تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۱۹

نشریه مرتع و آبخیزداری
دوره ۶۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲

کارایی مدل فرسایش و هیدرولوژی مرتع در برآورد میزان رسوب دامنه‌های مرتعی مناطق خشک (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبخیز شهید نوری کاخک)

❖ **علی گلکاریان***: استادیار دانشکدهٔ منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی
❖ **داود داودی مقدم:** دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس
❖ **سید امیر نقیبی:** دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس
❖ **مسعود عشقی‌زاده:** دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد

چکیده

فرسایش خاک، بی‌شک، یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات موجود در عرصه‌های طبیعی کشور بوده و آثارِ مخربی در اکوسیستم‌های مرتعی به جای می‌گذارد. تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی توانایی و قابلیت مدل RHEM[1] در برآورد میزان رسوب دامنه‌های مرتعی مناطق خشک، در حوزهٔ آبخیز زوجی شهید نوری کاخک انجام شد. مدل RHEM یک مدل ریاضی، توزیعی، و فیزیکی است که قادر به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی از طریق اطلاعات اقلیم و خصوصیات دامنه است. میزان رسوب در ۱۸ پلات فرسایشی در دو زیرحوزه- شاهد و نمونه- اندازه‌گیری شد. به منظور اجرای مدل، پارامترهای اقلیم، بافت خاک، طول شیب، تندی شیب، تاج پوشش، و پوشش زمین اندازه‌گیری شد و با ورود به مدل مقادیر رسوب و رواناب سالانه برآورد گردید. نتایج نشان‌دهندهٔ عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی- چه در بررسی کلیهٔ پلات‌های فرسایشی و چه در بررسی میانگین داده‌ها- در سه جهت مختلف قرارگیری پلات‌ها است. همچنین، نتایج مبیّنِ توانایی مدل در تعیین تأثیر کمّی اقدامات مختلف حفاظت خاک در فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک است. در مجموع، بررسی‌ها بیانگر توانایی مناسب مدل برای کاربرد در دامنه‌های مرتعی مشابه با شرایط تحقیق است.

واژگان کلیدی: پلات، رسوب، رواناب، کاخک، مناطق خشک،RHEM .

* نویسنده مسئول تلفن: ۸۸۰۵۴۶۸-۰۵۱۱ فاکس: ۸۷۸۸۸۰۵-۰۵۱۱
E-mail: Golkarian@um.ac.ir

1. Rangeland Hydrology and Erosion Model

۱. مقدمه

فرسایش خاک، بی‌شک، یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات موجود در عرصه‌های طبیعی کشور است و آثار مخربی در اکوسیستم‌های مرتعی به جای می‌گذارد. با توجه به اینکه محاسبهٔ مقادیر رسوب از طریق ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و اندازه‌گیری‌های مستقیم فرسایش بر روی دامنهٔ فرایندی هزینه‌بر و مشکل است، یافتن روش‌هایی برای برآورد دقیق میزان رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز ضروری است. اهمیت برآورد فرسایش در سطح دامنه، به عنوان نقطهٔ آغازین فرسایش در حوزه‌های آبخیز، از جایگاه خاصی برخوردار است [۱]. مدل‌سازی فرایند فرسایش خاک در سطح دامنه از دههٔ ۱۹۴۰ آغاز، سپس، به صورت روابطی در دههٔ ۱۹۶۰ ارائه شد [۵]. پس از این تاریخ، مدل‌های زیادی در این زمینه ارائه شده است، از جمله مدل فرسایش دامنه‌ای[1] (HEM)، مدلی توزیعی و در مقیاس رگبار، که در مراتع خشک و نیمه‌خشک امریکا تهیه و ارائه شده است [۳؛ ۴؛ ۵؛ ۶]. از دیگر مدل‌های ارائه‌شده در این زمینه مدل WEPP[2] است؛ WEPP یک مدل فرایندیاب است و قادر است توزیع مکانی و زمانی رواناب، هدررفت خاک، و رسوب‌گذاری را برای یک دامنه و یا در یک حوزهٔ آبخیز، به صورت تک‌رگباری و یا پیوسته، پیش‌بینی کند [۸]. با توجه به اینکه میزان هدررفت خاک در اراضی مرتعی یکی از شاخص‌های کمّی برای تعیین سلامت مرتع و اثر اقدامات حفاظتی در نظر گرفته می‌شود و مدل‌های موجود بیشتر در اراضی کشاورزی گسترش یافته‌اند، مدلی مناسب برای پیش‌بینی هدررفت خاک در سطح اراضی مرتعی مورد نیاز است [۸]. در این تحقیق، برای دست‌یابی به برآوردی مناسب از میزان فرسایش و رسوب در یک دامنهٔ مرتعی از مدل RHEM استفاده شد. مدل RHEM الهام‌گرفته و ساده‌شدهٔ مدل WEPP است که حاوی مؤلفه‌های فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی است [۹]. سازمان کشاورزی ایالت متحده[3] (USDA) فرایند توسعهٔ مدل RHEM را در سال ۲۰۰۳ آغاز کرد.

