

مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۱۹

ص ۵۱۳-۵۰۱

قابلیت زیرمدل دامنه WEPP در پیش‌بینی دینامیک رواناب و فرسایش خاک در چند تیپ مرتعی نیمه‌خشک

- ❖ یحیی پرویزی*؛ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه
- ❖ محمد قیطوری؛ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه
- ❖ مسیب حشمتی؛ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه

چکیده

مدل فیزیکی WEPP رواناب و فرسایش خاک را به کمک مفاهیم فیزیکی فرسایش و هیدرولیک جریان و ملاحظه متغیرهای رشد گیاه، تجزیه بقایا، و فرایندهای زمستانه به صورت پویا شبیه‌سازی می‌کند. هدف این مقاله تعیین قابلیت این مدل در تخمین فرسایش و رواناب در چند تیپ مرتعی و بررسی اثر مدیریت در آن است. این طرح در محدوده کبوده علیا در حوضه آبخیز قره‌سو با نصب پلات‌های فرسایش به ابعاد 10×3 متر با ۳ تکرار در سه تیپ مرتعی در شیب‌های ۲۵، ۳۵، و ۴۵ درصد اجرا شد. داده‌های اقلیمی بارندگی و دما در داخل ایستگاه ثبت شد و سایر اطلاعات اقلیمی نظیر سرعت و جهت باد، تشعشع، و حرارت نقطه شبنم از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تهیه گردید. شبیه‌سازی فرسایش و رواناب به صورت تک‌واقع با استفاده از نسخه ۷2008.9 مدل در هر پلات انجام شد. ارزیابی نتایج مدل در برآورد رواناب بیشترین دقت مدل را در شیب ۴۵ درصد نشان داد. همچنین، در شیب ۲۵ و ۳۵ درصد مدل با خطای نسبی متوسط 0.61 لیتر رواناب را برآورد می‌نمود. در مجموع، کارایی مدل در برآورد رواناب در هر سه شیب خوب بود و ضریب کارایی ناش- ساتکلیف بین 0.69 تا 0.73 متغیر بود. کمترین و بیشترین خطای برآورد فرسایش خاک به ترتیب در شیب‌های ۳۵ و ۴۵ درصد بود. مدل در برآورد فرسایش در همه شیب‌ها کم‌برآوردی از خود نشان داد. همچنین، مقادیر منفی شاخص ناش- ساتکلیف مؤید کارایی پایین مدل در برآورد فرسایش به‌ویژه در شرایط حاکم بر دو شیب ۲۵ و ۳۵ درصد بود.

واژگان کلیدی: رواناب، فرسایش، کارایی مدل، کاربری مرتع، WEPP.

مقدمه

بررسی‌ها مربوط به پژوهشی است که کارایی نسخه پایه مدل WEPP را در پیش‌بینی تولید رواناب و فرسایش خاک در پلات‌های ۳/۰۵×۱۰/۶۷ متر در اراضی مرتعی با مدیریت‌های رایج مرتعی امریکا ارزیابی کردند [۱۹]. آن‌ها همبستگی معنی‌داری بین نوع مدیریت و دقت پیش‌بینی فرسایش مدل WEPP به‌دست آوردند، ولی بین مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده همبستگی ضعیفی وجود داشت. در تحقیق دیگری، کارایی نسخه پایه مدل WEPP در پلات‌های آزمایشی ۱۰×۴ متر در شیب‌های ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ درصد به صورت تکررگار ارزیابی شد [۳]. نتایج نشان داد که مدل WEPP در مقادیر رواناب بالاتر از یک میلی‌متر عمق و تلفات خاک بیش از ۰/۱ تن در هکتار به‌خوبی و با دقت بالایی رواناب و رسوب را تخمین می‌زند.

