

توانایی مدل فرسایش دامنه‌ای در تخمین رسوب ناشی از رگبارها در پلات‌های استاندارد فرسایشی با شیب‌های مختلف در کاربری مرتع

سید حمیدرضا صادقی^{۱*}، سمیه فضلی^۲، حمزه نور^۳ و حشمت‌اله آقارزی^۴

تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۱۵

چکیده

ارزیابی فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های موجود به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم مدیریتی و تبیین شیوه‌های صحیح حفاظت منابع آب و خاک ضروری است. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل فرسایش دامنه‌ای (HEM) به‌عنوان یکی از جدیدترین مدل‌های برآورد فرسایش، برای برآورد رسوب ناشی از رگبارها در پلات‌های مرتعی با شیب ۹، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد واقع در ایستگاه تحقیقات منابع طبیعی خسیجان اراک انجام شد. در این راستا داده‌های مربوط به ۱۶ رگبار به همراه رسوب و رواناب حاصل از آنها جمع‌آوری شد. به‌منظور اجرای مدل، ورودی‌های مورد نیاز آن شامل ارتفاع روان‌آب، درصد پوشش تاجی، درصد پوشش زمینی، بافت خاک، درصد و طول شیب برای هر کرت وارد مدل شد. نتایج نشان داد که مدل بدون واسنجی در هیچ یک از شیب‌ها قادر به برآورد دقیق میزان رسوب نبوده است. نتایج حاصل از واسنجی عامل فرسایش‌پذیری خاک و برازش روابط رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی دلالت بر عدم کارایی مدل در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد با ضریب تبیین کم‌تر از ۰/۴ ($P \geq 0/135$) داشته است. در حالی که توانایی مدل ذکرشده در شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد با اختصاص مقدار فرسایش‌پذیری ۰/۸ با ضریب تبیین ۰/۳۵۵ ($P=0/041$) و ۰/۸۰۳ ($P=0/000$) و خطای تخمین به‌ترتیب ۵۶ و ۳۵ درصد قابل قبول و خوب ارزیابی شد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر زمینه‌ساز استفاده از مدل مزبور در ارزیابی تولید رسوب در مناطق مرتعی با شرایط حاکم مشابه با شرایط تحقیق و مدیریت مناسب آب و خاک آنهاست.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه تحقیقاتی خسیجان، پلات فرسایشی، مدل فرسایش دامنه‌ای (HEM)، کاربری مرتع، مدل فرسایشی.

۱- دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

* نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

۲- دانش آموخته دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- عضو هیأت علمی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی

مقدمه

و آب می‌شود. مدل‌سازی فرآیند فرسایش خاک در سطح دامنه از دهه ۱۹۴۰ توسط الیسون و همکاران آغاز و سپس به صورت روابطی در دهه ۱۹۶۰ توسط میر و ویشمایر ارایه شد (۱۲)، در دهه ۱۹۷۰ فوستر توانایی مدل‌ها در تشریح متغیرهای مکانی فرسایش در سطح دامنه و تفکیک فرسایش شیاری و بین‌شیاری را به اثبات رساند (۱۲).

مدل فرسایش دامنه‌ای^۱ (HEM)، مدلی توزیعی و در مقیاس رگبار است که توسط لین و همکاران (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) در مرکز تحقیقات حوزه آبخیز توسعه کشاورزی آمریکا^۲ و در مراتع خشک و نیمه‌خشک آمریکا تهیه و ارایه شده است. مدل بر اساس رابطه ریاضی میان مقدار رسوب، روان‌آب، خصوصیات دامنه و عامل فرسایش‌پذیری خاک عمل می‌کند. این مدل مقدار فرسایش و تولید رسوب در سطح یک دامنه و در مقیاس رگبار را تخمین می‌زند. HEM بر پایه حل معادلات موج سینماتیک برای معادلات پیوسته جریان سطحی و روان‌آب در نیم‌رخ دامنه برای یک واقعه روان‌آب (رابطه ۱) استوار بوده و فرسایش شیاری، بین‌شیاری، فرآیندهای حمل و رسوب‌گذاری را ارزیابی می‌کند (۵، ۱۸ و ۲۳).

$$Q_s(x) = Q_{C_b} = Q \left\{ \frac{B}{K} + \left(K_r - \frac{B}{K} \right) [1 - \exp(-k_r x)] \right\} / k_r x \quad (1)$$

در این رابطه: Q_s ؛ کل میزان بار رسوب برای یک روان‌آب در واحد عرض برحسب کیلوگرم بر متر، Q ؛ حجم روان‌آب در واحد عرض بر حسب مترمکعب بر متر، C_b ؛ میانگین غلظت رسوب در هیدروگراف کل بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و x ؛ فاصله در جهت جریان روان‌آب بر حسب متر است. ضرایب مربوط به حمل رسوب (B)، عمق-دبی (K)، فرسایش شیاری (K_r) و فرسایش بین‌شیاری (K_b) با استفاده از متغیرهای تاج پوشش، طول شیب، پوشش گیاهی و شیب، بر اساس معادلات حاکم بر محاسبه فرسایش شیاری و بین‌شیاری و به‌طور خودکار توسط مدل محاسبه می‌شود. این مدل در تارنما^۳ نیز قابل دسترس بوده و اطلاعات ورودی آن شامل حجم روان‌آب در واحد سطح بر حسب میلی‌متر، بافت خاک، ویژگی‌های

