

کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و هدررفت خاک در مراتع سنگریزه‌ای حوضه خامسان کردستان

ناصر خالقی پناه^۱، حسین اسدی^{۲*}، مهدی شرفا^۳، منوچهر گرجی^۴، مسعود داوری^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استاد، گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۴. استاد، گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۵. استادیار، گروه مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۸/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۱)

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و رسوب ناشی از رخدادهای طبیعی در سطح کرت در مراتع حوضه خامسان کردستان بود. رواناب و رسوب حاصل از رخدادهای منجر به رواناب در طول سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ در ۱۸ کرت با ابعاد ۲۴ متر طول و ۱/۸ متر عرض اندازه‌گیری شد (۶ دامنه - سه کرت در هر دامنه). همزمان داده‌های ورودی مورد نیاز مدل از جمله ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و پوشش زمین در طول این مدت بررسی گردید. در این مدت، تعداد ۲۴ رخداد مورد بررسی قرار گرفت. بعد از واسنجی مدل WEPP بر اساس قسمت تک رخداد با ۸ رخداد، اعتبارسنجی مدل با ۱۶ رخداد باقیمانده صورت گرفت. مدل توانست به میزان قابل قبولی رواناب و هدررفت خاک ناشی از رخدادهای طبیعی را در دامنه‌های مرتعی دارای مقادیر قابل توجهی جزء سنگی پیش‌بینی نموده و برآوردهای هدررفت خاک تا حدودی بهتر از رواناب بود. به‌طور کلی، کارایی مدل در دامنه‌های با مقادیر جزء سنگی (به-ویژه پوشش سنگی) و درصد آهک بالاتر، کم‌تر از دامنه‌های دیگر بود. به نظر می‌رسد علاوه بر ویژگی‌های دامنه‌های مورد بررسی، تغییرات شدت بارندگی در طول هر رخداد نیز تأثیر به‌سزایی بر تولید رواناب و رسوب و تخمین‌های مدل داشت. در مدل WEPP برای تک رخداد، صرفاً بخشی از ویژگی‌های یک بارندگی به مدل وارد شده و تغییرات در طول یک بارندگی که ممکن است تأثیر به‌سزایی بر مقدار رواناب و رسوب داشته باشد در نظر گرفته نشده است.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی مدل، تک رخداد، جزء سنگی، کرت، هدررفت خاک

مقدمه

بر پایه و اساس فیزیکی، مدل‌های مفهومی و مدل‌های تجربی و یا رگرسیونی بوده است (Lin et al., 2002; Jetten et al., 2003; Merritt et al., 2003). از طرفی گرایش‌های اخیر برای حرکت از مدل‌های تجربی فرسایش خاک به سمت مدل‌های پیشرفته‌تر از جمله مدل‌های بر پایه و اساس فیزیکی که قادر به انجام تجزیه و تحلیل در مقیاس بزرگ‌تر بوده، اهمیت و نقش اساسی مطالعات در مقیاس کرت را کاهش نداده است (Nearing et al., 1999).

کارکنان وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) و مؤسسات مرتبط، پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی را در سال ۱۹۸۵ برای ایجاد یک فناوری جدید پیش‌بینی فرسایش آغاز کردند. در آن زمان معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) به راحتی نمی‌توانست پاسخگوی نیازهای روزافزون حفاظت کنندگان و مدیران محیطی باشد. جهت پوشش این نیازها، مدل WEPP به‌عنوان یک جایگزین توسعه پیدا کرد. رابط کاربر اولیه

با توجه به اینکه خاک‌های کوهستانی به‌طور کلی کم‌عمق بوده و حاصلخیزی آن‌ها غالباً در لایه‌های بالایی متمرکز است، فرسایش خاک یک مشکل بسیار مهم مؤثر بر چشم‌انداز در مقیاس‌های مختلف بوده و چالشی جدی برای مدیریت زمین و حفاظت خاک به حساب می‌آید (García-Ruiz and Lana- Renault, 2011; Angassa, 2014; Bravo-Espinosa et al., 2014). بهترین حالت این است که قبل از هرگونه اقدامات حفاظتی، فرسایش خاک پیش‌بینی شود. مدل‌های فرسایش خاک، یک ابزار لازم جهت پیش‌بینی هدررفت خاک و کمک به اجرای راهبردهای کنترل فرسایش هستند. مدل‌های فرسایش خاک دارای تنوع بسیار زیادی در سطح جهانی هستند. عمدتاً تأکید بر روی توسعه و مطالعه سه گروه از مدل‌ها، یعنی مدل‌های

* نویسنده مسئول : ho.asadi@ut.ac.ir

مدل در سال ۱۹۹۹ تکمیل و منجر به ارائه یک برنامه نرم‌افزاری کاربرپسند شد که هنوز هم به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابط گرافیکی ویندوز، یک نمای جانبی از نیم‌رخ دامنه را به تصویر می‌کشد. در مدل WEPP حوضه به یک جزء یا بیش‌تر از اجزای جریان سطحی^۱ (OFEs) که قسمت‌هایی با ویژگی-های خاکی، شیب و مدیریت یکسان است، تقسیم می‌شود (Shen *et al.*, 2009). مدل WEPP یک مدل پیش‌بینی فرسایش با شبیه‌سازی پیوسته می‌باشد. شبیه‌سازی پیوسته در این مدل به این معنی است که برنامه کامپیوتری، شبیه‌سازی را در طول چند سال با داشتن داده‌های اقلیمی روزانه انجام می‌دهد. برنامه کامپیوتری WEPP می‌تواند برای تک رخداد نیز اجرا شود. در این نوع شبیه‌سازی، شرایط اولیه توصیف‌شده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. زمانی که هدف، درک بخشی از فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی باشد شبیه‌سازی تک رخداد می‌تواند بسیار مفید باشد. مدل WEPP به‌کار رفته برای دامنه‌ها را می‌توان به نه جزء مفهومی تقسیم‌بندی نمود: ایجاد اقلیم، فرآیندهای زمستان، آبیاری، هیدرولوژی، خاک‌ها، رشد گیاه، تجزیه بقایا، هیدرولیک جریان سطحی و فرسایش. اقلیم شبیه‌سازی شده برای شبیه‌سازی مدل WEPP با استفاده از مدل کلاژن که یک برنامه کامپیوتری جدا از مدل WEPP است ایجاد می‌شود. کلاژن، فایل‌های داده‌های ورودی اقلیمی مدل WEPP را ایجاد می‌کند. جزء هیدرولوژی مدل WEPP، نفوذ، رواناب، تبخیر از خاک، تعرق گیاه، نفوذ عمقی آب در خاک، برگاب ذخیره شده توسط گیاه و بقایا و ذخیره چالابی را محاسبه می‌کند.

مدل WEPP به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی رواناب و بار رسوب در مقیاس‌های مزرعه و حوضه به‌کار برده شده است (Flanagan and Nearing, 1995; Zhang *et al.*, 1996; Baffaut *et al.*, 1997; Renschler and Harbor, 2002). علاوه بر این، مدل WEPP به شکل موفقیت‌آمیزی برای تخمین رواناب و هدررفت خاک از کاربری‌های مختلف و مدیریت محصولات زراعی به‌کار رفته است (Baigorria and Romero, 2007; Pieri *et al.*, 2007; Pandey *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2009, Shen *et al.*, 2010). همچنین مدل WEPP به شکل گسترده‌ای در نقاط مختلف جهان و مکان‌های مختلف جغرافیایی به‌عنوان مثال؛ اسپانیا، نروژ و برزیل توسط محققین مختلفی (Soto and Díaz-Fierros, 1998; Bacchi *et al.*, 2003; Gronsten and Lundekvam, 2006) آزمایش شده است.