در تحقیق دیگری، قابلیت مدل WEPP را در برآورد رسوب با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از پلات‌های ۳×۱۰/۷ متر ارزیابی کردند و رابطه معنی‌داری با $R^2 = ۰/۶$ بین مقادیر محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده رسوب به‌دست آوردند [۱۵]. در تحقیق مشابه دیگری، گیدی و همکاران [۱۰] کارایی نسخه آبخیز این مدل را در پیش‌بینی فرسایش در یک حوضه آبخیز کوچک ۵/۶ هکتاری برای ده رگبارش تند ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که این مدل مقادیر رواناب و تلفات خاک را بین ۱۰/۴ تا ۴۴/۹ درصد بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. کارایی مدل اصلاح‌شده WEPP در پیش‌بینی رواناب در یک حوضه جنگلی ارزیابی شد [۱۸]. نتایج بررسی آن‌ها با ضریب کارایی ناش-ساتکلیف بین ۰/۵ و ۰/۸۵ و با مقدار متوسط ۰/۶۷ صحت پیش‌بینی‌های مدل را نشان می‌داد. با این حال، مدل در برآورد رواناب با انحراف ۹ درصدی از متوسط به صورت کم‌برآورد پیش‌بینی می‌نمود. همچنین، مدل در برخی سال‌ها

امروزه، فناوری پیش‌بینی و مدل‌سازی فرسایش خاک، به عنوان ابزاری ارزشمند، در طراحی حفاظتی، طرح‌های مهندسی، و توسعه تحقیقات فرسایش به‌کار برده می‌شود. مدل WEPP یک مدل ریاضی است که به شکل پیوسته پراکندگی مکانی و زمانی تلفات خاک و ته‌نشست رسوب، رواناب، رشد گیاه، و تجزیه بقایا را با استفاده از مفاهیم فیزیکی، به صورت دینامیک، روندیابی و پیش‌بینی می‌کند. اجزای مدل عبارت‌اند از مولد اقلیم؛ جزء هیدرولوژی دامنه؛ هیدرولوژی زمستان؛ جزء خاک؛ جزء رشد گیاه؛ جزء مدیریت و تجزیه بقایا؛ جزء هیدرولیک جریان سطحی؛ جزء فرسایش؛ و جزء آبیاری [۶]. برای محاسبه رواناب در جزء هیدرولوژی مدل WEPP، عناصر هیدرولوژی سطحی دامنه، بیلان آب، و فرونشست عمقی و هیدرولوژی زیرسطحی تحلیل می‌شود. توالی محاسباتی در هیدرولوژی سطحی دامنه به ترتیب تعیین مقدار نفوذ، توزیع بارندگی مازاد، ذخیره چالابی، هیدروگراف رواناب، و، در نهایت، بده اوج است. برای محاسبه فرسایش در مدل WEPP فرایندهای فرسایش شیاری، بین‌شیاری، و فرسایش کانال در جزء فرسایش شبیه‌سازی می‌شود. در شیاری و کانال تنش برشی هیدرولیک جریان متمرکز، ظرفیت انتقال، و بار رسوب جریان محاسبه می‌شود. فرایندهای حاکم در عرصه بین شیاری برخورد قطرات باران و اثر جریان سطحی نازک است. در مدل‌های فرایندی از جمله WEPP مدل بقای جرم به‌کاررفته معادله غیرماندگار پیوستگی رسوب است که توزیع مکانی و زمانی بار رسوب در جریان را تبیین می‌کند [۷، ۸].

برای ارزیابی کارایی مدل WEPP تحقیقات نسبتاً زیادی در سطح دنیا انجام شده است. نخستین

شبهه‌ساز باران پرداختند [۲]. آنان دریافتند که مدل تمایل به بیش‌برآورد مقادیر کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ فرسایش خاک دارد. احمدی و همکاران [۱] به بررسی کارایی مدل WEPP در برآورد فرسایش و رسوب ویژه حوضه آبخیز باراریه نیشابور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسخه دامنه مدل با برآورد ۸٫۵۲ تن در هکتار رسوب ویژه به مقدار واقعی ۱۱٫۲ تن در هکتار نسبت به دیگر نسخه‌های مدل برآورد نزدیک‌تری داشت. داده‌های حاصل از تحقیق آنان نتوانست کارایی مدل را در برآورد فرسایش ارزیابی کند. همچنین، آن‌ها نتوانستند با شاخص‌های کمی کارایی مدل را ارزیابی کنند. بررسی‌های علمی انجام‌شده در کشور محدود به یک سری تحقیقات موردی بوده و تا کنون به منظور بررسی کارایی این مدل با استفاده از داده‌های پلات‌های آزمایشی استاندارد مدل تحقیقی انجام نشده است. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق تعیین قابلیت نسخه دامنه مدل WEPP در تخمین تلفات خاک و میزان رواناب است.