فرسایش خاک از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی و تولید غذا در جهان است که تأثیرات مخربی بر زیست بوم‌های طبیعی و تحت مدیریت انسان دارد. هر چند فرسایش خاک در طول تاریخ وجود داشته، ولی در سال‌های اخیر به دلیل کاربری نامناسب اراضی شدت یافته است (۲۲). فرسایش خاک علاوه بر آثار سویی که در منطقه فرسایش‌یافته بر جای می‌گذارد، دارای مشکلات برون منطقه‌ای فراوانی است. رسوبات حاصل از فرآیند فرسایش خاک پس از حمل توسط آب‌های جاری در مناطق کم‌شیب بر جای گذاشته می‌شود. برآورد بار رسوب حوزه‌های آبخیز برای حل مشکلاتی مانند انتقال آلاینده‌ها، برنامه‌ریزی عملیات حفاظت خاک، طراحی سد‌ها و مخازن، تعیین فاکتورهای مؤثر مدیریت آبخیز، ارزش‌گذاری پروژه‌های آبی (۲۴)، حفاظت از زیست‌گاه آبریزان و ارزیابی مشکلات محیط‌زیست لازم است (۴).

برآورد مقادیر رسوب از طریق ایستگاه‌های رسوب سنجی و استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی پرهزینه و مشکل است، بنابراین یافتن روش‌هایی برای برآورد دقیق میزان رسوبدهی حوزه‌های آبخیز امری ضروری است. بدین منظور تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه برآورد فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز از سال‌ها پیش آغاز شده که منجر به ارایه مدل‌های تجربی و فرآیندی برآورد فرسایش و رسوب شد. باید توجه داشت که با وجود پژوهش‌های زیادی که روی مدل‌سازی فرسایش و رسوب صورت گرفته، هنوز انتخاب مدل مورد قبول جهانی برای فرسایش و رسوبدهی به سادگی صورت نمی‌گیرد (۱۰). به‌گونه‌ای که اغلب این مدل‌ها در شرایط خاص ایجاد شده‌اند و کاربرد آنها در مناطق دیگر بدون واسنجی باعث ایجاد خطای بالا در میزان رسوب برآوردی می‌شود، همچنین ممکن است یک مدل با مفهوم‌سازی صحیح فرآیند فرسایش و رسوب به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات ورودی در بسیاری از مناطق کاربردی نداشته باشد (۱۸). از این‌رو واسنجی مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب موجود با ورودی‌های زود یافت، منجر به ارزیابی‌های بهتر بار رسوبی و در نتیجه دقت بیش‌تر در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و حفاظت خاک

1- Hillslope Erosion Model

2- USDA ARS

3 -http://eisnr.tucson.ars.ag.gov/hillslopeerosionmodel

پایین را به دنبال خواهد داشت (۸). به طور کلی به منظور بررسی کارایی مدل‌های فرسایش و رسوب در بیش‌تر مناطق از پلات‌های استاندارد واقع در یک دامنه استفاده و نتایج حاصله به کل منطقه تعمیم داده می‌شود، حال آنکه کارایی این مدل‌ها در شیب‌های مختلف ممکن است نتایج متفاوتی در بر داشته باشد و کاربرد آن را محدود کند. از این رو تحقیق حاضر با توجه به کاربرد محدود و موقّق مدل فرسایش دامنه‌ای (HEM) در خارج و داخل کشور، تعداد کم و در دسترس بودن داده‌های ورودی در ایران و قابلیت استفاده از مدل ذکرشده در برآورد رسوب در کاربری مرتع به عنوان یکی از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های کشور، در ایستگاه تحقیقات منابع طبیعی خسیبجان واقع در شهرستان اراک به دلیل موجود بودن داده‌های بارش، روان‌آب و رسوب در رگبارهای اتفاق افتاده طی سال‌های پیشین و در چهار شیب مختلف مدّ نظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در ایستگاه تحقیقات منابع طبیعی خسیبجان واقع در ۶۰ کیلومتری شهرستان اراک در طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۴ دقیقه و عرض شمالی ۳۴ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۰ دقیقه انجام شده است. ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۸۵۰ متر با دامنه شمالی، بارش سالانه ۳۲۱ میلی‌متر، متوسط حرارت ۱۳/۲ درجه سانتی‌گراد، تبخیر و تعرق ۱۵۸۸ میلی‌متر و اقلیم منطقه طبق روش آمبرژه، خشک و سرد است (۲). تیپ گیاهی غالب منطقه مورد بررسی Astragalus-Hultemia بوده که حدود ۵۰ درصد از سطح ایستگاه و اغلب اراضی دشتی و دامنه‌ای را پوشانده است. پوشش متوسط این تیپ حدود ۴۶ درصد بوده و ترکیب گیاهان موجود به ترتیب گون، ورک، فریون و جارو با دامنه پراکنش ۱۴ تا ۳۱ درصد بوده است (۷). موقعیت کلی منطقه و پلات‌های استاندارد فرسایشی در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور سنجش میزان فرسایش و هدررفت خاک، اراضی مرتعی با شیب‌های ۹، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد انتخاب شدند. سپس پلات‌های استاندارد فرسایشی با ابعاد ۱/۸×۱×۲۲ متر (۳) احداث و اطراف آنها با ورق گالوانیزه به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (۱۵ سانتی‌متر آن

دامنه شامل: شیب دامنه بر حسب درصد، طول شیب بر حسب متر، درصد پوشش گیاهی و درصد پوشش زمینی است (۵، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰ و ۲۶).

تحقیقات در زمینه کاربرد HEM در جهان محدود بوده و شرایط خاصی بر استفاده از آن حاکم بوده است. کوگل و همکاران به ارزیابی کارایی HEM در هند، استرالیا و زلاندنو پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که این مدل در منطقه زلاندنو نیازی به واسنجی نداشته و با میزان پیشنهادی مدل برای فرسایش‌پذیری خاک، برآورد مناسبی از رسوب در شیب ۱۵/۶ درصد ارائه داده است. درحالی‌که در هند و استرالیا به منظور بهبود تخمین‌های مدل، میزان فرسایش‌پذیری خاک واسنجی شد. صادقی و همکاران (۲۰۰۸) مدل ذکرشده را در برآورد فرسایش خاک مراتع طبیعی و دست‌کاشت منطقه تالش در استان گیلان از طریق نصب پلات‌های فرسایش در شیب ۲۱ درصد مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که HEM در این منطقه نیازی به واسنجی مقدار فرسایش‌پذیری نداشت. نتایج مدل‌سازی در مرتع طبیعی بر ارتباط توانی و در مرتع دست‌کاشت بر ارتباط خطی بین داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای دلالت داشته است. در ایران نیز صادقی و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی کارایی مدل HEM تنها در پلات‌های مرتعی با شیب ۹ درصد در منطقه خسیبجان اراک پرداختند. بدین‌منظور از داده‌های مربوط به ۱۱ واقعه رگبار استفاده کردند و دریافتند که بدون واسنجی مدل، مقادیر رسوب تخمینی با مقادیر مشاهده‌ای تفاوت معنی‌داری داشته و واسنجی مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک باعث نزدیکی مقادیر رسوب برآوردی و مشاهده‌ای شد. آنها همچنین با بررسی انواع مختلف رگسبون در حالت عادی و تغییر شکل داده‌ها به ارتباط معنی‌داری بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی با مقدار واسنجی‌شده عامل فرسایش‌پذیری خاک معادل ۱/۱ با استفاده از رابطه پلی‌نومیال درجه چهارم دست یافتند.

تخمین میزان تولید رسوب طی یک رگبار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تعداد کم و در عین حال شدت زیاد رگبارها بسیار حائز اهمیت بوده و گاهی استفاده از مدل نامناسب، تخمین بسیار بالا و یا بسیار

مربوطه در سه تکرار و در قالب ۳ پلات آزمایشی اجرا شده و مقادیر میانگین استخراج‌شده از آنها برای آنالیزهای بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

در زمین فرو برده شد) محصور شد. در انتهای هر پلات لوله خروجی روان‌آب تعبیه که به ظروف مدرج جمع‌آوری کننده روان‌آب و رسوب هدایت شد. تیمار



شکل ۱- موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه و شمای کلی پلات‌های مورد بررسی

گرفته شد. در ادامه، داده‌های مربوط به ۱۸ رگبار به‌دست آمده و مورد پالایش آماری قرار گرفت. داده‌های پرت مربوط به ۲ رگبار از مجموع داده‌ها حذف شد. از این تعداد ۱۲ رگبار به‌منظور واسنجی و ۴ داده به‌منظور اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. پس از تهیه و تعیین کلیه ورودی‌ها، مدل برای تمامی رگبارها در پایگاه اینترنتی مدل اجرا و مقادیر رسوب برآوردی به ازای مقدار فرسایش‌پذیری پیشنهادی مدل به‌دست آمد.

پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، مقایسه میانگین رسوب مشاهده‌ای و رسوب تخمینی HEM با میزان پیشنهادی فرسایش‌پذیری خاک توسط آزمون t-student جفتی^۱ در سطح معنی‌داری کم‌تر از ۵ درصد و در نرم‌افزار SPSS 11.5 انجام شد (۲۰). با توجه به ثبات نسبی ویژگی‌های دامنه و امکان تغییر عامل فرسایش‌پذیری خاک، به‌منظور دست‌یابی به بهترین برآورد رسوب، مقدار این عامل در دامنه پیشنهادی مدل تغییر داده شد و مدل در چندین نوبت اجرا شد (۵، ۱۸ و ۲۰). سپس کلیه داده‌های به‌دست آمده مورد تجزیه آماری قرار گرفت. در این تحقیق ارتباط رگرسیونی دو متغیره بین رسوب مشاهده‌ای به‌عنوان متغیر وابسته و رسوب برآوردی به‌عنوان متغیر مستقل با استفاده از شکل‌های مختلف خطی و غیرخطی

