۹)$$

$Z^*(X_i)$ مقدار برآورد شده متغیر مورد نظر $Z(X_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر و n تعداد داده‌ها.

معمولا شاخص MBE معرف دقت روش و مقدار متوسط خطا است که این معیار نشان می‌دهد که بین مقدار برآورد شده و مشاهده شده چه میزان اختلاف وجود دارد، اگر مقدار برابر صفر باشد نشان دهنده آن است که مقادیر نمونه خوب برآورد شده است. بنابراین هرچه این شاخص از صفر دور شود نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر مشاهده شد و برآورد شده بیشتر می‌باشد. شاخص MAE برای سنجش میزان دقت روش قابل استفاده می‌باشد. هرچه مقدار به صفر نزدیکتر باشد

1- Root Mean Square Error 2- Mean Bias Error 3- Mean Absolute Error
4- Nash-Sutcliffe

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

میزان دقت فضایی روش بیشتر و هرچه از صفر دور شود از میزان دقت کاسته می‌شود.

نتایج و بحث

جدول ۱ مقادیر مشاهداتی و برآوردی مدل را برای یکی از دامنه‌ها نشان می‌دهد. پلات‌های آزمایشی به کار رفته در این تحقیق دارای مشخصات مختلفی از جهت طول، تندی شیب، پوشش تاجی و پوشش زمینی و خاک می‌باشند. نتیجه اجرای مدل با پلاتهای با مشخصات مختلف و رگبارهای مختلف، نشان داد که مدل برآورد بالاتری نسبت به مقادیر مشاهده‌ای دارد، به جز در پلاتهای ۵ متری، به طوریکه میانگین نسبت مقادیر پیش‌بینی شده رسوب به میانگین مقادیر مشاهده‌ای در پلاتهای ۵، ۱۰ و ۲۰ متری به ترتیب ۰/۵۲، ۴/۹ و ۱۰ برابر بوده که این می‌تواند ناشی از ارتباط رسوب با طول پلات باشد که به دلیل تاثیرپذیری زیاد رسوب از طول شیب است که غالباً غیرخطی است و با ایده‌های دندی و بولتون (۴) و پارکر و اوسترکمپ (۱۴) به نقل از صادقی (۱۷) هم‌سو است. همچنین نتیجه اجرای مدل برای رواناب به این صورت بود که میانگین برآوردهای مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌ای برای رواناب به ترتیب ۴/۷، ۵/۳ و ۱۵/۵ برابر بوده است و این نشان دهنده این است که با افزایش طول پلاتها برآوردهای مدل بالاتر از مقدار مشاهده‌ای می‌باشد. به طور کلی دامنه‌های موجود در منطقه به دو گروه زیر ۶۰ درصد و بالای ۶۰ درصد تقسیم می‌شدند بدین منظور اقدام به آنالیز حساسیت مدل در دو دامنه با مشخصات کاملا مختلف در پلاتهایی با طول‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر شد. جدول ۲ مشخصات این دو دامنه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات رگبارها و رسوب مشاهده‌ای و برآوردی مدل برای یکی از دامنه‌ها