روش‌شناسی

این طرح در محدوده مرتعی کبوده علیا در ۵ کیلومتری جنوب شرق کرمانشاه و در حوضه آبخیز قره‌سو، که یکی از سرشاخه‌های اصلی کرخه است، انجام شد. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۴۷۰ میلی‌متر است با اقلیم نیمه‌خشک سرد، و ارتفاع از سطح دریا ۱۵۵۰ متر است. خاک دامنه‌ها در رده‌بندی امریکایی از رده انتی‌سول و زیررده اورتنت است و دارای رژیم حرارتی مزیک و رژیم رطوبتی زیریک است. سازندهای این ناحیه عمدتاً شامل سازند کرمانشاه، سروک، ایلام، و سازند زاگرس رورانده، که حاوی رادیولاریت است، است. داده‌های اقلیمی از قبیل دما و بارندگی با نصب

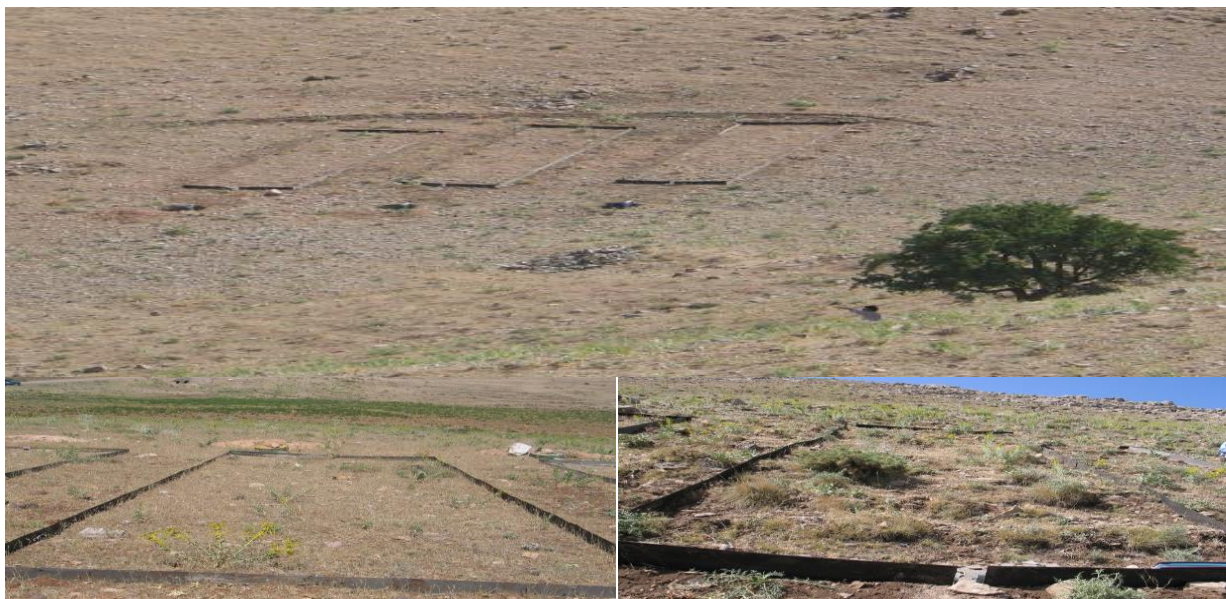
مقدار پیک رواناب را به صورت بیش‌برآورد و در برخی سال‌ها به صورت کم‌برآورد پیش‌بینی می‌نمود. لافلن و همکاران [۱۴] در یک بررسی اجمالی و با استفاده از مجموع ۱۵۹۴ داده از پلات‌های رواناب و رسوب نیکویی برازش پیش‌بینی فرسایش مدل WEPP را ارزیابی کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که مدل در طیف گسترده‌ای از شرایط مدیریتی به‌ویژه در مقیاس حوضه‌های کوچک قادر به شبیه‌سازی فرسایش و رسوب است.