تأثیر جزء سنگی بر روی فرآیندهای هیدرولیکی، تولید رواناب و هدررفت خاک به‌طور گسترده‌ای در دهه‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است (Valentin and Casenave, 1992; Poesen *et al.*, 1994; Katra *et al.*, 2008). مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی نشان داده که قطعات سنگی در خاک سطحی می‌تواند تأثیر زیادی بر ویژگی‌های خاک، کیفیت خاک و فرآیندهای هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و فرسایشی داشته باشد (Poesen and Lavee, 1994; Van Wesemael *et al.*, 1995; Soto and Díaz-Fierros, 1998; Javadi *et al.*, 2005; Mayor

1. Overland Flow Elements

از این تحقیق بررسی کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و رسوب ناشی از رخدادهای طبیعی در سطح کرت در مراتع سنگریزه‌ای حوضه خامسان کردستان بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

به منظور مطالعه هیدرولوژیکی، در مناطقی که از نظر وضعیت آب و هوایی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی و سایر عوامل همگن باشند، حوضه‌های کوچکی انتخاب و مطالعه عوامل مذکور و اثرات متقابل آن‌ها در چرخه آب مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به این مناطق، حوضه‌های معرف اطلاق می‌گردد. در حوضه‌های معرف، دو زیرحوضه تقریباً مشابه به اسم حوضه‌های زوجی انتخاب می‌شود. حوضه‌های زوجی در برگیرنده حوضه‌های شاهد و نمونه می‌باشند. در کشور ایران در مجموع در ۱۱ استان کشور طرح حوضه‌های معرف و زوجی به مرحله واسنجی اولیه و آماربرداری ایستگاه‌ها رسیده است (Anonymous, 2012). حوضه خامسان در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴ دقیقه و ۴/۸ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه و ۳۶ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۷ دقیقه و ۳۶/۳ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۱ دقیقه و ۳۴/۴۰ ثانیه عرض شمالی قرار دارد.

این حوضه در ۶۰ کیلومتری شهر سنندج (جنوب سنندج) قرار دارد. میانگین بارندگی ۵ ساله حوضه ۴۲۸ میلی-متر است (Anonymous, 2012). در ایستگاه حوضه معرف و زوجی خامسان یک ایستگاه هواشناسی با تجهیزات کامل وجود دارد. همچنین در بین حوضه شاهد و نمونه یک باران‌نگار در ارتفاع میانه حوضه وجود داشته که بارندگی رخ داده در دو زیرحوضه را ثبت می‌کند. در هر کدام از زیرحوضه‌های شاهد و نمونه، ۳ سری کرت در سه جهت مختلف در سه تکرار (۶ سری کرت در سه تکرار، مجموعاً ۱۸ کرت برای دو زیرحوضه) از سال ۱۳۸۴ احداث شده‌اند. دامنه‌های کرت‌های زیرحوضه نمونه از H1 تا H3 و زیرحوضه شاهد از H4 تا H6 نامگذاری شدند و از این به بعد با این عناوین بیان می‌شوند. تمامی کرت‌ها هم اندازه بوده با طول ۲۴ متر و عرض ۱/۸ متر و حجم مخزن جمع‌آوری کننده ۱/۵ مترمکعب می‌باشد (شکل ۱).

مطالعات در عرصه و آزمایشگاه

نمونه‌برداری از رواناب و رسوب در کنار سایر مطالعات کرت‌های فرسایشی به مدت ۳ سال از ۱۱ دی ۱۳۸۹ تا ۱۱ دی ۱۳۹۲ (۱ ژانویه ۲۰۱۱ تا ۱ ژانویه ۲۰۱۴) صورت گرفت. بعد از اتمام هر بارندگی، از مخزن کرت‌های مورد بررسی پس از همگن‌سازی،

اثر پوشش قطعات سنگی بر فرسایش خاک از سال‌ها قبل مورد توجه قرار گرفته و نیاز به ترکیب این پارامتر در مدل‌های بر پایه و اساس فیزیکی فرسایش خاک به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است. Herrick *et al.* (2010) و Zavala *et al.* (2010) خاطر نشان کرده‌اند که نیاز به تحقیقات بیش‌تری به شکل آزمایش‌های کنترل‌شده به منظور افزایش درک ما از تأثیر خاک‌های سنگریزه‌ای بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی و برای بهبود پیش‌بینی‌های فرسایش خاک می‌باشد. Mahmoodabadi and Cerdà (2013) نشان دادند پوشش جزء سنگی خیلی بیش‌تر از هر ویژگی دیگر خاک بر روی فرسایش‌پذیری بین شیاری پایه مدل WEPP تأثیر می‌گذارد.

در مدل WEPP، فرض بر این است که جزء سنگی موجود در نیمرخ خاک منجر به کاهش سطح مقطع نیمرخ خاک شده و در نتیجه منجر به کاهش ضریب آبگذری، کاهش تخلخل و کاهش رطوبت حجمی خاک می‌شود. تأثیر آن در پارامترهای ذکر شده به شکل زیر لحاظ می‌شود (Flanagan and Nearing, 1995):

$$K_s = k_s \times (1 - rfg) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$Por = por \times (1 - rfg) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$Thetfc = thetfc \times (1 - rfg) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Thetdr = thetdr \times (1 - rfg) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که K_s ضریب آبگذری اشباع، Por تخلخل، $Thetfc$ رطوبت حجمی ظرفیت مزرعه‌ای، $Thetdr$ رطوبت حجمی در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد، rfg همان جزء سنگی است که به صورت درصد حجمی در هر لایه خاک در پنجره خاک مدل WEPP وارد می‌شود.

هم‌راستا با تحقیقات جهانی، در ایران هم مدل‌های فرآیندی نسبت به سال‌های گذشته مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است. با این وجود بیش‌تر تحقیقاتی که در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی ایران صورت گرفته در ارتباط با مدل‌های تجربی فرسایش بوده و تحقیقات کم‌تری در رابطه با مدل‌های فرآیندی از جمله WEPP نسبت به مدل‌های تجربی و بررسی کارایی آنها با رخدادهای طبیعی صورت گرفته است. از طرفی با توجه به تحقیقات انجام‌شده در کشورهای دیگر و برتری مدل WEPP از برخی جهات نسبت به مدل‌های تجربی مثل RUSLE، کارایی مدل WEPP هنوز برای خیلی از مناطق از جمله حوضه‌های با شرایط خاص در کشور ما مشخص نیست. لذا با توجه به ویژگی‌های خاص منطقه مورد مطالعه (سنگریزه‌ای بودن، به ویژه در مناطق مرتعی) و با توجه به موارد مذکور، هدف

اجرای مدل در سطح کرت

برای اجرای مدل WEPP در سطح کرت می‌بایست بر اساس سطح مورد مطالعه، پارامترهای ورودی آماده شده، سپس بر اساس این پارامتر، ورودی مدل برای اجرا در سطح مورد نظر ساخته شدند. یکی از فایل‌های موردنیاز، فایل اقلیم می‌باشد. ابتدا به کمک اطلاعات موجود در ایستگاه هواشناسی اقدام به ساخت فایل اقلیم گردید. تهیه یک فایل اقلیم برای یک منطقه کاری زمان‌بر بوده و برای مناطق خارج از ایالات متحده یا باید ایستگاهی را پیدا کرد که ویژگی‌های اقلیمی ثبت‌شده‌ای شبیه منطقه مورد مطالعه داشته باشد یا خود به ساخت فایل اقلیم اقدام نمود. در این تحقیق فایل اقلیم با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی حوضه معرف و زوجی خامسان، برای منطقه مورد مطالعه ایجاد گردید. فایل اقلیم مشتمل بر اطلاعاتی در مورد بارندگی، دما، میزان تشعشع خورشید و باد است.