در حوزهٔ آبخیز آزمایشی والنوت گلک[4] واقع در ایالت آریزونای[5] امریکا در تحقیقی آنالیز حساسیت مدل RHEM به منظور ارزیابی و استفادهٔ بهینه از آن انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد در این مدل اولین پارامتر مهم حجم بارندگی است و پس از آن مدت بارندگی [۱۱]. همچنین، در این حوزهٔ آبخیز تخمین خطای مدل RHEM با استفاده از روش مونت کارلو زوجی[6] (DMC) ارزیابی شد. مقایسهٔ مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شدهٔ هدررفت خاک ثابت کرد که روش مونت کارلو زوجی تخمین مناسبی از خطای مدل ارائه داده است [۱۲].

در چراگاه‌های ایالت‌های آریزونا، آیداهو[7] و نوادای[8] امریکا، تکنیک‌های حفاظت خاک با استفاده از مدل RHEM ارزیابی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از این روش می‌توان تأثیر کمّی عملیات حفاظت خاک را در فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک برآورد کرد [۱۰]. در تحقیقی، با استفاده از مدل RHEM تمرکز جریان بر دامنه‌زارهای سوخته و غیرسوخته مطالعه شد. نتایج

1. Hillslope Erosion Model
2. The Water Erosion Prediction Project
3. United States Department Of Agriculture
4. Walnut Gulck Experimental Watershed
5. Arizona
6. Dual Monte Carlo
7. Idaho
8. Nevada

نشان داد، پس از آتش‌سوزی، میزان رواناب بین ۲ تا ۵ برابر افزایش می‌یابد و، به تبع آن، میزان فرسایش، به صورت متغیر، در سایت‌های آزمایشی افزایش می‌یابد [۷]. در مطالعه‌ای، مدل RHEM روی ۲۰۴ پلات آزمایشی در ۴۹ سایت مرتعی در امریکا برای برآورد رسوب و رواناب اجرا شد. ضرایب تبیین (r^2) برای مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ رواناب و فرسایش به‌ترتیب ۰٫۸۷ و ۰٫۵۰ بود؛ این ضرایب توانایی مدل را در فراهم‌نمودن تخمینی قابل قبول از رواناب و هدررفت خاک نشان می‌دهد [۸]. در حوزهٔ آبخیز سنگانه، واقع در استان خراسان رضوی، مدل RHEM در پلات‌هایی با مشخصات متفاوت و رگبارهای مختلف اجرا شد. نتایج نشان داد که مدلْ از مقدار هدررفت خاک برآورد مناسبی در اختیار ما قرار می‌دهد و، با افزایش طول پلات‌ها، اختلافِ بین برآوردهای مدل با مقادیر مشاهده‌ای افزایش می‌یابد [۲].

با توجه به تعدادِ کمِ پارامترهای ورودی و در دسترس بودنِ آن‌ها و قابلیت کاربردِ این مدل در اراضی مرتعی، تحقیق حاضر در حوزهٔ آبخیز شهید نوری شهرستان کاخک صورت گرفت.

۲. روش‌شناسی

۱.۲. ویژگی‌های منطقهٔ مورد مطالعه

تحقیق حاضر در حوزهٔ آبخیز شهید نوری کاخک، واقع در ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان گناباد، بخشی از حوزهٔ آبخیز کویر نمک صورت گرفته است. این حوزه بین طول‌های "۳۷ '۳۵ °۵۸ الی "۴۱ '۳۶ °۵۸ شرقی و عرض‌های "۰۱ '۰۴ °۳۴ الی "۰۷ '۰۵ °۳۴ شمالی قرار دارد. در سرشاخه‌های بخش شرقی حوزهٔ مذکور یک حوزهٔ زوجی، با مشخصات فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، و ادافیکی همگن، برای امور تحقیقاتی تجهیز شده است. از آغازِ تأسیس زیرحوزه‌های مذکور در یکی از آن‌ها برخی اقدامات حفاظت خاک، از جمله اقدامات مکانیکی، بیومکانیکی، بیولوژیک، و قرق (حوزهٔ نمونه)، صورت گرفته و در دیگری (حوزهٔ شاهد) هیچ نوع عملیاتی انجام نگرفته است. متوسط بارش سالانهٔ منطقه ۲۴۳ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴٫۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد است. متوسط تاج پوشش گیاهی حوزهٔ نمونه ۴۱٫۳ درصد و حوزهٔ شاهد ۱۶٫۸ درصد است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن از نوع خشک و نیمه‌خشک است.

شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه

۲.۲. معرفی مدل

مدل RHEM یک مدل ریاضی، توزیعی، و فیزیکی است که به منظور توصیف فرایندهای فرسایش و تولید رسوب در دامنه‌های مرتعی مناطق نیمه‌خشک غرب امریکا ارائه شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی، از طریق اطلاعات اقلیم و خصوصیات دامنه، است. این مدل بر اساس اطلاعات مربوط به مراتع و، همچنین، ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و فرسایشی با جوامع گیاهی مراتع و بر اساس مطالعهٔ ۲۰۴ پلات در ۴۹ سایت مرتعیِ ۱۵ ایالت غربی امریکا گسترش یافته است [۸]. زیرمدل‌های فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی مدل RHEM فرایندهای غالب اراضی مرتعی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، معادلات هیدرولیکی و فرسایش‌پذیری برای گروه‌های مختلف گیاهان، بر اساس پوشش گیاهی و پارامترهای خاک، محاسبه شده است. همچنین، این مدل بر اساس رابطهٔ ریاضی بین مقدار رسوب، رواناب، خصوصیات دامنه، و عامل فرسایش‌پذیری خاک عمل می‌کند. مدل RHEM رواناب، فرسایش، میزان و حجم رسوب تحویلی را در مقیاس مکانی دامنه و مقیاس زمانی بارش تک‌رخدادی برآورد می‌کند. همچنین، این مدل قادر است آثارِ تغییرات تیپ جامعهٔ گیاهی، اقلیم، و اقدامات حفاظتی را بر میزان فرسایش محاسبه کند [۸]. اقلیم، بافت خاک، طول شیب، تندی شیب، تاج پوشش، و پوشش زمین از ورودی‌های مورد نیاز مدل برای هر دامنه است. روش کار در این مدل بر اساس حل معادلات موج سینماتیک و پیوستگی رسوب در بازه‌های زمانی مختلف به ازای رگبارهای منفرد است.

معادلات نفوذ در مدل RHEM، به‌طور مستقیم، از مدل WEPP گرفته شده است. در این مدلْ میزان نفوذ با کاربردِ روش Green- Ampt محاسبه می‌شود.

معادلهٔ (۱) برای محاسبهٔ مقدار میانگین نفوذ به کار برده شد:

$$fi = \frac{Fi - Fi-1}{ti - ti-1} \qquad (۱)$$

Fi مقدار میانگین نفوذ (m/s) برای فاصلهٔ زمانی $t_i - t_{i-1}$.

معادلهٔ (۲) برای محاسبهٔ مقدار نفوذ به کار برده می‌شود که از مدل Green- Ampt گرفته شده است.

$$K_e t = F_i - \psi\theta_d ln\left(1 + \frac{F_i}{\psi\theta_d}\right) \qquad (۲)$$

K_e مقدار نفوذ ($m.s^{-1}$) است، t مدت زمان بعد از تجمع آب (ماندابی‌شدن) (s)، Ψ میانگین پتانسیل موئینگی (m)، و θ_d کمبود رطوبت خاک ($m.m^{-1}$)، بدین صورت که اختلاف بین ضریب تخلخل و مقدار آب اولیه محاسبه می‌شود.

معادلهٔ (۳) معادلهٔ موج سینماتیک و بارش مازاد روی سطح دامنه را مشخص می‌کند.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \qquad (۳)$$

V میزان بارش مازاد (m) است، H عمق جریان (m)، q دبی در واحد عرض سطح ($m^3.m^{-1}.s^{-1}$)، x فاصله از بالای سطح (m). دبی رواناب هم q (m)، با استفاده از رابطهٔ عمق– دبی (۴) محاسبه شد:

$$q = \alpha.h^{1.5} \qquad (۴)$$

α ضریب عمق– دبی است که با فاکتورهای تابع هیدرولیکی دارسی و یسباخ مرتبط است. در مدل RHEM محاسبات مربوط به بار رسوب رواناب در طول شیب، جداسازی و ته‌نشست حاصل از پاشمانی، جریان سطحی، و جریان متمرکز با استفاده از معادلهٔ پیوستگی رسوب انجام می‌شود:

$$\frac{dG}{dx} = D_{ss} + D_c \qquad (۵)$$

که G ($kg.m^{-1}.s^{-1}$) بار رسوب در جریان است و D_{ss} و D_c فرسایش پاشمانی و سطحی و جریان اشباع‌شده.

راه‌حل‌های کمّی معادلهٔ (۵)، که در مدل WEPP نیز استفاده شده است، و پارامترهای D_{ss} و D_c براساس پارامترهای استخراج‌شده از مراتع تعیین شده‌اند.