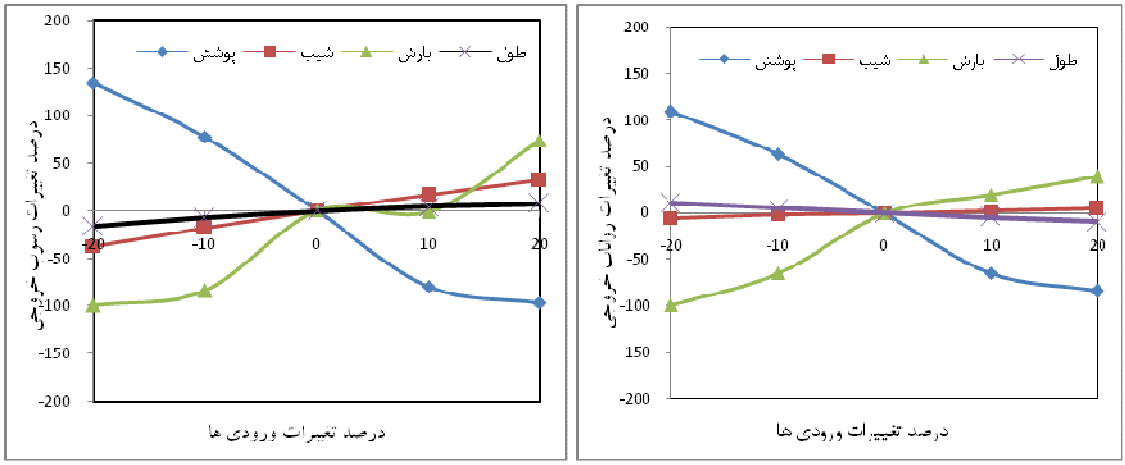
ردیف	مشخصات رگبار			رسوب مشاهده‌ای (t/ha)			رسوب برآوردی (t/ha)		
	تاریخ	مقدار (mm)	شدت (mm/h)	۵ متری	۱۰ متری	۲۰ متری	۵ متری	۱۰ متری	۲۰ متری
۱	۱۳۷۶/۱/۲۹	۷/۷	۱۰/۶	/۰۰۶۳۷	۰/۰۰۳۷۳	۰/۰۰۲۴۴	۰/۰۵۸	۰/۰۱۴۷	۰/۰۲۹۲
۲	۱۳۷۶/۳/۴	۷/۲	۲۸	۱/۰۴	۰/۰۸۰۸	۰/۰۳۸۷	۰/۰۶۴	۰/۱۴۴	۰/۲۶۹
۳	۱۳۷۶/۳/۲۷	۸/۴	۹	۰/۱۴۲	۰/۰۹۳۱	۰/۰۸۹۶	۰/۱۳۳	۰/۳۵۵	۰/۶۵۸
۴	۱۳۷۶/۱۲/۸	۱۴/۶	۵/۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۲۷۸	۰/۱۰۳	۰/۴۰۸	۰/۹۲۷
۵	۱۳۸۵/۱۰/۱۱	۱۶/۲	۵/۶	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۰۰۱۷	۰/۶۱۳	۰/۱۰۷	۰/۵۵	۰/۸۵۷
۶	۱۳۸۵/۱۲/۲۶	۱۲/۴	۶/۸	۰/۰۰۵۸۹	۰/۰۰۰۵۳	۰	۰/۰۷۴۱	۰/۳۲۸	۰/۰۵۱
۷	۱۳۸۶/۱/۱۷	۶/۲	۲۴/۸	۰/۰۵۳۶	۰/۱۹۵	۰/۰۱۱۳	۰/۱۱۱	۰/۲۵۷	۰/۴۷۰
۸	۱۳۸۸/۱/۳۱	۹	۱۳/۶	۰/۵۹۴	۰/۰۷۱۳	۰/۰۹۳۹	۰/۱۵۸	۰/۰۱۹۸	۰/۰۲۷۱

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

جدول ۲- مشخصات دامنه های آنالیز حساسیت شده

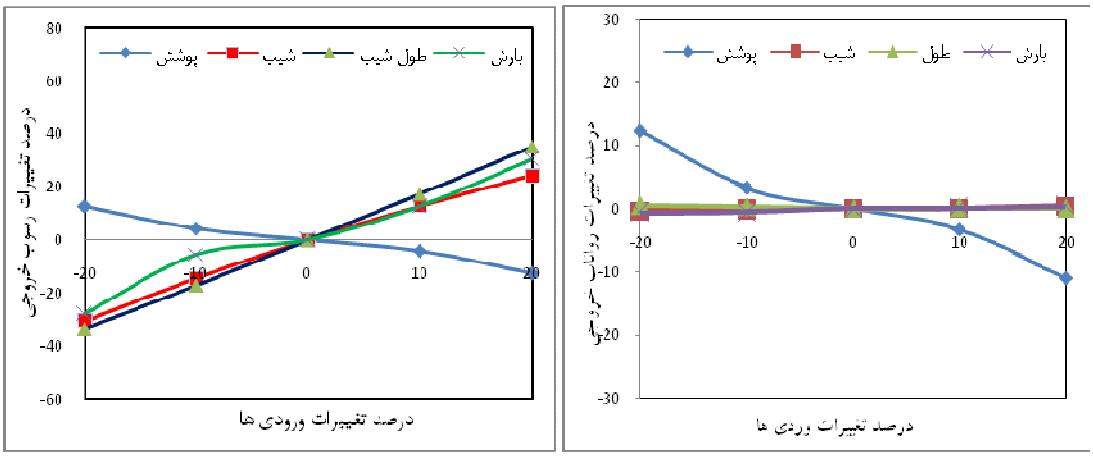
دامنه	شیب (٪)	بافت خاک	تاج پوشش (٪)	درصد سنگریزه	درصد لاشبرگ
۱	۴۰	لومی	۸۵	۵	۳
۲	۶۰	شنی لوم	۱۴	۵	۰/۵