ویژگی‌های موردنیاز برای فایل خاک شامل درصد شن و رس، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد حجمی سنگریزه برای هر لایه خاک در فایل خاک وارد شد. سایر ویژگی‌های موردنیاز برای این فایل از جمله فرسایش‌پذیری بین‌شیاری، فرسایش‌پذیری شیاری، برش بحرانی و هدایت هیدرولیکی مؤثر با استفاده از فرمول‌های مدل محاسبه و وارد فایل خاک شدند.

در این تحقیق، مدل WEPP بر اساس پیش‌بینی رواناب و رسوب تک رخدادها مورد بررسی قرار گرفت. از این‌رو شرایط اولیه شبیه‌سازی در فایل مدیریت از اهمیت بالایی در برآوردها برخوردار هستند. غیر از شرایط اولیه، سایر فعالیت‌هایی که در طول سال در کرت‌های موردبررسی (به‌عنوان مثال چرا) صورت گرفته بود با توجه به تاریخ فعالیت در فایل مدیریت وارد گردید. شیب کرت‌های موردبررسی، از طریق شیب‌سنج در عرصه تعیین و به اسم هر کرت در قسمت شیب مدل ذخیره گردید.

با توجه به این‌که سعی شد تا بارندگی‌های ملایم، متوسط و شدید با بیش‌ترین شدت در اوایل، اواسط و اواخر بارندگی تا حد امکان در هر دو سری داده برای واسنجی و اعتبارسنجی وجود داشته باشد (Mati et al., 2006)، هشت رخداد در طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ برای واسنجی و مابقی (۱۶ رخداد) برای اعتبارسنجی به‌کار برده شد. ابتدا مدل WEPP دامنه، برای هر کدام از کرت‌ها با توجه به فایل‌های ساخته‌شده و با استفاده از ورودی‌های اولیه اجرا گردید. سپس با تغییر پارامترهای ورودی مؤثر بر رواناب و رسوب پیش‌بینی شده، حساسیت مدل نسبت به ورودی‌های مدل تعیین شد. با توجه به تجزیه حساسیت انجام شده، ابتدا واسنجی رواناب و سپس واسنجی رسوب صورت گرفت.

به صورت دستی نمونه‌برداری صورت گرفت. جهت تعیین حجم رواناب، ارتفاع رواناب جمع آوری شده در هر کرت با خط کش اندازه‌گیری و با توجه به مشخص بودن طول و عرض هر مخزن، حجم رواناب تعیین گردید. نمونه‌های جمع آوری شده از ۱۸ کرت به آزمایشگاه منتقل، با استفاده از کاغذ صافی، نمونه سوسپانسیون صاف و کاغذ صافی مرطوب حاوی رسوب به مدت ۲۴ ساعت در آن، خشک و توزین گردید. در نهایت با استفاده از حجم کل رواناب و رسوب جمع‌آوری‌شده در مخازن کرت‌ها، همچنین حجم نمونه برداشته شده و تعیین وزن رسوب در این حجم، وزن کل رسوب برای کرت‌ها تعیین شد.

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از هر کدام از دامنه‌های H1 تا H6 کرت‌های مورد بررسی از دو افق سطحی و زیرسطحی، نمونه‌های خاک تهیه گردید. همچنین تعدادی نمونه دست‌نخورده با استفاده از استوانه فلزی نمونه‌برداری برای تعیین جرم ویژه ظاهری تهیه شد. به‌دلیل سنگریزه‌ای بودن خاک‌های مورد بررسی، جزء سنگی به‌طور کامل جدا و توزین گردید. همچنین حجم جزء سنگی با قرار دادن جزء سنگی در ظروف مدرج محتوی آب و تعیین اختلاف حجم پس از اضافه کردن جزء سنگی تعیین شد. جهت تعیین توزیع اندازه ذرات و بافت خاک از روش هیدرومتر با قرائت ۲۴ ساعته استفاده گردید. پس از تعیین بافت نمونه‌ها با استفاده از سری الک، ذرات شن با قطرهای مختلف جدا گردیدند. جهت تعیین جرم ویژه ظاهری خاک، کربن آلی خاک، کربنات کلسیم معادل و ظرفیت تبادل کاتیونی از روش‌های معمول استفاده گردید (Sparks et al., 1996; Dane et al., 2002). نفوذپذیری خاک کرت‌های مورد مطالعه با استفاده از روش استوانه مضاعف اندازه‌گیری شد. نقاط مختلف منحنی رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده به کمک دستگاه صفحات فشاری تعیین گردیدند (Dane et al., 2002). جهت اندازه‌گیری درصد تاج پوشش، درصد پوشش زمین و درصد پوشش سنگی سطح از پلات‌های یک مترمربعی استفاده شد.

در طول این تحقیق پارامترهای موردنیاز مدل در سطح کرت‌ها در زمان‌های مختلف در طول سه سال مطالعه بررسی و در عرصه یا در آزمایشگاه تعیین شدند. اندازه‌گیری و تعیین تعدادی از پارامترهای ورودی مدل مشتمل بر فرسایش‌پذیری شیاری، فرسایش‌پذیری بین شیاری و برش بحرانی دشوار بوده، در نتیجه با استفاده از فرمول‌های خاصی که در کتابچه راهنمای مدل آمده محاسبه شدند (Flanagan and Nearing, 1995).

مقادیر Kr (فرسایش پذیری شیاری) و τc (تنش برشی بحرانی) با توجه به مقادیر اولیه محاسبه شده آنها ثابت نگه داشته شدند، سپس واسنجی با مقادیر K_i (فرسایش پذیری بین شیاری) صورت گرفت. برای به دست آوردن بهترین مقادیر پارامترهای آماری ارزیابی مدل، واسنجی تکمیلی با پارامترهای با حساسیت کم تر از جمله زبری اولیه انجام گردید تا تمامی پارامترهایی ارزیابی مدل (مشابه واسنجی رواناب) در دامنه قابل قبول قرار بگیرند.

بعد از مرحله واسنجی، از مابقی رخدادهای برای اعتبارسنجی پیش بینی های مدل استفاده گردید. جهت اعتبارسنجی و تعیین کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و رسوب دامنه های مورد بررسی از تعدادی پارامترهای آماری از جمله R^2 (مقدار بهینه = ۱)، EF^1 یا کارائی مدل (اگر مثبت باشد مشخص می کند که مدل، پیش بینی کننده بهتری از میانگین مقادیر اندازه گیری شده است، مقدار آرمانی = ۱) و CRM^2 (اگر مثبت باشد نشان دهنده کم برآورد کردن است) استفاده شد (Rosenmund et al., 2005):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن؛ S_i مقدار شبیه سازی شده، O_i مقدار مشاهده شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی دامنه های مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. خاک های منطقه مورد مطالعه در رده های انتی-سول و اینسپتی سول قرار دارند. عمق خاک سطحی در اغلب دامنه های مورد بررسی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ سانتی متر بود. خاک های افق سطحی دامنه های مورد مطالعه محتوی دامنه وسیعی از کربنات کلسیم معادل خاک (۵/۵ تا ۲۸ درصد) بودند. دامنه های مورد مطالعه شیب دار بوده (۳۱ تا ۴۲ درصد) که با مقادیر قابل توجهی جزء سنگی پوشیده شده اند (میانگین