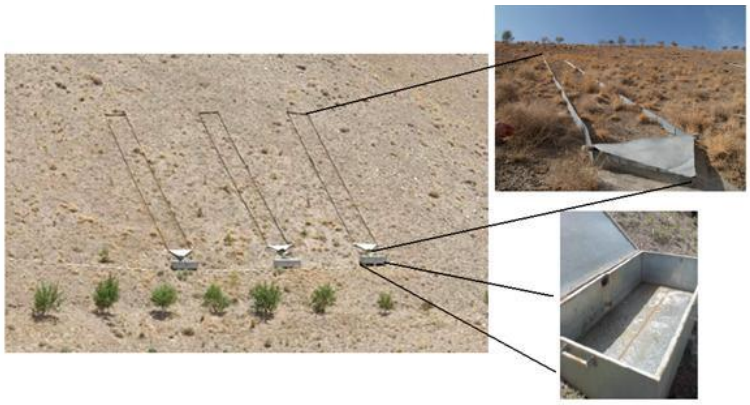
مدل RHEM یک معادلهٔ جدید برای فرسایش پاشمانی و ورقه‌ای به کار برده که از داده‌های فرسایشی مراتع توسعه یافته است [۱۳].

$$D_{ss} = K_{ss} \cdot I^{1.052} \cdot q^{0.592} \qquad (۶)$$

که D_{ss} ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) مقدار فرسایش پاشمانی و ورقه‌ای برای منطقه است، K_{ss} ضریب فرسایش‌پذیری سطحی و پاشمانی، I شدت بارندگی ($m.s^{-1}$)، و q سرعت رواناب ($m.s^{-1}$).

۳.۲. پلات‌های فرسایشی

به منظور سنجش میزان فرسایش و هدررفت خاک، در هر یک از حوضه‌های نمونه و شاهد، در سه دامنهٔ شرقی، غربی، و شمالی به‌ترتیب با شیب‌های ۵۵، ۴۰، و ۴۰ درصد به احداث ۳ پلات فرسایشی با ابعاد ۱/۸×۲۲/۱ متر اقدام گردید. در انتهای هر پلات لولهٔ خروجی رواناب تعبیه می‌شود و رواناب و رسوب تولیدشده در هر رگبار به مخازن جمع‌آوری‌کننده به ابعاد ۰/۵×۱×۱ متر هدایت می‌شود. میزان رسوب و هدررفت خاک از سال ۱۳۷۹ تا کنون در هر ۱۸ پلات فرسایشی در حوزهٔ نمونه و شاهد اندازه‌گیری شده است. میزان رسوب با برداشت حجم یک لیتر از کل مخزن جمع‌آوری‌کننده به صورت میلی‌گرم در لیتر مشخص شد. آمار بارش‌هایی که به تولید رواناب منجر می‌شود از ایستگاه کلیماتولوژی واقع در خروجی حوزهٔ آبخیز شهید نوری کاخک، که به‌طور متوسط در فاصلهٔ یک کیلومتری پلات‌ها قرار دارد، استخراج گردید.



شکل ۲. نمونه‌ای از پلات‌های فرسایشی

۴.۲. اجرای مدل RHEM

پس از تهیه و تعیین کلیهٔ ورودی‌های مورد نیاز مدل- شامل اقلیم، بافت خاک، طول شیب، تندی شیب، فرم دامنه، فرم رویشی غالب گیاهان، درصد تاج پوشش، درصد پوشش سنگی، درصد پوشش لاشبرگ، و درصد پوشش خزه و گل‌سنگ- مدلْ برای همهٔ پلات‌ها، که در این تحقیقْ دامنه در نظر گرفته می‌شود، در پایگاه اینترنتی مدل به آدرس http://dss.tucson.ars.ag.gov/rhem اجرا و مقادیر رسوب و رواناب برآوردی محاسبه شد.

۵.۲. آنالیزهای آماری

پس از اطمینان از نرمال‌بودن داده‌ها، میانگین رسوب مشاهده‌ای و برآوردی مدل RHEM با آزمون t- student جفتی در سطح معنی‌داری کمتر از ۵ درصد

در نرم‌افزار Minitab-16 مقایسه شد. همچنین، برای تعیین سطح اعتماد مدل از شاخص‌های (آماره‌های) میانگین خطای مطلق[1] (MBE)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا[2] (RMSE)، و ضریب همبستگی R استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات توپوگرافی، پوشش سطح خاک، و خاک پلات‌های فرسایشی مورد بررسی در حوزهٔ نمونه