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای رسوب نشان داد که در شیب‌های زیر ۶۰ درصد، به ترتیب عوامل تاج پوشش، بارندگی و تندی شیب به عنوان حساس‌ترین عوامل شناخته شدند. اما در شیب‌های بیش از ۶۰ درصد نتایج متفاوت بود و به ترتیب عوامل طول شیب، بارش و تندی شیب به عنوان حساس‌ترین عوامل شناخته شدند. نتایج آنالیز حساسیت برای رواناب نشان داد که به ترتیب عوامل پوشش گیاهی، بارش و تندی شیب حساس‌ترین عوامل برای کلیه شیب‌های زیر ۶۰ و بالای ۶۰ درصد شناخته شدند. شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آنالیز حساسیت مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - نمودار آنالیز حساسیت رواناب (شکل راست) و رسوب (شکل چپ) برای شیب زیر ۶۰ درصد.

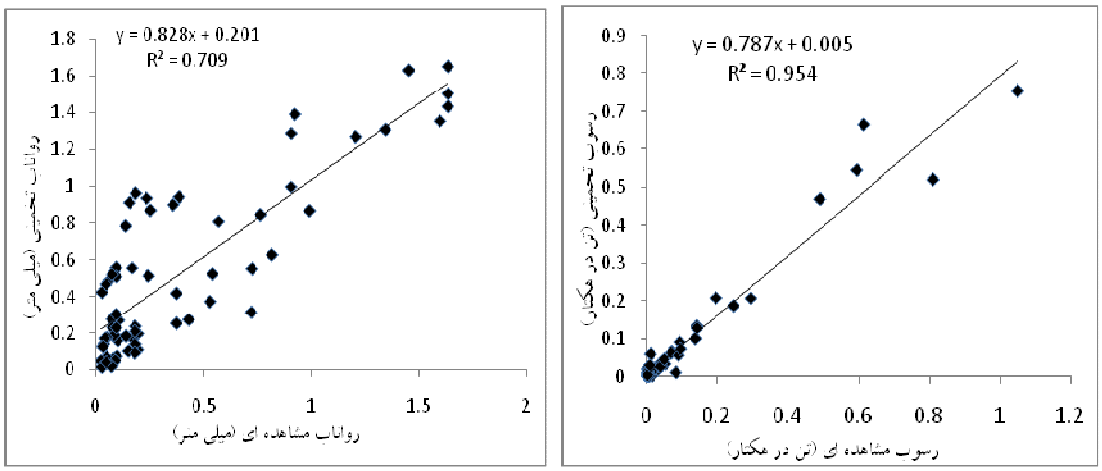
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]



شکل ۵- نمودار آنالیز حساسیت رواناب (شکل راست) و رسوب (شکل چپ) برای شیب بالای ۶۰ درصد.