در مرحله واسنجی تا حد امکان سعی شد مقادیر رواناب و هدررفت خاک شبیه سازی شده به مقادیر واقعی نزدیک باشند. جهت نیل به این هدف، تابع هدف اولیه، پارامتر آماری EF بوده که سعی شد در بالاترین مقدار ممکن خود قرار بگیرد. Moriasi et al. (۲۰۰۷) دامنه های قابل قبول توابع هدف را جهت ارزیابی مدل های هیدرولوژیکی به صورت $EF > 0.5$ ، $PBIAS$ $< 25\%$ (CRM $\times 100$) و نسبت $RMSE$ به SD مقادیر مشاهده-ای (RSR) کوچک تر از ۰/۷ ارائه دادند. سپس واسنجی سایر پارامترهای مؤثر بر رواناب و هدررفت خاک تا جایی ادامه پیدا کرد که تمامی توابع هدف در دامنه های قابل قبول خود قرار بگیرند. در این تحقیق، مقادیر قابل قبول این پارامترها در مرحله واسنجی به صورت $EF > 0.75$ ، $CRM < 0.1$ و $RSR < 0.5$ در نظر گرفته شدند. البته تا حد امکان سعی بر این شد تا مقادیر پارامترهای آماری EF و CRM به مقادیر بهینه خود نزدیک شوند ($EF=1$ و $CRM=0$).

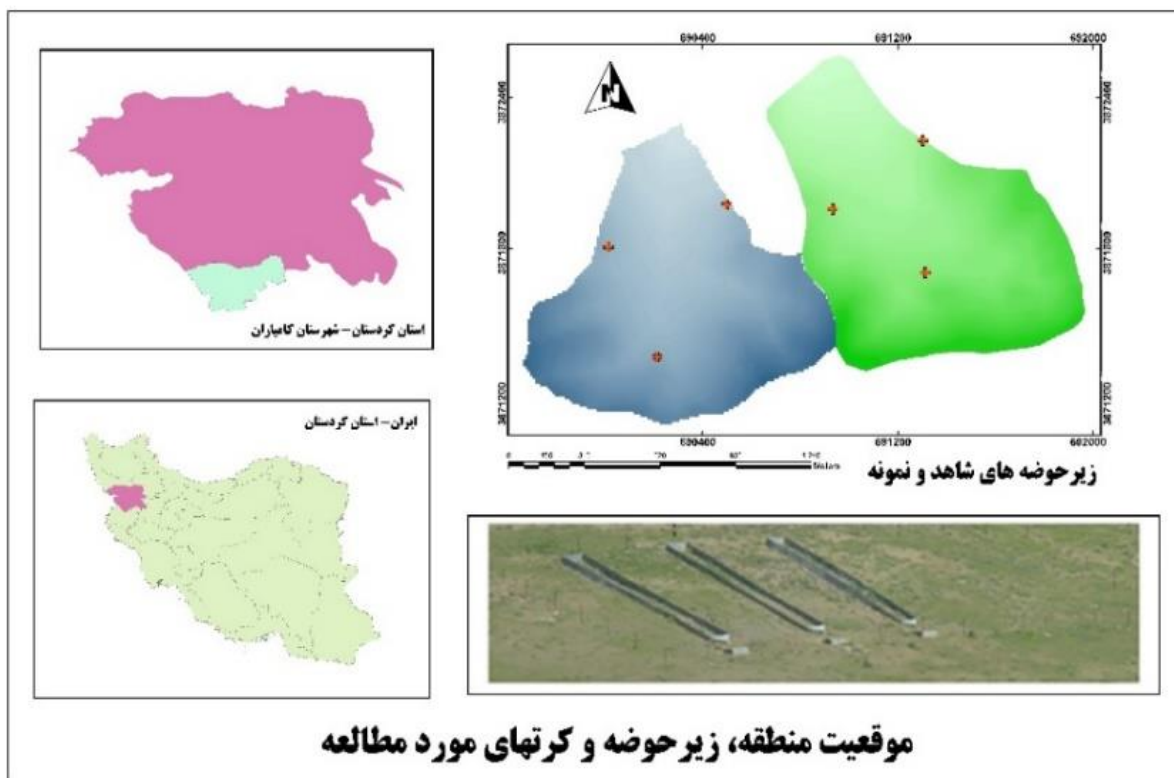
لذا، ابتدا با توجه به اجرای مدل بر اساس داده های اولیه و تجزیه حساسیت صورت گرفته و با توجه به نظر و توصیه پدیدآورندگان مدل در خصوص واسنجی برای تک رخداد (Flanagan et al., 2007; Flanagan and Frankenberger, 2012)، مدل برای هر رخداد در نظر گرفته شده برای واسنجی با مقادیر پایه ای هدایت هیدرولیکی مؤثر برای هر دامنه اجرا گردیده و مقادیر رواناب شبیه سازی شده ثبت گردید. سپس مقادیر پیش بینی و مشاهده شده برای تمامی دامنه ها با استفاده از پارامترهای آماری ارزیابی مدل مقایسه شدند. پارامتر K_{be} (هدایت هیدرولیکی مؤثر) عامل اصلی برای واسنجی رواناب پیش بینی شده توسط مدل بود (Flanagan and Frankenberger, 2012). برای تمامی رخدادهای مورد نظر برای واسنجی، برای هر دامنه، مقادیر هدایت هیدرولیکی مؤثر به دفعات مختلف تغییر داده شد تا پارامتر کارایی مدل (EF) به بالاترین مقدار خود برسد. سپس با توجه به حساسیت مدل نسبت به پارامترهای دیگر از جمله درصد جزء سنگی (البته با حساسیت خیلی کم تر)، این پارامترها تغییر داده شدند تا تمامی پارامترهای آماری مورد استفاده جهت واسنجی مدل (EF ، CRM و RSR) در دامنه قابل قبول خود قرار گیرند. آنگاه با توجه به مقادیر واسنجی شده برای رواناب، پارامترهای مؤثر در تولید رسوب واسنجی گردید.

با توجه به مطالعات دقیق عرصه ای و عدم وجود شیاری در طول کرت ها پس از وقوع رخدادهای مورد بررسی و غالب بودن فرسایش بین شیاری (ورقه ای) نسبت به فرسایش شیاری و با توجه به توصیه های Flanagan and Frankenberger (2012)،

¹. Modeling Efficiency
². Coefficient of Residual Mass

بیشتر بارندگی‌های رخ داده در دو ماه اول بهار و در دو ماه آخر سال‌های مورد مطالعه رخ داد. در طول این بارندگی‌ها، در هر بارندگی چند اوج با درجات متفاوتی از شدت و در زمان‌های مختلفی از بارندگی (ابتداء، اواسط و اواخر) وجود داشت.