محقق دیگری به ارزیابی کارایی مدل WEPP در پیش‌بینی تغییرات رواناب و فرسایش در جاده‌های جنگلی با استفاده از پلات‌های آزمایشی پرداخت [۱۱]. داده‌های مورد استفاده شامل ۸ واقعه بارندگی طی دو سال آزمایش بود. نتایج تحقیقات وی حاکی از مقداری بیش‌برآورد در تخمین فرسایش و رواناب توسط مدل بوده است. ضریب کارایی ناش-ساتکلیف در پیش‌بینی فرسایش بین ۰٫۷۳ و ۰٫۹۲ و در پیش‌بینی رواناب بین ۰٫۳۲ تا ۰٫۵۷ متغیر بود. دان و همکاران [۵] به بررسی کارایی نسخه اصلاح‌شده مدل WEPP و مقایسه آن با نسخه اولیه در برآورد فرسایش و رواناب در کاربری جنگل در امریکا پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان از برآورد رواناب به میزان ۲۶۲ میلی‌متر در سال توسط نسخه اصلاح‌شده بود که همخوانی بسیار زیادی با مقدار ۲۷۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده داشت. ضمناً ضریب کارایی ناش-ساتکلیف نیز برای شبیه‌سازی روزانه و پیوسته یا فصلی به ترتیب ۰٫۴۵ و ۰٫۵۷ بود.

نکته حائز اهمیت در کشور ما خلأ تحقیقاتی جدی در خصوص امکان‌سنجی کاربرد مدل‌های فیزیکی و فرایندی در پیش‌بینی دینامیک تولید رواناب و فرسایش خاک به‌ویژه در کاربری مرتعی است. در مطالعه‌ای به بررسی آزمایشگاهی کارایی مدل در برآورد فرسایش بین شیاری با استفاده از

باران‌نگار و دماسنج ماکزیمم و مینیمم ثابت در منطقه طرح به صورت روزانه ثبت گردید. سایر اطلاعات اقلیمی از جمله سرعت و جهت باد و تشعشع خورشیدی و درجه حرارت نقطه شبنم از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، که به فاصله ۵ کیلومتری محل قرار دارد، تهیه شد. پلات‌های آزمایشی جمع‌آوری رواناب و رسوب به ابعاد ۱۰×۳ متر مربع با ۳ تکرار در شیب‌های ۲۵، ۳۵، و ۴۵ درصد انتخاب شد- که

بیشترین فراوانی را در میان مراتع حوضه قره‌سو داشتند- و نصب شد. شکل شیب پلات‌ها یکنواخت و حتی‌الامکان فاقد تقعر و تحدب بود و در جهت‌های شمالی و غربی پراکنده بودند. جدول ۱ مشخصات پلات‌ها را نشان می‌دهد. مدیریت غالب در پلات‌ها به صورت قرق برای پلات‌های شیب ۳۵ و چرای سنتی برای مراتع شیب‌های ۲۵ و ۴۵ درصد بود.



شکل ۱. تصویر پلات‌های مرتعی در نمای کلی (بالا شیب ۳۵ درصد) و در دو شیب ۲۵ درصد (پایین چپ) و ۴۵ درصد (پایین راست)