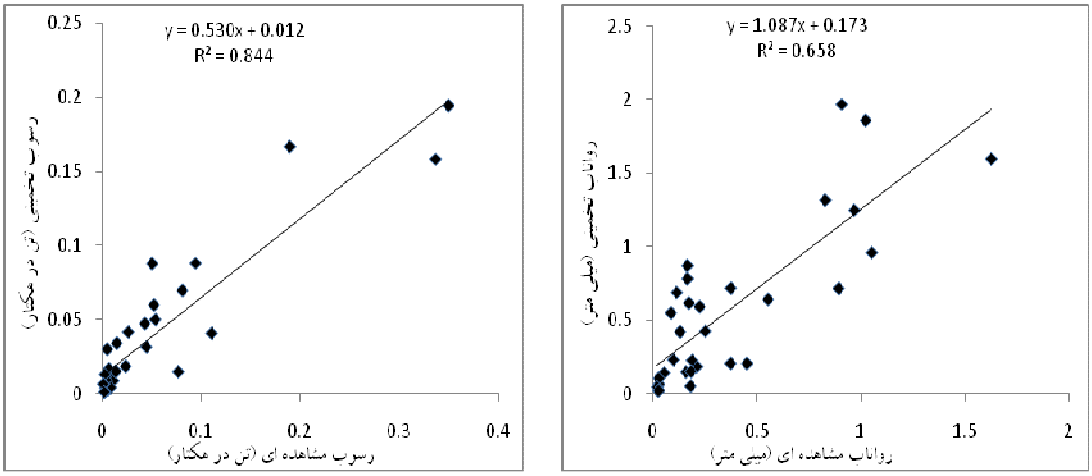
واسنجی و اعتبار سنجی مدل

هدف از واسنجی، حداقل کردن اختلاف بین خروجی برآورد شده و مقادیر مشاهده شده است. فرآیند واسنجی روی پارامترهایی که رسوب و رواناب را کنترل می‌نمایند، متمرکز شد. پس از انجام واسنجی و اعتبارسنجی مدل داده‌های رسوب و رواناب مشاهده‌ای و برآوردی با هم مقایسه شدند. نتایج واسنجی و اعتبار سنجی داده‌های مشاهده شده و شبیه سازی شده در تولید رسوب و رواناب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار واسنجی مدل، برازش داده‌های رواناب (شکل راست) و رسوب (شکل چپ) مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]



شکل ۷- نمودار اعتبار سنجی مدل، برازش داده های رواناب (شکل راست) و رسوب (شکل چپ) مشاهده ای و محاسبه ای.

ضرایب تبیین بالا (r^2) در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی ۹۵٪ و ۸۴٪ نشان‌دهنده همبستگی قوی بین رسوب شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده است (شکل های ۶ چپ و ۷ چپ)، علاوه بر این مقادیر ضریب کارایی بالا (E_{NS}) در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی به ترتیب ۹۲٪ و ۷۰٪ بود که این نشان‌دهنده کارآیی بالای مدل در برآورد رسوب است.

همچنین شاخص MBE که معرف دقت روش و مقدار متوسط خطا و نشان دهنده اختلاف بین مقدار برآورد شده و مشاهده شده است و نتایج حاصل نشان میدهد که میزان خطای مدل پایین است. از نظر دقت نیز مقادیر شاخص MAE نشان دهنده دقت مناسب برآورد مدل می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳- آنالیزهای آماری داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای رسوب

	میانگین رسوب (تن)		RMSE	r^2	E_{NS}	MBE	MAE
	مشاهده‌ای	برآوردی					
واسنجی	۰/۰۷۰	۰/۰۶۰	۰/۰۰۱۲	۰/۹۵	۰/۷۰	-۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۸
اعتبار سنجی	۰/۰۵۰	۰/۰۳۹	۰/۰۰۱۱	۰/۸۳	۰/۹۲	-۰/۰۱۲	۰/۰۲۲

نتایج برآوردی رواناب نشان داد که اغلب برآورد مدل بالاتر از مقادیر مشاهده‌ای است اما ضرایب تبیین در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی ۷۰٪ و ۶۵٪ نشان‌دهنده این است که مدل تا حدودی در برآورد رواناب مناسب می‌باشد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

جدول ۴- آنالیزهای آماری داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای رواناب

	میانگین رواناب (میلی‌متر)		RMSE	r^2	E_{NS}	MBE	MAE
	مشاهده‌ای	برآوردی					
واسنجی	۰/۳۸	۰/۵۲	۰/۰۴۳	۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۱۴	۰/۲۱
اعتبار سنجی	۰/۳۷	۰/۵۷	۰/۰۷۳	۰/۶۵	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۶