حوضهٔ نمونه	خصوصیات شیب			خصوصیات پوشش (درصد)					
	تندی (درصد)	شکل	طول (متر)	فرم غالب رویشی	کریپتوکام	لاشبرگ	سنگ	سطح یقه	تاج پوشش
A1	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲۰	۲۵	۵	۲۷
A2	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲۰	۳۰	۳	۲۰
A3	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲	۲۲	۲	۱۵
B1	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	گندمیان چندساله	۰	۱۵	۱۵	۷	۴۰
B2	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	گندمیان چندساله	۰	۲۷	۵	۵	۴۵
B3	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	گندمیان چندساله	۰	۲۰	۴	۴	۴۰
C1	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱۰	۱۷	۳	۴۰
C2	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۵	۲۳	۳	۳۵
C3	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲	۱۷	۲	۳۰

دامنه	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	بافت خاک
A	۷۱	۱۱	۱۸	شنی لومی
B	۶۸	۱۷	۲۲	شنی لومی
C	۶۲	۱۳,۵	۲۴,۵	شنی لومی

جدول ۲. خصوصیات توپوگرافی، پوشش سطح خاک، و خاک پلات‌های فرسایشی مورد بررسی در حوزهٔ شاهد

حوضهٔ شاهد	خصوصیات شیب			خصوصیات پوشش (درصد)					
	تندی (درصد)	شکل	طول (متر)	فرم غالب رویشی	کریپتوکام	لاشبرگ	سنگ	سطح یقه	تاج پوشش
A1	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱	۲۰	۱,۳	۱۳
A2	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱	۳۰	۱,۳	۱۰
A3	۴۰	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲	۱۵	۱,۳	۱۳
B1	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱,۳	۳۵	۶,۵	۲۰
B2	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۴	۳۵	۶,۵	۲۵
B3	۴۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۴	۲۵	۶	۳۲
C1	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۲,۲	۳۰	۲	۲۳
C2	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱	۲۰	۱,۳	۱۳
C3	۵۵	یکنواخت	۲۲,۱	علف‌های یک‌ساله	۰	۱	۳۰	۲	۲۹

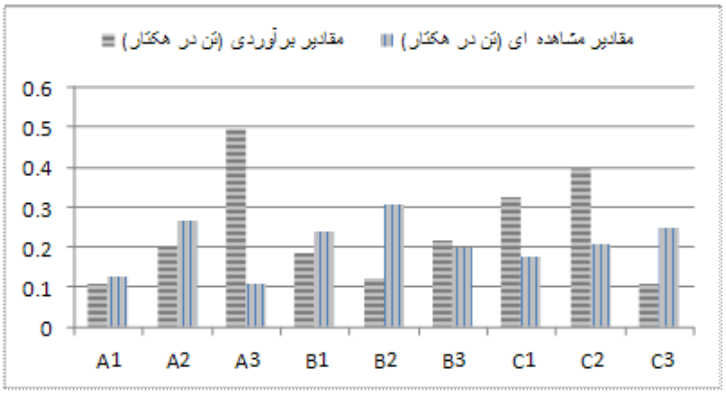
دامنه	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	بافت خاک
A	۷۴	۱۰	۱۶	شنی لومی
B	۶۲	۱۲,۲	۲۵,۸	شنی لومی
C	۵۹	۱۷,۲	۲۳,۸	شنی لومی

1. Mean Bias Error
2. Root Mean Square Error

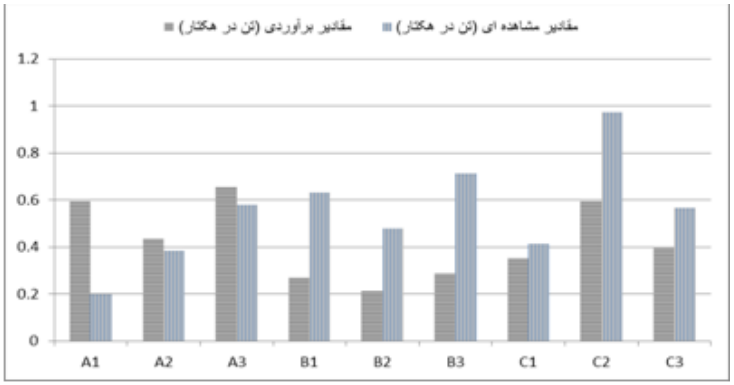
۲.۶. نتایج

نتایج حاصل از اندازه‌گیری فاکتورهای ورودی مدل در حوزهٔ نمونه و شاهد منطقهٔ مورد مطالعه در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