جدول ۱. مشخصات پوشش گیاهی پلات‌های مرتعی

شیب %	تیب پوشش گیاهی	جهت دامنه	وضعیت مرتع	بیوماس گیاهی (kg/ha)	گرایش مرتع	شکل فرسایش	مدیریت
۲۵	گراس یک‌ساله	غربی	فقیر	۴۲۰	منفی	سطحی و شیبی	چرای سنتی
۳۵	بروموس-فلومیس	جنوب غربی	نسبتاً متوسط	۴۵۰	منفی	سطحی	قرق
۴۵	گون-بادام کوهی	شمالی	متوسط	۵۹۰	ثابت	سطحی	چرای سنتی

ke، فرسایش‌پذیری بین شیاری Ki، فرسایش‌پذیری شیاری Kr، و تنش برشی بحرانی π به مدل وارد شد. این پارامترها به طور دینامیک توسط مدل محاسبه و تولید می‌شود و مدل به مقادیر آنها حساس است. همچنین، آلبیدوی خاک سطحی خشک و لخت نیز در این فایل وارد شد. برای تهیه این اطلاعات در کنار محل پلات‌ها یک پروفیل حفر شد و از افق‌های مختلف نمونه‌برداری دست‌خورده و دست‌نخورده تهیه گردید و نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شد.

کلیه اطلاعات پوشش گیاهی و مدیریتی اعمال‌شده با ذکر تاریخ و چگونگی اجرا در فایل‌های ورودی پوشش گیاهی، شرایط اولیه، و مدیریت مدل WEPP ثبت گردید. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل در فایل مدیریت پوشش و بقایا بسته به نوع پوشش متفاوت بود. این داده‌ها عبارت بود از: داده‌های شرایط اولیه، داده‌های مربوط به جامعه گیاهی و پوشش، بقایا، سنگریزه، خاک لخت و لاش‌برگ و همچنین داده‌های مربوط به چرا. برای اندازه‌گیری پوشش مرتع از روش ترانسکت خطی و به منظور تعیین میزان بایومس مرتع از روش قطع و توزین استفاده شد. پارامترهای جامعه گیاهی شامل نسبت C:N ریشه و تاج پوشش گیاه با نمونه‌برداری تجزیه شیمیایی در آزمایشگاه تعیین شد. همچنین، طول دوره رشد رویشی گیاه و زمان شروع رشد و موقع گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک با مشاهده صحرایی یا سوابق موجود در منطقه تعیین و در این جزء به مدل وارد شد. داده‌های مورد نیاز مدیریت چرای دام شامل زمان ورود و خروج دام، تعداد دام و تراکم و وزن دام از اطلاعات محلی تهیه و ثبت شد. در نهایت، اطلاعات حاصل از اجرا و شبیه‌سازی مدل WEPP و داده‌های حاصل از پلات‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب با هم مقایسه و کارایی مدل تعیین شد. برای ارزیابی و در نتیجه تعیین کارایی مدل از معیارهای آماری زیر استفاده شد.

کل رواناب در هر واقعه بارندگی روزانه جمع‌آوری شد و، پس از اندازه‌گیری حجم، رسوب آن با استفاده از قیف و کاغذ صافی جدا گردید و در آن برای تعیین وزن رسوب خشک شد. در طول دو سال جمع‌آوری رواناب و رسوب، در مجموع تعداد وقایع بارندگی رواناب‌ساز بسته به شیب و کاربری بین ۱۷ و ۲۴ واقعه به ترتیب برای شیب‌های ۲۵ و ۴۵ درصد متغیر بود. تعداد وقایع رواناب منجر به فرسایش یا تولید رسوب نیز از ۱۸ و ۱۹ واقعه به ترتیب برای شیب‌های ۲۵ و ۴۵ درصد مرتعی متغیر بود.

با استفاده از نسخه v2008.9 مدل WEPP و با فرض هر یک از پلات‌ها به عنوان یک دامنه و با جمع‌آوری و تهیه چهار فایل مورد نیاز مدل، میزان رواناب، تلفات خاک، توزیع مکانی و زمانی فرسایش در هر بارندگی مؤثر توسط مدل برآورد شد. فایل‌های ورودی و داده‌های مورد نیاز آنها و طرز اندازه‌گیری به قرار زیر است. داده‌های مورد نیاز اقلیم شامل مقادیر روزانه مقدار و تداوم بارندگی، درجه حرارت متوسط، حداقل و حداکثر روزانه با نصب باران‌نگار و دمانگار ثبات در محل پلات‌ها و مقادیر روزانه سرعت و جهت باد، درجه حرارت نقطه شبنم و تشعشع خورشیدی از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، که با محل طرح کمتر از ۵ کیلومتر فاصله دارد، تهیه شد. این داده‌ها جهت استفاده مدل با استفاده از نرم‌افزار جانبی اقلیمی bpdcg^۱، که در مدل پیش‌بینی شده است، تولید و آنالیز شد.