طبق اظهارات نیرینگ و همکاران (۱۳) RHEM مدلی است که برای مدیران مراتع و حافظان منابع طبیعی و کسانی که نیازمند تکنولوژی‌ای جهت پش‌بینی و مدل‌کردن فرآیندهای فرسایش روی مراتع و ارزیابی اثرات تکنیک‌های حفاظت خاک هستند، طراحی شده است. همچنین این مدل یک ویرایش اصلاح شده و توسعه یافته مدل WEPP می‌باشد که برای کاربری‌های مراتع و براساس فرآیندهای نفوذ، هیدرولوژی، علوم گیاهی، هیدرولیک و مکانیسم فرسایش طراحی شده است. از آنجایی که این مدل یک مدل بسیار جدید می‌باشد مطالعات زیادی روی آن انجام نشده است با این حال با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق و مقایسه ضرایب همبستگی و (r^2) و ضرایب کارایی (E_{NS}) با مطالعات انجام شده توسط نیرینگ و همکاران که ارائه دهنده این مدل بودند (۱۲) می‌توان به این نتیجه رسید که مدل دارای ضرایب قابل قبولی جهت برآورد رسوب می‌باشد. عامل پوشش گیاهی عامل مهمی در تغییر رسوب و رواناب شناخته شد. همچنین این نتایج با نتایج کنس و همکاران (۶) و موفت و پیرسون (۱۱) که به بررسی رسوب و رواناب بعد از آتش‌سوزی و تاثیر آن روی پوشش گیاهی پرداخته بودند، همسو بود، بدین صورت که رواناب بعد از آتش سوزی ۲ تا ۵ برابر افزیش پیدا می‌کرد که نشان دهنده حساس بودن این مدل به پوشش گیاهی بود.

براساس نتایج بدست آمده از کاربرد مدل RHEM در مناطق مرتعی حوزه آبخیز سنگانه می‌توان به این نتیجه رسید که این مدل در این منطقه کاربرد داشته و برای تعیین توانایی آن برای سایر نقاط کشور و سایر حوزه‌های آبخیز با شرایط اقلیمی متفاوت توصیه می‌گردد.

منابع

1. Arabkhedri, M. 2005. Survey sediment suspense discharge in Iran watersheds. Iran Water Resources Research. 1(2): 51-60.
2. Arabkhedri, M. 2002. Educational workshop of method of increasing accuracy estimate suspensed sediment in the rivers. Conference Management Soil Erosion lands and Stable improvement. Arak. 711-728.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

3. Cogle, A.L., L.J. Lane and L. Basher. 2003. Testing the hillslope erosion model for application in India, New Zealand and Australia. Environmental Modeling and Software, 18: 825-830.
4. Dendy, F.E. and G.C. Bolton. 1976. Sediment yield runoff drainage area relationship in the United States, Journal of Soil and Water Conservation, 31: 264-266.
5. He, C. 2003. Integration of geographic information system and simulation model for watershed management. Environmental Modeling and Software. 18: 809-813.
6. Kenneth, E.S., F.B. Pierson, P.R. Robichaud, USDA-NRCS, USDA-ARS and US Forest Service. 2009. 62nd Society for Range Management Annual Meeting. Paper No. 07-9.
7. Lu He, C. 2003. Integration of Geographic Information System and simulation model for watershed management. Environmental modeling and Software. 18: 809-813.
8. Lane, L.J., M.H. Nichols and G.B. Paige. 1995. Modeling erosion on hillslopes: concepts, Theory and data. In: Bining, P. Bridgman, H.M. Williams, B. (Eds.) Proceedings of International Congress on Modeling and Simulation. l: 1-7.
9. Meyer, L.D. and W.H. Wischmeier.1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. ASAE12: 754-755.
10. Miller, S.N., D.J. Semmens, D.C. Goodrich, M. Hernandez, R.C. Miller, W.G. Kepner and D.P. Guertin. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. Environmental Modeling and Software. 22: 365-377.
11. Moffet, C.A., F.B. Pierson and P.R. Robichaud. 2009. Concentrated flow experiments on burned and unburned sagebrush communities: Applications for the rangeland hydrology and erosion model. 62nd Annual Meeting, Society of Range Management. Albuquerque, New Mexico, February, 8-12.
12. Nearing, M.A., H. Wei, J.J. Stone, F.B. Pierson, K.E. Speath, M.A. Weltz, D.C. Flanagan and M. Hernandez. 2011. A Rangeland Hydrology and Erosion Model. 2011. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 54(3):
13. Parker, R.S. and W.R. Osterkamp. 1995. Identifying trends in sediment discharge from alteration in upstream land use, In effect of scale on interpretation and management of sediment and water quality, *In:* Boulder Symposium, Osterkamp, W.R. (ed.), IAHS Pub., 226: 207-213.
14. Rangavar, A.S. 2004a. Research in important elements in soil erosion in Khorasan rangelands, Final report project, Research Center for Agriculture and Natural Resources of Razavi Khorasan. 92 pp.
15. Rangavar, A.S. 2004b. Identify affecting factors in soil erosion in arid and semi-arid rangelands using experimental plots, the first national conference of watershed and soil and water management, Kerman, 10-11 May 2004: 119.
16. Sadeghi, S.H.R., M. Azari and B. Ghaderi Vangah. 2007. Field evaluation of hillslope erosion model (HEM) in Iran. Biosystems Engineering. 99: 304-311.
17. Sadeghi, H.M., M. Bashiri and A.S. Rangavar. 2008. Comparing the sediment variation with hillside direction and plot length in storm wise soil erosion. Journal of Soil and water (Agricultural sciences and Technology), Vol. 22, Number 22.
18. Santhi, C., R. Srinivasan, J.G. Arnold and J.R. Williams. 2006. A modeling approach to evaluate the impact of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. Environmental Modeling and Software. 21: 1141-1157.
19. Spaeth, K.E., F.B. Pierson and C.A. Moffet. 2006. Rangeland hydrology and erosion model (RHEM) for ESD development. In: Proceedings of the3rd National Conference on Grazing Lands, December 13-16, St. Louis, Missouri.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