۲۵ تا ۴۱ درصد). به سبب پوشش سنگی و همچنین جزء سنگی قابل توجه در داخل نیمرخ خاک، توزیع مکانی پوشش گیاهی از غیریکنواختی بیشتری برخوردار بود. ویژگی‌های ۲۴ رخداد مورد بررسی در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ در جدول (۲) آمده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، دامنه‌ها و کرت‌های فرسایشی در حوضه خامسان

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های دامنه‌های مورد بررسی

H6	H5	H4	H3	H2	H1	دامنه
لوم رسی	لوم رسی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی	لوم رسی	بافت خاک
۱/۵۲	۱/۳۹	۱/۳۰	۱/۳۴	۱/۲۹	۱/۵۲	میانگین جرم ویژه ظاهری افق سطحی و زیر سطحی (g cm^{-3})
۷/۱۵	۳/۰۱	۲/۲۳	۷/۰۰	۳/۳۴	۶/۷۴	میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در عرصه (cm h^{-1})
۱/۰۰	۱/۲۴	۱/۱۶	۱/۰۹	۱/۴۸	۰/۹۲	کربن آلی (%)
۲۰/۰۰	۵/۵۰	۲۸/۰۰	۲۱/۵۱	۱۴/۴۷	۲۵/۱۱	کربنات کلسیم معادل (%)
۲۸/۶۶	۲۷/۵۷	۲۵/۴۴	۳۰/۳۴	۲۶/۵۶	۲۳/۹۴	ظرفیت تبادل کاتیونی ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$)
۳۱	۳۲	۴۱	۳۲	۴۲	۳۱	شیب (%)
E	N	NW	E	N	W	جهت شیب
۴۰	۲۴	۲۸	۳۴	۲۵	۳۹	ذرات با قطر بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر (%v/v)
۴۱	۳۰	۴۰	۳۸	۲۵	۲۸	میانگین پوشش جزء سنگی (%)

جدول ۲. ویژگی‌های بارندگی‌های مورد بررسی در طول سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲

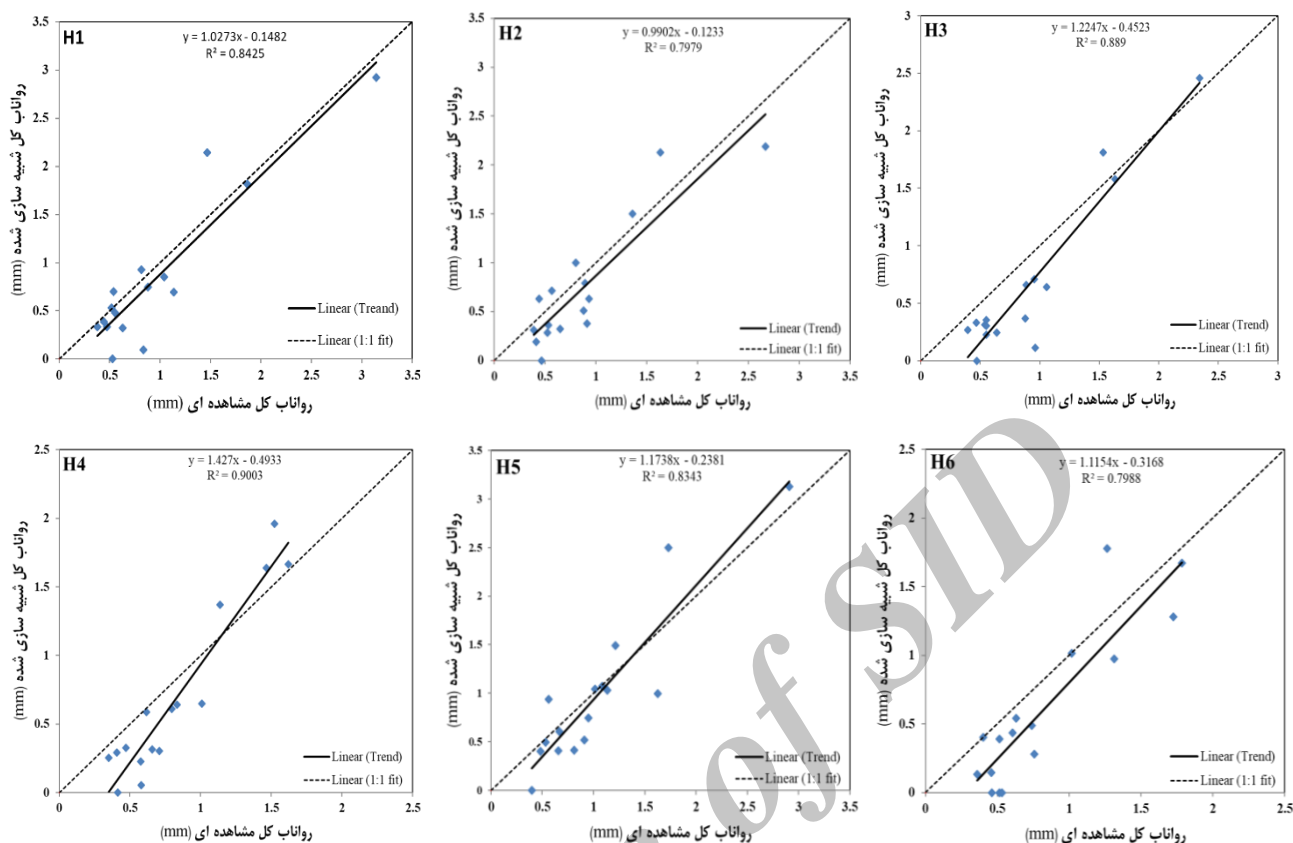
تاریخ	ارتفاع بارندگی (mm)	حداکثر شدت بارندگی (mm h ⁻¹)	انرژی کل بارندگی (MJ ha ⁻¹)	تاریخ	ارتفاع بارندگی (mm)	حداکثر شدت بارندگی (mm h ⁻¹)	انرژی کل بارندگی (MJ ha ⁻¹)
۱۳۸۹				۱۳۹۱			
۱۵ دی	۹/۳۵	۶/۲۴	۱/۰۶	۱۱ فروردین	۱۲/۱۰	۵/۴	۱/۲۴
۱۸ اسفند	۱۸/۷۲	۷/۳۲	۲/۱۸	۲۴ فروردین	۱۸/۰۳	۴/۰۸	۱/۸۲
				۶ آبان	۹/۳۸	۹/۷۲	۱/۲۲
				۲۳ آبان	۴۶/۸۸	۳۵/۷۶	۷/۱۴
۱۳۹۰				۲۹ آبان	۱۲/۸۳	۴/۲	۱/۲۳
۱۶ فروردین	۱۴/۲۹	۶/۹۶	۱/۶۸	۵ آذر	۱۰/۵۶	۵/۷۶	۱/۱۰
۲۳ فروردین	۱۰/۶	۹/۲۴	۱/۳۳	۱ دی	۲۷/۷۵	۵/۲۸	۲/۹۵
۳۱ فروردین	۲۰/۱۸	۷/۶۸	۲/۳۶	۱۳۹۲			
۵ اردیبهشت	۱۷/۹۹	۱۴/۲۸	۲/۲۱	۱۶ فروردین	۱۵/۰۴	۱۱/۷۶	۲/۱۲
۱۱ اردیبهشت	۲۱/۸۶	۱۲/۷۲	۲/۹۲	۱۸ اردیبهشت	۱۰/۳۳	۸/۵۲	۱/۲۵
۲۹ اردیبهشت	۱۶/۶۲	۱۹/۲	۲/۷۰	۳۱ اردیبهشت	۱۱/۳۵	۷/۹۲	۱/۳۲
۷ آبان	۷۲/۹۶	۹/۴۸	۹/۴۶	۱۱ آبان	۲۶/۲۰	۶/۶	۲/۸۷
۱۴ آبان	۱۷/۱۴	۱۱/۲۸	۲/۱۴	۱۷ آبان	۲۷/۹۸	۱۱/۵۲	۳/۵۰
۲۹ آبان	۴۵/۷۶	۸/۴	۵/۷۸	۱۴ آذر	۴۴/۲۷	۱۱/۶۴	۵/۳۰

دامنه WEPP را با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو مکان مختلف مقایسه کردند. به‌طور کلی مدل دامنه WEPP رواناب رخدادها را کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برای تمام سامانه‌های مدیریتی شبیه‌سازی کرد.