کلیه داده‌های خام و اطلاعات مورد استفاده در تحقیق حاضر از پروژه‌های تحقیقی انجام شده در منطقه مشابه و با هدف پژوهش‌های فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف (۱، ۲ و ۷) و مجریان آنها جمع‌آوری شده و داده‌های ذکر شده محدود به دوره اجرای طرح‌ها بوده و پس از آن تداوم نیافته است. داده‌های مربوط به بارش و همچنین روان‌آب و محتوی رسوبی آنها و درصد پوشش گیاهی و زمینی برای رگبارهای به‌وقوع پیوسته در فاصله زمانی ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۸ و در مقایسه با اطلاعات گزارش شده در تحقیقات انجام شده در منطقه ذکر شده (۲۰) و جمع‌آوری و برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. حجم روان‌آب در واحد سطح به وسیله ارتفاع آب در ظرف جمع‌آوری‌کننده روان‌آب به دست آمد. به‌منظور تعیین میزان رسوب، نمونه‌های جمع‌آوری شده طی رگبارها در داخل آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس وزن رسوب با ترازوی دقیق تعیین و مقدار رسوب بر حسب کیلوگرم محاسبه شد. آمار بارش کل رگبارها به‌کمک نزدیک‌ترین ایستگاه کلیماتولوژی منطقه به‌دست آمد (۱ و ۲).

بافت خاک برای شیب‌های ۹ و ۲۰ درصد کلی‌لومی و برای شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد سندی -کلی-لوم تعیین و طول شیب در تمام پلات‌ها ۲۲/۱ متر در نظر

تخمین به دست آمده در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد، رابطه رگرسیونی میان رسوب مشاهده‌ای و تخمینی مدل، برازش داده شد.

رابطه‌های به دست آمده به دلیل عدم معنی‌داری در سطح اعتماد ۵ درصد با مقادیر ضریب تبیین کم‌تر از ۰/۴۷ ($P \geq 0/147$) قابل قبول ارزیابی نشدند. بنابراین برای دستیابی به برآورد قابل قبول مقادیر رسوب رگبار، در منطقه مورد مطالعه واسنجی مدل فرسایش دامنه‌ای (HEM) انجام شد. نمایش ترسیمی روند تغییرات مقدار رسوب برآوردی حاصل کاربرد مکرر مدل و در مقایسه با رسوب مشاهده‌ای برای تعدادی از مقادیر واسنجی شده عامل فرسایش‌پذیری خاک مربوط به شیب ۲۵ درصد در شکل ۳ ارایه شده است.

آنها صورت گرفت. همچنین برای استفاده از مدل‌های دیگر، از رابطه‌ها و مدل‌های موجود در نرم‌افزار Curve Expert نیز استفاده شد. برای تعیین سطح اعتماد مدل-های به دست آمده از شاخص‌های سطح معنی‌داری، ضریب تبیین^۱، خطای نسبی^۲ تخمین و تأیید، مجذور میانگین مربعات خطا^۳ و ضریب کارایی^۴ استفاده شد (۶، ۹ و ۱۵).

نتایج

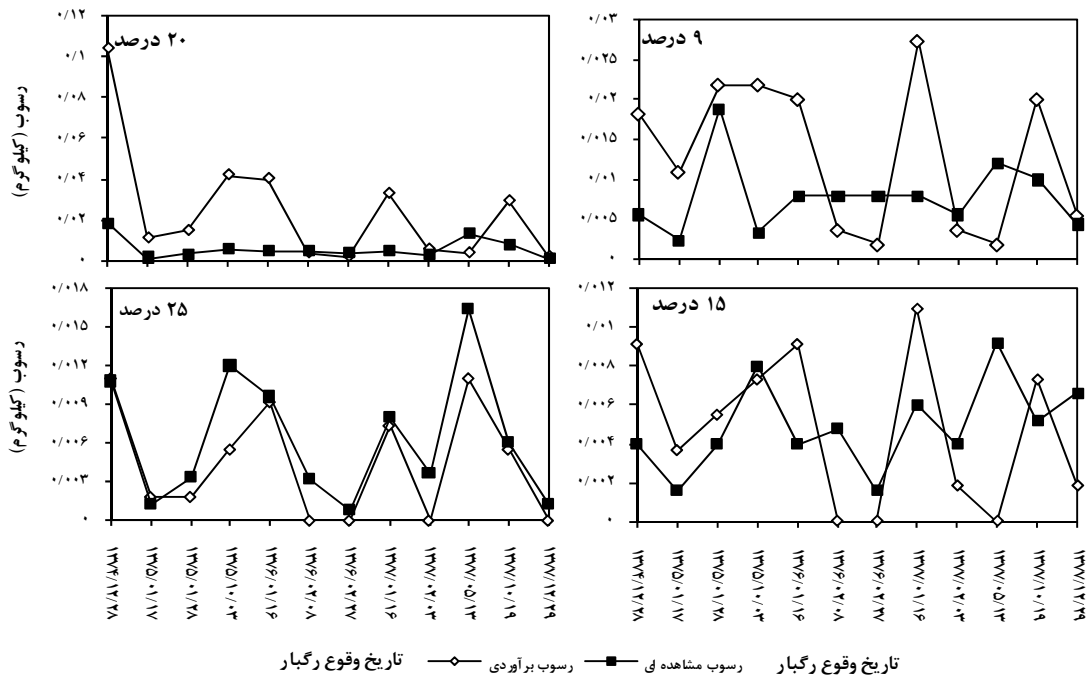
از میان تمامی رگبارها، رگبارهای ۱۳۷۵/۰۲/۰۶، ۱۳۷۶/۰۲/۱۵، ۱۳۷۷/۰۲/۱۵، ۱۳۷۸/۰۲/۰۵ برای تأیید مدل و بقیه به منظور واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوط به رسوب مشاهده‌ای در شیب‌های مختلف در جدول ۱ خلاصه شده است. عامل فرسایش‌پذیری خاک در تارنمای مدل اجرا شد. نتایج نشان داد که مدل در شیب‌های ۹ و ۲۰ طی رگبارهای ۱۳۷۶/۲/۸، ۱۳۷۶/۲/۲۷، ۱۳۷۷/۲/۳، ۱۳۷۷/۵/۱۳ و ۱۳۷۶/۲/۸ در شیب ۱۵ درصد طی رگبارهای ۱۳۷۶/۲/۲۷، ۱۳۷۷/۱۲/۲۹ و ۱۳۷۷/۵/۱۳، ۱۳۷۷/۲/۳، ۱۳۷۶/۲/۲۷ میزان رسوب را کم‌تر از میزان مشاهده‌ای تخمین زده است و در سایر رگبارها بیش‌تخمینی در برآوردهای مدل دیده می‌شود (شکل ۲). همچنین نتایج مربوط به برآورد رسوب رگبار توسط مدل با میزان فرسایش‌پذیری پیشنهادی ۱/۳۸ برای شیب‌های ۹ و ۲۰ درصد و ۰/۵۶ برای شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد در شکل ۲ ارایه شده است.