20. Wei, H., M.A. Nearing and J.J. Stone. 2007. A Comprehensive sensitivity analysis framework for model evaluation and improvement using a case study of the rangeland hydrology and erosion model. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50(3): 945-953.
21. Wei, H., M.A. Nearing, J.J. Stone and D.D. Breshears. 2008. A dual Monte Carlo approach to estimate model uncertainty and its application to the rangeland hydrology and erosion model. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 51(2): 515-520.
22. Wei, H., M.A. Nearing, J.J. Stone, D.P. Guertin, K.E. Spaeth, F.B. Pierson, M.H. Nichols and C.A. Moffett. 2009. A new splash and sheet erosion equation for rangelands. *SSSA J.* 73(4): 1386-1392.
23. Weltz, M.A., L. Jolley, M. Nearing, J. Stone, D. Goodrich, K.E. Spaeth, J. Kiniry, J. Arnold, D. Bubenheim, M. Hernandez and H. Wei. 2008. Assessing the benefits of grazing land conservation practices. Journal of Soil and Water Conservation. 63(6): 214A-217A.
24. http://dss.tucson.ars.ag.gov/rhem. 2010.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]

Investigation of Efficiency of Rangeland Hydrology and Erosion Model (RHEM) in Water Erosion (Case Study: Sangane Watershed-Iran)

M. Felegari[1], A. Talebi[2], M.T. Dastorani[2] and A.S. Rangavar[3]

1- M.Sc. in Watershed Management Engineering, Yazd University
(Corresponding author: M.Felegari@gmail.com)
2- Associate Professor, Yazd University
3- Instructor Research, Research Center for Agriculture and Natural Resources, Khorasan Razavi

Abstract

Computer simulation models are increasingly popular for predicting soil loss to quantify the processes of detachment, transport and deposition of eroded soils. To assess the effects of different management on soil erosion, selecting the best models and their validation a positive step is considered. In this research the Rangeland Hydrology and Erosion Model (RHEM) was evaluated using soil erosion measuring plots and recorded observed rain in Sangane research station, Khorasan razavi province, Iran. The model was run and the predicted runoff and sediment yield values were compared with measured runoff and sediment yield values. Then sensitivity analysis and calibration were done on sensitive parameters and model was run with calibrated parameters. In the calibration period, the model efficiency (E_{NS}) values and the coefficient of determination (r^2) were 0.92 and 0.95 for sediment, and 0.60 and 0.70 for runoff, respectively. In validation period, the (E_{NS}) values and (r^2) values were 0.70 and 0.84 for sediment and 0.11 and 0.65 for runoff, respectively. Our research indicated that the results of model were acceptable for sediment and could be used with reasonable confidence for soil loss quantification in the Sangane watershed.

Keywords: Hillslope Erosion, Rangeland Hydrology, Runoff, RHEM, Sensitivity analysis, Sangane

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-02-10]