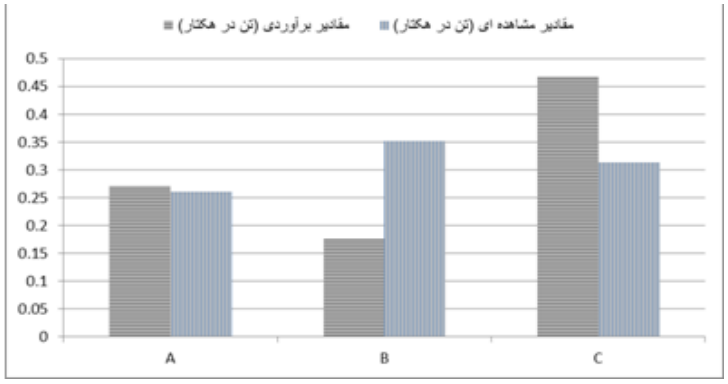
پس از تهیه و ورود اطلاعات مورد نیاز به مدل و اجرای آن برای کلیهٔ پلات‌های فرسایشی و همچنین اندازه‌گیری میزان رسوب هر رگبار در کلیهٔ پلات‌ها، نتایج به‌دست‌آمده به صورت رسوب ویژه در سال‌های مورد بررسی استحصال و در قالب نمودار در شکل‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی مدل برای حوزهٔ نمونه



شکل ۴. نمودار داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی مدل برای حوزهٔ شاهد



شکل ۵. نمودار میانگین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی دامنه‌ها در حوزهٔ نمونه

شکل ۶. نمودار میانگین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی دامنه‌ها در حوزهٔ شاهد

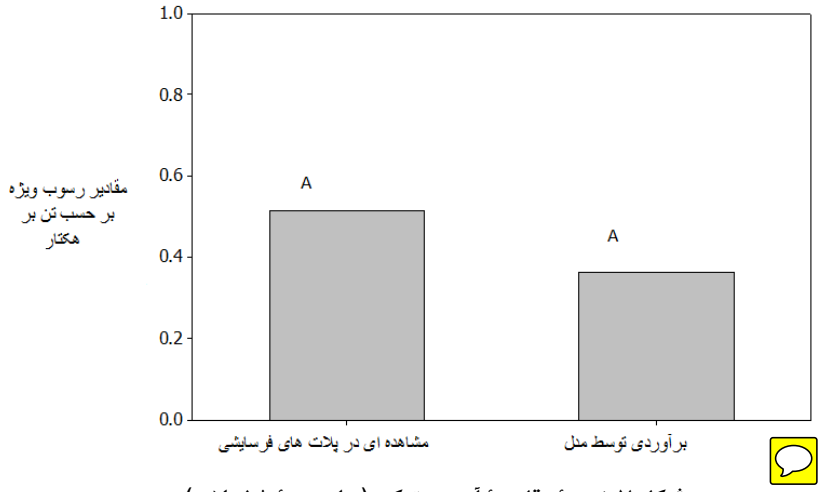
همان‌گونه که در بخش قبلی نیز ذکر شد، برای تعیین توانایی مدل در برآورد صحیح میزان رسوب ناشی از دامنه‌های مرتعی از روش آزمون t- student جفتی و برای مقایسهٔ داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای از آزمون مقایسهٔ توکی استفاده شد. با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، که حاصلِ تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌های داده‌های رسوب مشاهداتی و برآوردیِ کلیهٔ پلات‌ها و میانگین آن‌ها در جهات سه‌گانه است، در سطح معنی‌داری ۵ درصد نشان‌دهندهٔ عدم تفاوت میان داده‌های مشاهداتی و برآوردی توسط مدل RHEM است. همچنین، میانگینِ داده‌های دو گروه با استفاده از آزمون مقایسهٔ توکی بررسی شد که در سطح ۵ درصد نیز بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و مقادیر رسوب برآوردی توسط مدل است. شکل‌های ۷ و ۸ بیانگر این موضوع است.

جدول ۳. نتایج آزمون t- student جفتی (برای همهٔ ۱۸ پلات)

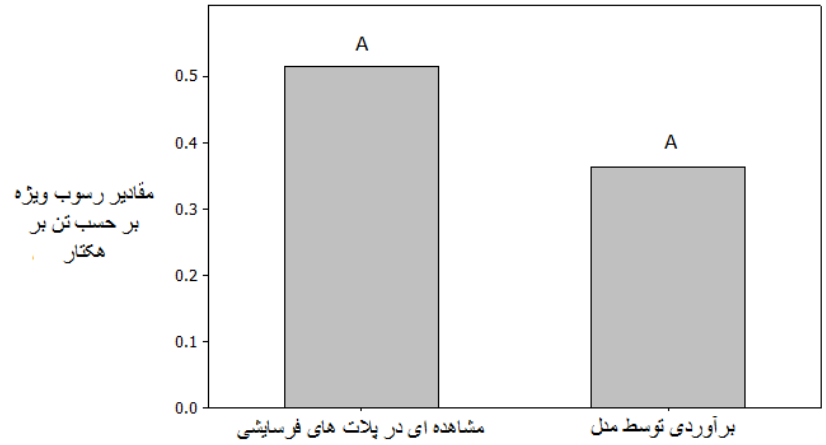
	تعداد داده	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد میانگین
مقادیر برآوردی	۱۸	۰,۳۳۱۶	۰,۱۷۲۰	۰,۰۴۰۵
مقادیر مشاهده‌ای	۱۸	۰,۳۷۹۵	۰,۲۳۴۵	۰,۰۵۵۳
اختلاف	۱۸	۰,۰۴۷۹	۰,۲۳۶۹	۰,۰۵۵۸
T-Value	-۰,۸۶			
P-Value	۰,۴۰۳			