مقایسه میانگین‌های مقادیر رسوب مشاهده‌ای و برآوردی مدل در میزان پیشنهادی فرسایش‌پذیری خاک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار ($t=1/867$) و اختلاف ($P=0/089$) در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد و معنی‌داری اختلاف ($t=0/129$ و $P=0/90$) در شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد است. بنابراین از مقادیر تخمینی مدل در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد می‌توان به منظور برآورد رسوب رگبار با خطای تخمین به ترتیب ۱۵۹ و ۸۱ درصد استفاده کرد. در ادامه به منظور کاهش میزان خطای

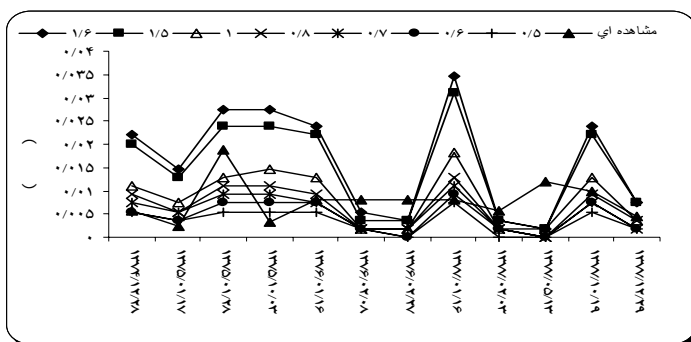
1- Determination Coefficient
2- Relative Error
3- Root Mean Square of Error
4- Coefficient of Efficiency

جدول ۱- مقادیر رسوب مشاهده‌ای در هر رگبار در پلات‌های مستقر در شیب‌های مختلف کاربری مرتع

ردیف	تاریخ رگبار	شدت بارش (سانتی‌متر بر ساعت)	رسوب مشاهده‌ای در شیب‌های مختلف (کیلوگرم)		
			۹ درصد	۱۵ درصد	۲۰ درصد
۱	۱۳۷۴/۱۲/۲۸	۰/۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱
۲	۱۳۷۵/۰۱/۱۷	۰/۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
۳	۱۳۷۵/۰۱/۲۸	۰/۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
۴	۱۳۷۵/۰۲/۰۶	۰/۶۲	۰/۰۱۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
۵	۱۳۷۵/۱۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۰۳۴	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲
۶	۱۳۷۶/۰۱/۱۶	۰/۲۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱
۷	۱۳۷۶/۰۲/۰۸	۰/۳۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳
۸	۱۳۷۶/۰۲/۱۵	۰/۲۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳
۹	۱۳۷۶/۰۲/۲۷	۰/۲۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
۱۰	۱۳۷۷/۰۱/۱۶	۵/۴۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸
۱۱	۱۳۷۷/۰۲/۰۳	۰/۲۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۹۴
۱۲	۱۳۷۷/۰۲/۱۵	۰/۶۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۱۲۵
۱۳	۱۳۷۷/۰۵/۱۳	۱/۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۱/۱۰۰
۱۴	۱۳۷۷/۱۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵	۰/۱۷۲
۱۵	۱۳۷۷/۱۲/۲۹	۰/۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۲۶
۱۶	۱۳۷۸/۰۲/۰۵	۰/۶۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷



شکل ۲- رسوب مشاهده‌ای و برآوردی با میزان پیشنهادی فرسایش‌پذیری خاک ۱/۳۸ برای شیب‌های ۹ و ۲۰ (بالا) و ۰/۵۶ برای شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد (پایین) (در پلات‌های فرسایشی مستقر در کاربری مرتع در خسیجان اراک)