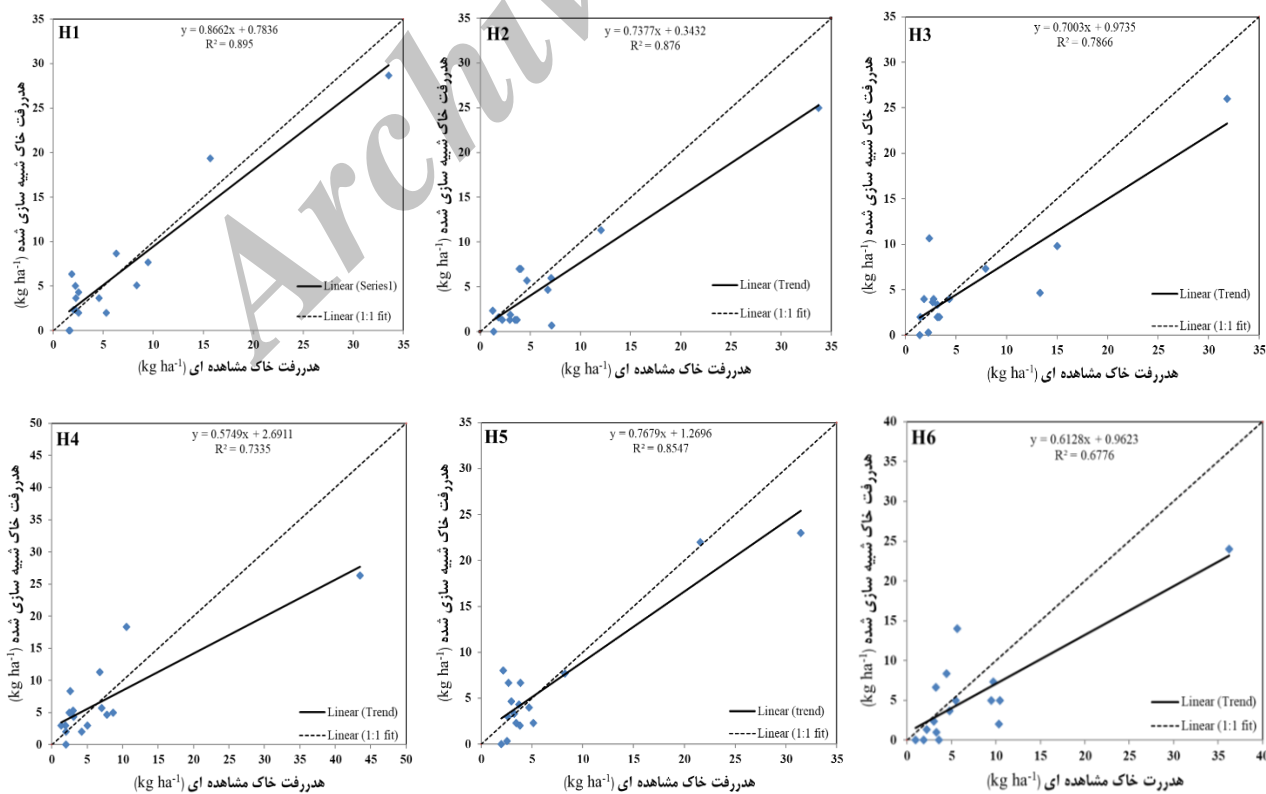
به‌طور کلی بر طبق شکل‌های (۲ و ۳) و پارامترهای آماری جدول (۳)، رواناب و هدررفت خاک شبیه‌سازی شده در دامنه‌های ۱، ۲ و ۵ نسبت به دامنه‌های ۳، ۴ و ۶ بهتر شبیه‌سازی شده است. مشخصات دامنه‌های مورد بررسی در جدول (۲) نشان می‌دهد که دامنه‌های H3، H4 و H6 دارای مقادیر قابل توجهی از سنگریزه و سنگ در نیمرخ خاک (به ترتیب ۳۴، ۲۸ و ۴۰ درصد)، همچنین پوشش سنگی سطحی قابل توجهی (به ترتیب ۳۸، ۴۰ و ۴۱ درصد) بودند. تأثیر قطعات سنگی سطح و داخل نیمرخ خاک بر روی نفوذ (Van Wesemael *et al.*, 1995) و عدم در نظر گرفتن آن به میزان لازم در مدل، می‌تواند یکی از دلایل کارایی کم‌تر مدل برای این دامنه‌ها باشد. اگرچه تأثیر جزء سنگی عمدتاً در قالب دو پارامتر در مدل وارد می‌شود (حجم جزء سنگی در نیمرخ خاک و دیگری جزء سنگ سطحی که در قالب یکی از اجزای پوشش شیاری و بین‌شیاری به مدل وارد می‌شود)، اما این نتایج نشان می‌دهد که تأثیر مقادیر بالای جزء سنگی مخصوصاً پوشش سنگی برای تمامی دامنه‌ها بر فرآیندهای تولید رواناب و رسوب هنوز به‌طور کامل در مدل در نظر گرفته نشده است.

مقایسه بین مقادیر رواناب و هدررفت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهده شده هرکدام از دامنه‌های مورد بررسی در شکل‌های (۲ و ۳) آمده است. شاخص‌های آماری بررسی کارایی مدل برای برآورد رواناب و هدررفت خاک در جدول (۳) ارائه شده‌اند. بررسی کلی بین مقادیر رواناب و خاک شبیه‌سازی و مشاهده شده به‌طور همزمان در تمامی دامنه‌ها نیز در شکل (۴) آمده است. شکل‌های (۲ و ۴) و شاخص EF در جدول (۳) نشان می‌دهد که رواناب به میزان نسبتاً خوبی تخمین زده شده است. بررسی شکل‌های (۳ و ۴) و همچنین ضریب تعیین (R^2) و پارامتر کارایی مدل (EF) در جدول (۳) نشان می‌دهد که هدررفت خاک نیز به خوبی در تمامی دامنه‌ها شبیه‌سازی شده و کارایی مدل در برآورد هدررفت خاک تا حدودی بهتر از رواناب کل بود.

Pudasaini *et al.* (2004) نیز با بررسی فرسایش از کرت-های آزمایشی فرسایش (با شرایط مختلف خاک) نشان دادند که مدل WEPP می‌تواند به‌طور مؤثری فرسایش خاک تک رخدادها را پیش‌بینی کند. البته با وجود نتایج خوب مدل در پیش‌بینی رواناب و رسوب، مدل مقادیر رواناب و هدررفت خاک را کم برآورد نموده است. Gronsten and Lundekvam (2006) نیز رواناب سطحی و هدررفت خاک را با به‌کار بردن مدل دامنه WEPP در سطح کرت پیش‌بینی کرده و رواناب سطحی و هدررفت خاک سالانه و روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل



شکل ۲. رگرسیون خطی بین مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده



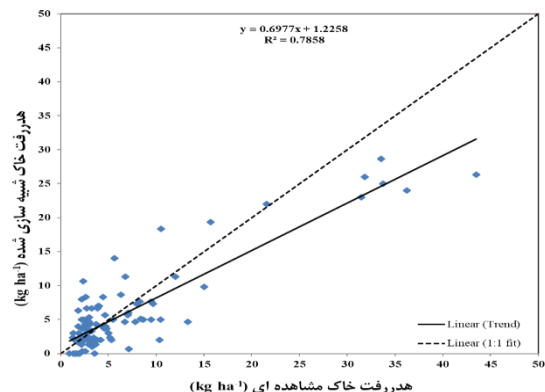
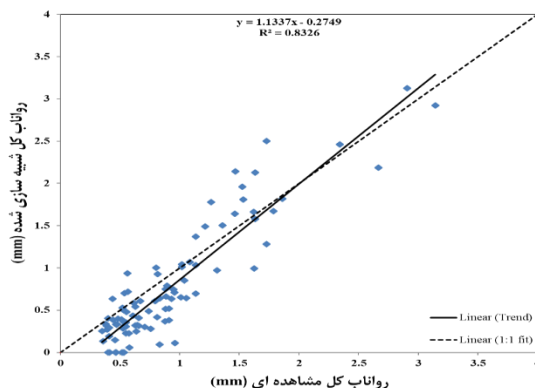
شکل ۳. رگرسیون خطی بین مقادیر هدررفت خاک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

جدول ۳. شاخص‌های آماری بررسی همبستگی بین مقادیر رواناب و هدررفت خاک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

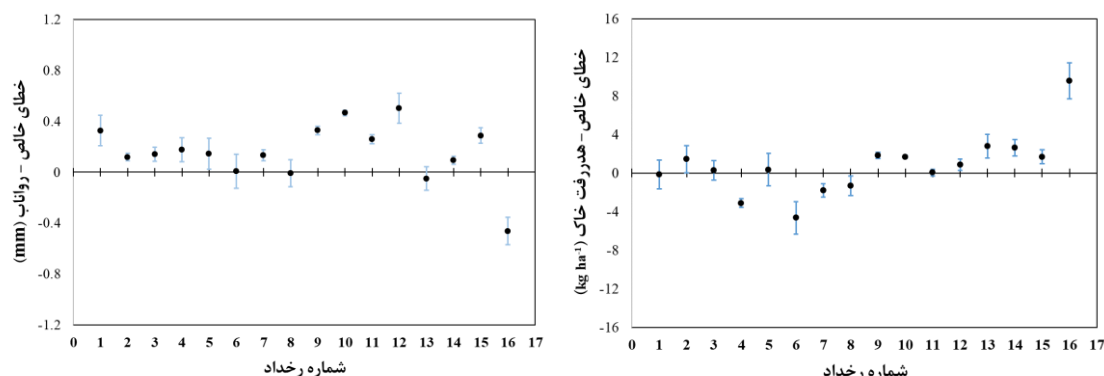
دامنه	H1	H2	H3	H4	H5	H6	تمامی دامنه‌ها
رواناب							
R ²	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۸۳	۰/۸۰	۰/۸۳
EF	۰/۷۷	۰/۷۰	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۶۹	۰/۴۳	۰/۶۵
CRM	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۲۷	۰/۱۷
هدررفت خاک							
R ²	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۸۵	۰/۶۸	۰/۷۹
EF	۰/۸۹	۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۷۷
CRM	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۱۱

تخمین‌های مدل در برآورد رواناب و هدررفت خاک همراه با بررسی خصوصیات بارندگی‌های مورد بررسی نشان داد، هرچه تغییرات شدت بارندگی در هر رخداد کم‌تر و یکنواختی بارندگی بیش‌تر باشد، همچنین تعداد کم‌تر اوج‌های شدت در هر بارندگی، سبب برآوردهای بهتری توسط مدل در برآورد رواناب کل و هدررفت خاک شده است. در واقع تغییرات شدت بارندگی در داخل بارندگی و نحوه توزیع این شدت تأثیر قابل توجهی بر روی تولید رواناب و رسوب دارد. فرآیندهای فرسایش خاک در طول هر رخداد به میزان خیلی زیادی تحت تأثیر تغییرات بارندگی درون هر رخداد قرار می‌گیرد (Parsons and Stone, 2006). الگوهای هر رخداد یا به عبارتی توزیع شدت در طول هر رخداد تأثیرات معنی‌داری بر روی نفوذ، رواناب و هدررفت خاک دارد (Flanagan et al., 1988; Dunkerley, 2012). در مدل WEPP صرفاً بخشی از ویژگی‌های یک بارندگی مشتمل بر مقدار بارندگی، مدت زمان بارندگی، حداکثر شدت بارندگی و زمان وقوع حداکثر شدت وارد می‌شود. در واقع دیگر تغییرات در طول یک بارندگی که ممکن است تأثیر به‌سزایی بر مقدار رواناب و رسوب داشته باشد به‌عنوان مثال وجود چندین اوج شدت در طول بارندگی (در صورت وجود)، در نظر گرفته نمی‌شود.

بررسی ویژگی‌های دامنه‌هایی که مدل WEPP کارایی کم‌تری در برآورد رواناب و رسوب نسبت به دامنه‌های دیگر داشته، نشان می‌دهد که علاوه بر تأثیر ویژگی‌های دامنه‌های مورد بررسی بر تخمین‌های مدل، ویژگی‌های بارندگی‌ها نیز به نظر می‌رسد تأثیر زیادی بر تولید رواناب و رسوب و تخمین‌های مدل‌های مورد بررسی داشته باشد (شکل ۵). بررسی بارندگی‌های رخ داده در طول سه سال مورد بررسی نشان داد که در طول این بارندگی‌ها چند اوج شدت با درجات مختلفی از شدت وجود داشت. همچنین در بارندگی‌های مختلف، نحوه توزیع این اوج‌های شدت متفاوت بوده و این عامل خود می‌تواند تأثیر بسزایی بر میزان رواناب و رسوب تولیدی هر رخداد (علاوه بر ویژگی‌های کرت‌های مورد بررسی) داشته باشد. به‌عنوان مثال در بارندگی ۱۴ آذر ۱۳۹۲ (رخداد شماره ۱۶، شکل ۵) چندین اوج شدت با شدت‌های نزدیک به هم در اواخر بارندگی وجود داشته و از آنجا که فقط بلندترین اوج شدت و زمان وقوع آن به مدل وارد می‌شود، تأثیر اوج‌های دیگر شدت که می‌توانند تأثیر به‌سزایی بر تولید رواناب و رسوب داشته باشند، نادیده گرفته می‌شود و به‌نظر می‌رسد همین امر یکی از دلایل خطای زیاد مدل در برآورد رواناب و رسوب در این رخداد باشد. نتایج



شکل ۴. رگرسیون خطی بین مقادیر رواناب و هدررفت خاک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در تمامی کرت‌های مورد بررسی



شکل ۵. خطای خالی رواناب و هدررفت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل WEPP در همه دامنه‌های مورد مطالعه (خطوط بسته مشخص‌کننده خطای استاندارد میانگین‌ها است)

که تأثیر مقادیر بالای جزء سنگی به‌ویژه پوشش سنگی بر فرآیندهای تولید رواناب و رسوب، همچنین تأثیر مقادیر زیاد آهک بر ویژگی‌های خاک و فرسایش‌پذیری هنوز به‌طور کامل در مدل در نظر گرفته و فرموله نشده است. بر اساس نتایج تخمین‌ها در بارندگی‌های مختلف و بررسی تغییرات درونی شدت در طول هر بارندگی، به نظر می‌رسد به دلیل تغییرات شدت بارندگی در طول هر رخداد و پیچیدگی فرآیندهای جداسازی و انتقال رسوب در طی این رخدادها، تأثیر الگوی هر بارندگی به‌طور کامل در مدل لحاظ نشده است. با توجه به نتایج تخمین‌های رواناب و رسوب توسط مدل، تحقیقات بیش‌تری در خصوص تأثیر پارامترهای جزء سنگی (به‌ویژه پوشش سنگی)، آهک و تأثیر الگوی هر بارندگی بر خروجی‌های مدل و اعمال این تأثیرات در پیش‌بینی رواناب و رسوب تک رخدادها توسط مدل WEPP موردنیاز است.