جدول ۴. نتایج آزمون t- student جفتی (برای میانگین داده‌ها در سه جهت)

	تعداد داده	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد میانگین
مقادیر برآوردی	۶	۰,۳۶۳	۰,۱۵۰	۰,۰۶۱
مقادیر مشاهده‌ای	۶	۰,۵۱۶	۰,۲۷۷	۰,۱۱۳
اختلاف	۶	۰,۱۵۳	۰,۲۷۱	۰,۱۱۱
T-Value	۱,۳۸			
P-Value	۰,۲۲۶			



شکل ۷. نتیجهٔ مقایسهٔ آزمون توکی (برای همهٔ ۱۸ پلات)



شکل ۸. نتیجهٔ مقایسهٔ آزمون توکی (برای میانگین داده‌ها در سه جهت)

برای تعیین سطح اعتماد مدل از شاخص‌های (آماره‌های) میانگین خطای مطلق (MBE)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب همبستگی R استفاده شد. مقادیر آماره‌های فوق را در جدول ۵ می‌توان دید.

جدول ۵. مقادیر مربوط به آماره‌های مورد استفاده در تعیین سطح اعتماد مدل

شاخص	مقدار
میانگین خطای مطلق (MBE)	۰,۰۴۸
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰,۲۲
ضریب همبستگی (R)	۰,۳۵

۳. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل‌های آماری، مقایسهٔ میانگین‌های مقادیر رسوب مشاهداتی و برآوردی نشان‌دهندهٔ عدم اختلاف معنی‌دار، چه در بررسی کلیهٔ پلات‌های فرسایشی و چه در بررسی میانگین داده‌ها، در سه جهت مختلف قرارگیری پلات‌هاست. این موضوع با یافته‌های تحقیق دیگری، مبنی بر توانایی مدل در فراهم‌نمودن تخمینی قابل قبول از رواناب و هدررفت خاک، همخوانی دارد [۸]؛ ولی با نتایج تحقیق انجام‌گرفته در منطقهٔ سنگانه واقع در شمال خراسان رضوی، که بر روی پلات‌های فرسایشی در شیب‌های مختلف صورت گرفت، همخوانی ندارد [۲]. به‌رغم عدم تفاوت معنی‌دار بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی، با نگاهی به شکل‌های ۱ و ۲، این نکته قابل استنباط است که این مدل برآوردِ کمتری نسبت به مشاهدات واقعی داشته و این موضوع با یافته‌های تحقیق انجام‌گرفته در حوزهٔ سنگانه در شمال خراسان رضوی همخوانی ندارد [۲]. نتایجْ تفاوت معنی‌داری را بین میزان هدررفت خاک در منطقهٔ شاهد و نمونه، که از نظر نوع مدیریت و درصد پوشش گیاهی با هم اختلاف چشمگیری دارند، نشان می‌دهد؛ و این موضوع با نتایج تحقیقِ انجام‌گرفته در چراگاه‌های ایالت‌های آریزونا، آیداهو[1]، و نوادای[2] امریکا، برای ارزیابی تکنیک‌های مختلف حفاظت خاک با استفاده از مدل RHEM، همخوانی دارد [۱۰]. تحقیق مذکور نشان داد این مدل می‌تواند تأثیر کمّی اقدامات مختلف حفاظت خاک را در فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک برآورد کند. این موضوع، همچنین، با یافته‌های تحقیق انجام‌گرفته در حوزهٔ سنگانه، که در آنالیز حساسیت این مدلْ عامل تاج پوشش را در رتبهٔ اول حساسیت قرار دادند، همخوانی دارد [۲].

در بررسی آماره‌های مورد استفاده برای ارزیابیِ میزان کارایی مدل، فقط ضریب همبستگی مناسب نبود و دلیل آن هم اختلافِ بسیار زیاد بین مقادیر رسوب در پلات‌های منطقهٔ نمونه و شاهد است. اما در آماره‌هایِ MBE و RMSE، به دلیل آنکه داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند، این مشکل وجود ندارد و این آماره‌ها کارایی مدل را تأیید می‌کنند.

در مجموع، مزیت‌های مدل شامل اندک‌بودن تعداد داده‌های ورودی مورد نیاز، قابلیت اندازه‌گیری، و در دسترس‌بودن این داده‌ها و قابلیت دسترسی ساده و سریع به مدل از طریق سایت مربوطه و، در نهایت، تخصصی‌بودن مدل RHEM برای برآورد میزان فرسایش و رسوب در دامنه‌های مرتعی است.