داده‌های شیب شامل طول و عرض و درصد شیب هر پلات، شکل دامنه، و جهت آن بود و داده‌های خاک سطحی و زیرسطحی شامل ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد شن، رس، ماده آلی و سنگریزه برای هر لایه خاک، بافت خاک، و درصد اشباع رطوبتی اولیه خاک بود. این اطلاعات برای محاسبه پارامترهای جزء خاک شامل هدایت هیدرولیکی مؤثر

1. breakpoint climate data generator

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک در پروفیل‌های حفر شده

شیب %	عمق cm	درصد اشباع %	درصد آهک	CEC Meq/100gr	کربن آلی %	شن %	سیلت %	رس %
	۱۵ - ۰	۵۰	۱۲	۴۰	۲,۱۴	۱۳,۶	۳۶	۵۰,۴
۲۵	۳۵ - ۱۵	۵۶	۴۲,۵	۳۱,۴	۱,۳۸	۱۹,۶	۲۶	۵۴,۴
	۱۰۰ - ۳۵	۴۶	۵۵,۵	۸,۴	۰,۳۳	۴۳,۶	۲۶	۳۰,۴
	۲۵ - ۰	۵۳	۲۸	۳۰	۱,۳۰	۱۵,۶	۳۴	۵۰,۴
۳۵	۳۹ - ۲۵	۴۵	۴۱	۲۰	۰,۵۶	۱۳,۶	۳۴	۵۲,۴
	۸۰ - ۳۹	۴۹	۴۶	۲۹	۰,۴۳	۱۵,۶	۳۲	۵۲,۴
	۲۰ - ۰	۶۰	۴,۲	۴۰	۲,۱۴	۷,۶	۳۸	۵۴,۴
	۳۶ - ۲۰	۵۷	۶,۵	۳۹	۱,۲۱	۷,۶	۳۶	۵۶,۴
۴۵	۵۳ - ۳۶	۵۶	۲۲,۵	۲۹	۱,۰۲	۷,۶	۳۴	۵۸,۴
	۱۰۰ - ۵۳	۵۴	۴۳	۲۷,۴	۰,۷۵	۱,۶	۴۲	۵۶,۴

نتایج

داده‌های رواناب جمع‌آوری شده نشان داد که حداکثر ارتفاع رواناب در اواخر زمستان و اوایل بهار در کلیه پلات‌ها اتفاق می‌افتد. ضمن آنکه شیب ۴۵ درصد با حداکثر ارتفاع رواناب ۱۷,۸ میلی‌متر در این زمان بالاترین میزان را در وقوع رواناب داشت (شکل ۳). این مدل پیش‌بینی می‌کند که با افزایش بارندگی میزان ارتفاع رواناب به شکل غیرخطی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که روند افزایش در شیب‌های بالاتر سریع‌تر خواهد بود. همچنین، نقطه آغاز رواناب در این کاربری در بارندگی تجمعی ۲ تا ۵ میلی‌متر خواهد بود (شکل ۲).

بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل در برآورد رواناب نشان داد که مدل در شیب‌های مختلف مقدار رواناب را با دقت متفاوتی تخمین می‌زند (جدول ۳). بیشترین دقت مدل در شیب ۴۵ درصد بود، این در حالی است که در شیب ۲۵ و ۳۵ درصد مدل با خطای نسبی متوسط ۰,۶۱ لیتر رواناب را برآورد می‌نمود. این میزان خطا، با توجه به میزان تغییرات سالانه رواناب، که در شیب ۲۵ و ۳۵ درصد به ترتیب بین ۰ - ۱۸ و ۰ - ۲۴ لیتر بود، قابل اغماض است.