به نظر می‌رسد به دلیل تغییرات شدت بارندگی در طول هر رخداد و پیچیدگی فرآیندهای جداسازی و انتقال رسوب در طی این رخدادها و این شرایط، فهم و درک و اطلاعات ما از این فرآیندها هنوز برای توسعه مدل‌هایی (مثل WEPP برای تک رخداد) که این تأثیرات بر روی فرسایش و رسوب را در نظر گرفته و پیش‌بینی کنند ناکافی می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

کارایی مدل WEPP در برآورد رواناب و رسوب ناشی از رخدادهای طبیعی در سطح کرت در بخش‌های مرتعی دارای مقادیر قابل توجهی جزء سنگی در حوضه خامسان کردستان مورد بررسی قرار گرفت. مدل WEPP بعد از واسنجی توانست به میزان قابل قبولی رواناب و هدررفت ناشی از رخدادهای طبیعی را در دامنه‌های مرتعی حوضه مورد مطالعه پیش‌بینی نموده و برآوردهای رسوب تا حدودی بهتر از رواناب بود. نتایج نشان داد

REFERENCES

- Angassa, A. (2014). Effects of grazing intensity and bush encroachment on herbaceous species and rangeland condition in Southern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 25, 438–451.
- Anonymous. (2012). Report of Khamesan reagents and paired watershed. Forest, Range and Watershed Organization of Kurdistan Province. (In Farsi)
- Asadi, H., Rouhipour, H., and Refahi, H.Gh. (2007). An evaluation of WEPP model for interrill soil erosion. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 38(4), 553-562. (In Farsi)
- Bacchi, O.O.S., Reichardt, K., and Sparovek, G. (2003). Sediment spatial distribution evaluated by three methods and its relation to some soil properties. *Soil and Tillage Research*, 69, 117–125.
- Baffaut, C., Nearing, M.A., Ascough, J.C., and Liu, B.Y. (1997). The WEPP watershed model: II. Sensitivity analysis and discretization on small watersheds. *Transactions of the ASAE*, 40(4), 935–943.
- Baigorria, G.A., and Romero, C.C. (2007). Assessment of erosion hotspots in a watershed: integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1175–1183.
- Bravo-Espinosa, M., Mendoza, M.E., Carlón Allende, T., Medina, L., Sáenz-Reyes, J. T., and Páez, R. (2014). Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the trans- 25 mexican volcanic system, Mexico. *Land Degradation & Development*, 25, 452–467.
- Dane, H., Topp, G., and Warren, A. (2002). Methods of Soil Analysis Part-4 Physical Methods: SSSA Book Series-5. *Soil Science Society of America*.
- Dunkerley, D., (2012). Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. *Hydrological Processes*, 26, 2211–2224.

- Flanagan, D. C., and Nearing, M.A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Flanagan, D., Foster, G., and Moldenhauer, W. (1988). Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion. *Transactions of the ASAE*, 31(2), 414-420.
- Flanagan, D.C., and Frankenberger, J.R. (2012). WEPP: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1463-1477.
- Flanagan, D.C., Gilley, J.E., and Franti, T.G. (2007). Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities and Future Enhancements. *Transactions of the ASABE*, 50, 1603-1612.
- García-Ruiz, J. M., and Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140, 317-338.
- Gronsten, H.A., and Lundekvam, H. (2006). Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope Model. *Soil and Tillage Research*, 85(1-2), 186-199.
- Herrick, J.E., Van Zee, J.W., Belnap, J., Johansen, J.R., and Remmenga, M. (2010). Fine gravel controls hydrologic and erodibility responses to trampling disturbance for coarse-textured soils with weak cyanobacterial crusts. *Catena*, 83, 119-126.
- Jetten, V., Govers, G., and Hessel, R. (2003). Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17, 887-900.
- Katra, I., Lavee, H., and Sarah, P. (2008). The effect of rock fragment size and position on topsoil moisture on arid and semi-arid hillslopes. *Catena*, 72, 49-55.
- Lin, C., Lin, W., and Chou, W. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: The Taiwan experience. *Soil and Tillage Research*, 68, 143-152.
- Mahmoodabadi, M., and Cerdà, A. (2013). WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*, 204-205, 75-83.
- Mahmoodabadi, M., Refahi, H.G.H., and Rouhipour, H. (2013). Evaluation of the WEPP process-based model in predicting interrill erosion rate using rainfall simulator. *Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Sciences)*, 27(1), 23-34. (In Farsi)
- Mati, B.M., Morgan, R.P.C., and Quanton, J.N. (2006). Soil erosion modelling with EUROSEM at Embori and Mukogodo catchments, Kenya. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 579-588.
- Mayor, A.G., Bautista, S., and Bellot, J. (2009). Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1702-1711.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., and Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W. Van, Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.
- Nearing, M. A., Govers, G., and Norton, L.D. (1999). Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Science Society of American Journal*, 63, 1829-1835.
- Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., and Billib, M. (2008). Runoff and sediment yield modelling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *Journal of Hydrology*, 348, 305-319.
- Parsons, A.J., and Stone, P.M. (2006). Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67, 68-78
- Pieri, L., Bittelli, M., Wu, J.Q., Dun, S., Flanagan, D.C., Pisa, P.R., Ventura, F., and Salvatorelli, F. (2007). Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology*, 336, 84-97
- Poesen, J., and Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23, 1-28.
- Poesen, J.W., Torri, D., and Bunte, K. (1994). Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena*, 23, 141-166.
- Pudasaini, M., Shrestha, S., and Riley, S. (2004). Application of Water Erosion Prediction Project (WEPP) to estimate soil erosion from single storm rainfall events from construction sites. 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 5-9 December 2004, *Symposium 16: Water Quality and Soil Management*.
- Renschler, C.S., and Harbor, J. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47, 189-209.
- Rosenmund, A., Confalonieri, R., Roggero, P.P., Toderi, M., and Acutis, M. (2005). Evaluation of the EUROSEM model for simulating erosion in hilly areas of central Italy. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 10, 15-23.
- Shen, Z., Gong, Y., Li, Y., and Liu, R. (2010). Analysis and modeling of soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir Area in China. *Catena*, 81, 2.104-112.
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., and Liu, R.M. (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, 96, 1435-1442
- Singh, R.K., Panda, R.K., Satapathy, R.K., and

- Ngachan, S. V. (2011). Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model. *Journal of Hydrology*, 405, 261–276.
- Soto, B.B., and Díaz-Fierros, F. (1998). Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena*, 31, 257–270
- Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., and Sumner, M.E. (1996). Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*.
- Vaezi, A.R., Sadeghi, S.H.R., Bahrami, H.A., and Mahdian, M.H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97, 414–423.
- Valentin, C., and Casenave, A. (1992). Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Science Society of American Journal*, 56, 1667–1673.
- Van Wesemael, B., Poesen, J., and de Figueiredo, T. (1995). Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall. *Soil and Tillage Research*, 33, 229–250.
- Zavala, L.M., Jordan, A., Bellinfante, N., and GIL, J. (2010). Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56: 95–104
- Zhang, X.C., Nearing, M.A., Risse, L.M., and McGregor, K.C. (1996). Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the ASAE*, 39, 855–863.

Archive of SID