شکل ۳- رسوب مشاهده‌ای و برآوردی با مقادیر مختلف واسنجی شده فرسایش‌پذیری (۱/۶ تا ۰/۵) (در پلات‌های مستقر در شیب ۲۵ درصد کاربری مرتع)

از برازش رگرسیونی در شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد مبین وجود رابطه معنی‌دار میان رسوب مشاهده‌ای و تخمینی است، از میان روابط به‌دست آمده، روابط درجه دو و بیش تر و صرف‌نظر از برخورداری نسبی از عملکرد بهتر در مقایسه با سایر مدل‌ها به‌دلیل عدم آرایه روند مشخص و نیز تغییرات نوسانی آنها از مجموع روابط حذف شدند. همچنین مدل‌های موجود در نرم‌افزار Curve Expert برای دستیابی به مدل‌های برتر در شیب ۲۰ درصد استفاده شد و باوجود عدم استفاده از بسیاری از مدل‌ها به‌دلیل وجود مقدار صفر در داده‌های رسوب برآوردی، عمل‌کرد سایر مدل‌ها شامل سینوسی^۱، استدلالی^۲، چندجمله‌ای^۳ درجه دو و سه به واسطه خطای تخمین بالا (>۰/۶۹) مناسب نبود.

در انتها از میان تمامی روابطی که به‌لحاظ آماری معنی‌دار بودند، روابطی به‌عنوان مدل‌های بهینه انتخاب شدند که دارای خطای تخمین و تأیید کم‌تر و ضریب کارایی بالاتر و مجذور میانگین مربعات خطا کم‌تر بودند. مجموعه مدل‌های نهایی برتر در جدول ۲ خلاصه شده است. دقت در جدول ۲ محتوی روابط بهینه برقرار شده بین رسوب مشاهده‌ای و برآوردی مدل فرسایش دامنه‌ای HEM در شرایط مختلف شیب و مقادیر فرسایش‌پذیری خاک به‌طور مشخص بر توانایی مدل رشد با ضریب تبیین خطای تخمین و تأیید، ضریب کارایی و مجذور میانگین مربعات خطا به‌ترتیب بیش از ۰/۳۴، کم‌تر از ۵۷ و ۴۷ درصد، بیش‌تر از ۰/۷۳، کم‌تر از ۰/۰۲ و کم‌تر از ۰/۴۹

انتخاب مقادیر فرسایش‌پذیری بر اساس معنی‌داری سطح اعتماد آزمون t و کم‌ترین میزان اختلاف رسوب برآوردی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای انجام شد. باوجود واسنجی مدل، حداقل خطای تخمین در شیب‌های ۹، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به‌ترتیب ۵۶، ۵۸، ۷۵ و ۴۹ درصد برآورد شد که بالاتر از خطای تخمین قابل قبول در مقوله‌های منابع طبیعی است، بنابراین اقدام به مدل سازی بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و برآوردی با میزان انتخابی فرسایش‌پذیری خاک شد.

رابطه رگرسیونی میان رسوب مشاهده‌ای و رسوب تخمینی مدل با مقادیر واسنجی‌شده فرسایش‌پذیری خاک در حالت‌های خطی، لگاریتمی، توانی، نمایی، معکوس، درجه دو و سه، S شکل، منحنی رشد و ترکیبی در شیب‌های ۹، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد در نرم‌افزار SPSS 11.5 برازش داده شد. نتایج حاصل از کاربرد HEM با مقادیر واسنجی‌شده فرسایش‌پذیری خاک و برازش رگرسیونی در پلات‌های فرسایشی مستقر در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد مبین عدم وجود ارتباط معنی‌دار ($P \geq 0/135$) بین برآوردهای مدل با مقادیر واسنجی شده فرسایش‌پذیری و مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده در شکل عادی و تغییر شکل‌یافته داده‌ها بوده است. همچنین باوجود دستیابی به روابطی با دامنه قابل قبول خطای تخمین کم‌تر از ۴۰ درصد، مقادیر خطای تأیید مدل بسیار زیاد بیش‌تر از ۱۳۳ درصد بوده است.

ضریب کارایی رابطه‌های به‌دست آمده بین ۱۲۲- تا ۰/۳۴ بود که خود تأییدی دیگر بر عدم کارایی این مدل (۹؛ ۱۶) در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد است. نتایج حاصل

1- Sinusoidal
2 Rational
3- Polynomial

(۲۴) در زمینه ارتباط غیرخطی غالب متغیرهای هیدرولوژیکی با یکدیگر توافق کامل دارد.

دلالت داشته است که این موضوع ضمن تأکید بر روند غیرخطی روابط حاکم بین مقادیر تخمینی مدل و مشاهداتی رسوب با یافته‌های محققین پیشین (۱۹) و

جدول ۲- مدل‌های رگرسیونی بهینه و منتخب بین مقادیر مشاهده‌ای (y) و تخمینی HEM (x) (در پلات‌های مرتعی مستقر در منطقه خسیجان اراک)