از جمله محدودیت‌های مدل می‌توان اشاره کرد به عدم دسترسی کامل به ساختار نرم‌افزاری مدل برای تغییرات مورد نیاز. همچنین، از آنجایی که این مدل برای ایالات متحده امریکا طراحی شده است، اجرای آن در سایر مناطق، به دلیل عدم امکان جایگزینی کامل اطلاعات اقلیمی، خالی از اشکال نیست. نتایجْ در دامنه‌های مختلف منطقهٔ مورد مطالعه نشان‌دهندهٔ بیش‌برآوردی در برخی پلات‌ها و کم‌برآوردی در برخی پلات‌هاست. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، بدیهی است کاربردِ این مدل در حوزه‌های آبخیز کشور واسنجی مدل می‌تواند در کیفیت نتایج بسیار مؤثر باشد، اما فقدانِ روندِ مناسب بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی در تحقیق حاضرْ واسنجی مدل را مشکل می‌کند. در پایان، با توجه به

1. Idaho
2. Nevada

نتایج میانگینِ کلیهٔ پلات‌های مورد بررسی در منطقهٔ مورد مطالعه، این مدل، در مجموع، قادر است از تولید رسوب دامنه‌های مرتعی برآورد نسبتاً مناسبی ارائه کند.

References

[1]. Cogle, A.L., Lane, L.J., Basher, L. (2003). Testing the hillslope Erosion model for Application in India, New Zealand and Australia. Environmental Modeling and Software 18, 825-830.

[2]. Felegari, M. (2012). Application Rangeland Hydrology and erosion Model (RHEM) in Dry regions. M.Sc Thesis, Natural Resources Faculty, Yazd University. 124PP.

[3]. Lane, L.J., Shirley, E.D., Singh, V.P. (1988). Modeling erosion on hill slopes. In: Modeling Geomorphological Systems, Anderson MG(Ed.), Wiley Chichester, pp. 287-308.

[4]. Lane, L.J., Nichols, M.H., Levick, L.R., Kidwell, M.R. (2001). A simulation model for erosion and sediment yield at the hillslope scale. In: Landscape Erosion and Evolution Modeling, Harmon R.S. & W.W Doe, (eds). Kluwer Academic publishers, New York, pp. 201-1237.

[5]. Lane, L.J., Nichols, H.M., Paige, G.B. (1995a). Modeling erosion on hill slopes: concepts, theory and data. In: Proceedings of the International Congress on Modeling and Simulation, P. Binning, H. Bridgman & B. Williams, (Eds), Perth, Australia, pp. 1-7.

[6]. Lane, L.J., Nichols, M.H., Simanton, J.R. (1995b). Spatial variability of cover affecting erosion and sediment yield in overland flow. In: Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality, IAHS, pp.147-152.

[7]. Moffet, C.A., Pierson Jr, F.B unburned sagebrush communities: Applications for the Rangeland Hydrology and., Robichaud, P.R. (2009). Concentrated flow experiments on burned and Erosion model. 62nd Annual Meeting, Society of range Management. Albuquerque, New Mexico, February, pp. 8-12.

[8]. Nearing, M.A., H. WEI, J.J. STONE, F.B Pierson, K. E. Speath, M.A. Weltz, D.C. Flanagan, M. Hernandez. (2011). A Rangeland Hydrology and Erosion Model. ISSN 2151-0032.

[9]. Spaeth, K.E., Pierson, F.B., Moffet, C.A. (2006). Rangeland Hydrology and Erosion Model (RHEM) for ESD development. In: Proceedings of the 3rd National Conference on Grazing Lands, pp.13-16.

[10]. Weltz, M.A., Jolley, L., Nearing, M.A., Stone, J., Goodrich, D., Spaeth, K., Kiniry, J., Arnold, J., Bubneheim, D., Hernandez, M., Wei, H. (2008). Assessing the benefits of grazing land conservation practices. Journal of Soil and Water conservation 63, 214-217.

[11]. Wei, H., Nearing, M.A., Stone, J.J. (2007). A Comprehensive Sensitivity Analysis Framework for Model Evaluation and Improvement using a Case Study of The Rangeland Hydrology and Erosion Model. ASABE 50, 945-953.

[12]. Wei, H., Nearing, M.A., Stone, J.J., Breshears, D.D. (2008). A Dual Monte Carlo Approach to Estimate Model Uncertainty and Its Application to the Rangeland Hydrology and Erosion Model. ASABE 51, 515-520.

[13]. Wei, H., Nearing, M.A., Stone, J.J., Guertin, D.P., Spaeth, K.E., Pierson, F.B., Nichols, M.H., Moffett, C.A. (2009). A new splash and sheet erosion equation for rangelands. SSSAJ 73, 1386-1392.