الف) میانگین قدر مطلق خطا (MAE):^۱

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_p - y_o|$$

ب) میانگین انحراف خطا (MBE):^۲

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_p - y_o)$$

ج) ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE):^۳

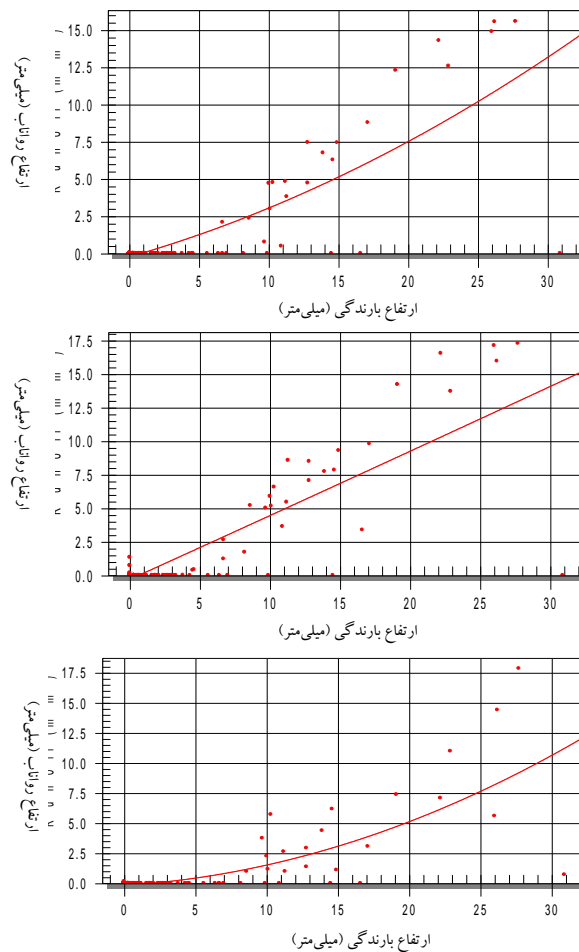
$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_p - y_o)^2}$$

د) ضریب کارایی ناش - ساتکلیف (۱۹۷۰)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_o - \bar{y})^2}$$

که y_o ، \bar{y} و y_p به ترتیب مقادیر شاخص‌های تلفات خاک یا تولید رواناب اندازه‌گیری شده، میانگین اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل است.