رابطه	شیب (درصد)	فرسایش‌پذیری خاک	رابطه	سطح ضریب معنی‌داری	ضریب تبیین	خطا (درصد) تخمین تأیید	ضریب کارایی	مجدور میانگین مربعات خطا
۱		۰/۸۰	$y = e^{-۵/۸۹+۴۰/۴۶x}$	۰/۰۴۱	۰/۳۵۵	۵۶	۲۹۱	۰/۰۰۱
۲		۰/۷۰	$y = e^{-۵/۹۱+۵۱/۷۸x}$	۰/۰۳۵	۰/۳۷۱	۵۴	۴۴۷	۰/۰۰۱
۳	۲۰	۰/۶۰	$y = e^{-۵/۸۸+۶۰/۷۲x}$	۰/۰۴۹	۰/۳۳۵	۵۷	۴۴۷	۰/۰۰۱
۴		۰/۵۰	$y = e^{-۵/۸۵+۷۴/۷۷x}$	۰/۰۴۵	۰/۳۴۴	۵۷	۴۵۰	۰/۰۰۱
۵		۰/۸۰	$\sqrt{y} = e^{-۳/۵۴+۱۰/۳۹\sqrt{x}}$	۰/۰۰۰	۰/۸۰۳	۳۵	۴۶	۰/۰۰۲
۶	۲۵	۰/۷۰	$\sqrt{y} = e^{-۳/۵۹+۱۳/۱۵\sqrt{x}}$	۰/۰۰۰	۰/۷۸۸	۳۵	۴۱	۰/۰۰۲
۷		۰/۶۰	$\sqrt{y} = e^{-۳/۴۰+۱۰/۲۶\sqrt{x}}$	۰/۰۰۲	۰/۶۵۰	۴۹	۶۲	۰/۰۰۲

بحث و نتیجه‌گیری

اهمیت عوامل مؤثر پوشش گیاهی و تغییر الگوهای بارش بر فرسایش خاک است که با نظر توی و همکاران (۲۰۰۲) در این خصوص موافق است.

از میان روابط بهینه انتخابی، در شیب‌های ۲۵ و ۲۰ درصد به ترتیب روابط ۱ و ۵ با میزان فرسایش‌پذیری ۰/۸۰ با توجه به معیارهای مد نظر به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شدند. دلیل این امر را می‌توان به محدودیت نوع فرسایش مورد مطالعه، مقیاس مکانی مورد استفاده در این تحقیق و فرآیندهای مدل‌سازی مورد بحث در این مدل را نسبت داد که ضرورت تجدید نظر در مفهوم سازی مدل ذکر شده را تأیید می‌کند. در استفاده از مدل فرسایش دامنه‌ای در پلات‌های استاندارد فرسایشی مستقر در چهار شیب مورد مطالعه نتایج نشان‌دهنده آن است که HEM بدون واسنجی در شیب‌های ۹، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد قادر به برآورد دقیق میزان رسوب نیست. واسنجی عامل فرسایش‌پذیری خاک و برازش رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی دلالت بر عدم کارایی مدل در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد دارد، حال آنکه در شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد با لحاظ ۰/۸ برای عامل فرسایش‌پذیری خاک، روابطی قابل قبول با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۳۵۵ و ۰/۸۰۳ و خطای تخمین به ترتیب ۵۶ و ۳۵ به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده ضمن تأیید

مقایسه میانگین‌های مقادیر رسوب مشاهداتی و برآوردی مدل در میزان پیشنهادی فرسایش‌پذیری خاک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در شیب‌های ۹ و ۱۵ درصد و معنی‌داری اختلاف در شیب‌های ۲۰ و ۲۵ درصد است. نتایج به‌دست آمده در این مورد با یافته‌های کوگل و همکاران (۲۰۰۳) و صادقی و همکاران (۲۰۰۹) مبنی بر ناتوانی مدل ذکر شده با مقادیر پیشنهادی فرسایش‌پذیری خاک در برآورد میزان رسوب و همچنین عدم دستیابی به رابطه قابل قبول در این زمینه همخوانی دارد، حال آنکه با نتایج صادقی و همکاران (۲۰۰۸) در زمینه کاربرد مدل ذکر شده در پلات‌های فرسایشی مستقر در مراتع منطقه تالش در استان گیلان همخوانی ندارد. این در حالی است که در شیب ۲۵ درصد مدل تنها در رگبارهای ۱۳۷۴/۲/۲۸ و ۱۳۷۶/۱/۱۶ دارای تخمین‌های بیش‌تر از مقدار مشاهداتی است که با یافته‌های کوگل و همکاران (۲۰۰۳) و صادقی و همکاران (۲۰۰۸) در مورد بیش تخمینی مدل در تمامی رگبارها مغایرت دارد، در حالی که با نتایج صادقی و همکاران (۲۰۰۹) مبنی بر برآورد متفاوت مدل در رگبارهای مختلف همخوانی دارد. این رفتار متفاوت مدل‌های فرسایش و رسوب در تخمین مقادیر کم و زیاد فرسایش خاک به‌دلیل تغییرپذیری

تحلیل و بررسی مجدد مفهوم حاکم بر فرآیندهای مدل‌سازی مورد استفاده در مدل و مقایسه بین نتایج حاصل از HEM و سایر مدل‌های مورد استفاده در کاربری و شرایط مشابه تحقیق فعلی را برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد کرد.

استفاده ساده و راحت مدل از طریق دستیابی به پایگاه مدل ذکر شده بر توانایی متفاوت آن در شبیه‌سازی تولید رسوب ناشی از رگبارهای مشاهده‌ای در منطقه مورد نظر دلالت داشته است. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق فعلی و سوابق پیشین موجود علاوه بر دقت در تأمین و تهیه دقیق اطلاعات ورودی و پارامترهای مدل می‌توان

منابع

1. Agharazi, H.A., 1997. Report on research project on measuring soil erosion and runoff from standard plots for evaluation of the USLE, Markazi Research Center for Agriculture & Natural Resources, 54p. (In Persian)
2. Agharazi, H.A., 2005. Measurement of soil erosion and its estimation by using USLE in dry lands, In: 3rd National Conference on Soil Erosion and Sediment Yield, Tehran, 473-475pp. (In Persian)
3. Bennett, H.H., 2001. Soil conservation, Agro bios, New Delhi, 993p.
4. Cigizoglu, H.K., 2004. Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptions, *Advance in Water Resources*, 21: 85-195.
5. Cogle, A.L., L.J. Lane & L. Basher, 2003. Testing the hill slope erosion model for application in India, New Zealand and Australia, *Environmental Modeling and Software*, 18: 825-830.
6. Das, G., 2000. Hydrology and soil conservation engineering, Prentice-Hall of India Press, 486p.
7. Gandomkar, A.A. 1996. Report on research in Khosbijan station, Markazi Research Center for Agriculture & Natural Resources: 31-36pp, (In Persian).
8. Gholami, L., S.H.R. Sadeghi, A.V. KhalediDarvishan & A.R. Telvari, 2008. Storm-wise sediment yield prediction using rainfall and runoff Variables, *J. Water and Soil*, 22(2): 262-271, (In Persian).
9. Green, I.R.A. & D. Stephenson, 1986. Criteria for comparison of single event models, *Hydrological Sciences Journal*, 31:395-411.
10. Kothyari., U.C, M. Jain & K. Ranga Raju, 2002. Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS, *J. Hydrological Sciences*, 75: 693-706.
11. Lane, L.J., M.H. Nichols, L.R. Levick & M.R. Kidwell, 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, 201-237pp.
12. Lane, L.J., H.M. Nichols & G.B. Paige, 1995a. Modeling erosion on hill slopes: concepts, theory and data. In: *Proceedings of the International Congress on Modeling and Simulation (MODSIM'9)*, P. Binning, H. Bridgman & B. Williams, (Eds), Perth, Australia, July, 1995, 1: 1-7.
13. Lane., L.J., H.M. Nichols & J.R. Simanton, 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, 226:147-152.
14. Lane, L.J., E.D. Shirley & V.P. Singh, 1988. Modeling erosion on hill slopes. In: *Modeling Geomorphological Systems*, Anderson MG (Ed.), Wiley Chichester: 287-308pp.
15. Lee, Y.H & V.P. Singh, 1999. Prediction of sediment yield by coupling kalman filter with instantaneous unit sediment graph, *Hydrological Processes*, 13: 2861-2875.
16. Liu, X & J. Li, 2008. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China, *Chinese Geographical Sciences*, 18(3): 235-241.
17. Sadeghi, S.H.R., M. Azari & B. GhaderiVangah, 2006. Application, calibration and sensitivity analysis of Hillslope Erosion Model (HEM) in prediction of soil erosion in natural and planted rangelands, *J. Agricultural Science and Natural Resources of Khazar*, 4(1): 1-14, (In Persian).
18. Sadeghi, S.H.R., M. Azari & B. GhaderiVangah, 2008a. Field evaluation of the hill slope Erosion Model (HEM) in Iran, *Biosystems Engineering*, 99: 304-311.
19. Sadeghi, S.H.R., T. Mizuyama, S. Miyata, T. Gomi, K. Kosugi, T. Fukushima, S. Mizugaki & Y. Onda, 2008b. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed, *Geoderma*, 144: 198-211.
20. Sadeghi, S.H.R., H. Noor, M.B. Raisi & H. Saeidian, 2009. Efficiency of hill slope Erosion Model (HEM) in Rangeland plots in Khosbijan area, Arak, *Rangeland Journal*, The Scientific and Research J. Iranian Rangeland Management Society, 2(3): 301-313. (In Persian)
21. Sadeghi, S.H.R., H.R. Pourghasemi & M. Mohammadi, 2007. Comparison of accuracy of some soil erosion and sediment yield models in rangeland, *Rangeland Journal*, The Scientific and Research J. Iranian Rangeland Management Society, 1(1): 91-102. (In Persian)
22. Sadeghi, S.H.R & J.K. Singh, 2005. Development of a synthetic sediment graph using hydrological data, *J. Agricultural Science and Technology (JAST)*, 7: 69-77.
23. Shirley, E.D & L.J. Lane, 1978. A sediment yield equation from an erosion simulation model, *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*, 8: 90-96.
24. Singh, V P., 1992. Elementary hydrology, prentice-hall, India, 973p.
25. Toy, T.J., G.R. Foster & K.J. Renald, 2002. Soil erosion: processes, prediction, management and control, Mc-Gray Hill, 238p.
26. Wilson, C.J., J.W. Cary, P.C. Beeson, M.O. Grad & L.J. Lane, 2001. A GIS-based hill slope erosion and sediment delivery model and its application in the Cerro Grande Burn Area, *Hydrological Processes*, 15: 2995-3010.