1. Mean Absolute Error
2. Mean Bias Error
3. Root Mean Square Error



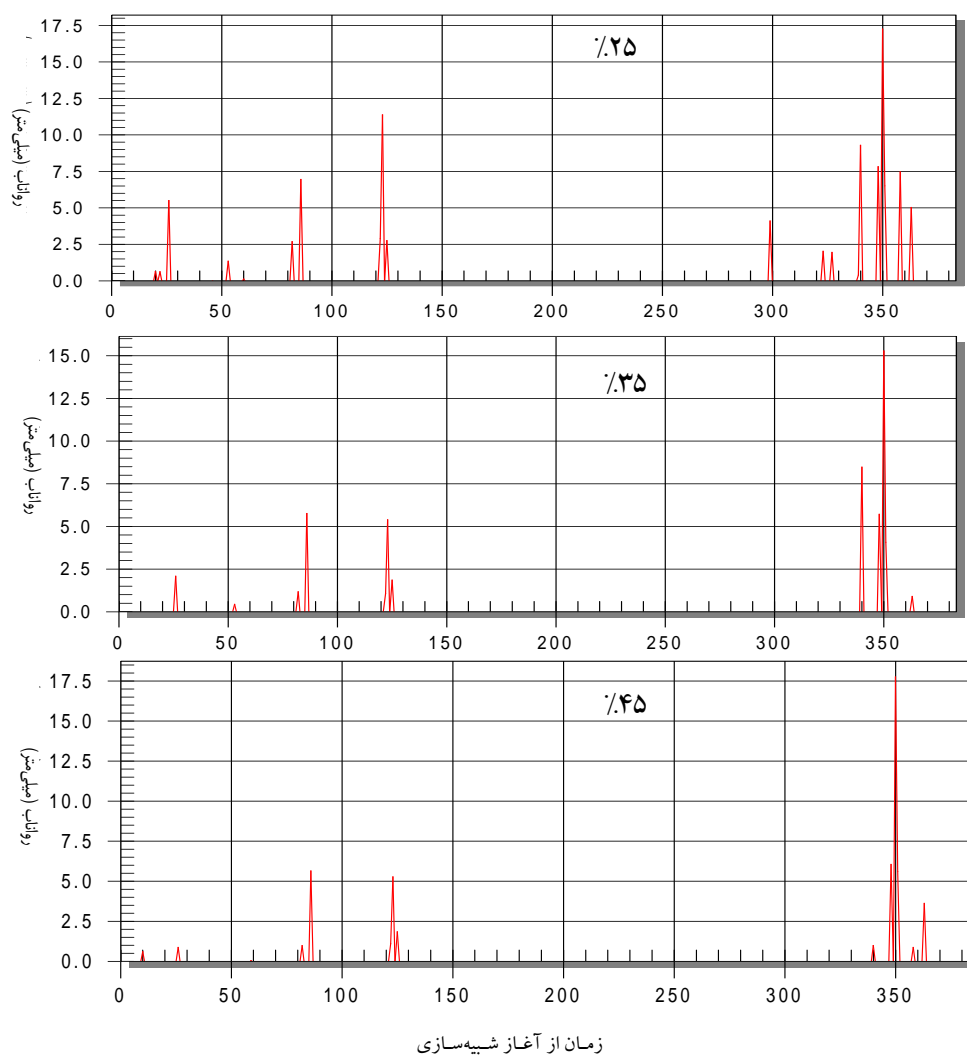
شکل ۲. رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده با بارندگی در شیب‌های مختلف

بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در پیش‌بینی رواناب در حالت تک‌رگبار برابر ۰/۷۷ بود. نتایج شبیه‌سازی فرسایش توسط مدل نشان داد که بیشترین فرسایش مربوط به شیب ۴۵ درصد با مدیریت چرای سنتی است. همچنین، میزان فرسایش در شیب ۲۵ درصد نیز در مرتبه بعد است، اما حداقل فرسایش خاک در شیب ۳۵ درصد به وقوع خواهد پیوست. از نظر توزیع مکانی فرسایش، نقطه شروع تفکیک ذرات در شیب‌های ۲۵، ۳۵، و ۴۵ درصد به ترتیب در فاصله ۲، ۵، و ۳ متری از ابتدای پلات قرار داشت. این نتایج مؤید حداکثر مقاومت به فرسایش و کنده‌شدن ذرات در شیب ۳۵ درصد متأثر از مدیریت پوشش است.

مقایسه مقادیر رواناب برآوردی در مقابل مقادیر مشاهده‌ای در این تحقیق، که در نمودار شکل ۳ نشان داده شده است، مبین آن است که مدل در شیب‌های تند (۴۵ درصد) در مقادیر پایین رواناب کمی بیش‌برآورد دارد. در حالی که در شیب‌های ملایم (۲۵ درصد) در مقادیر بالای رواناب بیش‌برآورد نشان می‌دهد. ضریب R^2 بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در این تحقیق با استفاده از مدل‌های غیرخطی، که بدین منظور برازش داده شده است، نسبتاً بالاست و، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در شیب‌های ۲۵، ۳۵، و ۴۵ درصد به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۷۳، و ۰/۸۴ است. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که R^2

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی مدل WEPP در برآورد تولید رواناب در پلات‌های مرتعی

	%۲۵	%۳۵	%۴۵	
MAE	۱٫۹۰	۲٫۲۱	۰٫۹۸	
MBE	۰٫۷۹	۰٫۶۳	۰٫۲۳	
RMSE	۰٫۶۱	۰٫۶۱	۰٫۵۲	
NSE	۰٫۷۰	۰٫۶۹	۰٫۷۳	



شکل ۳. توزیع مقادیر حجمی وقایع رواناب در طول سال شبیه‌سازی شده توسط مدل در شیب‌های مختلف

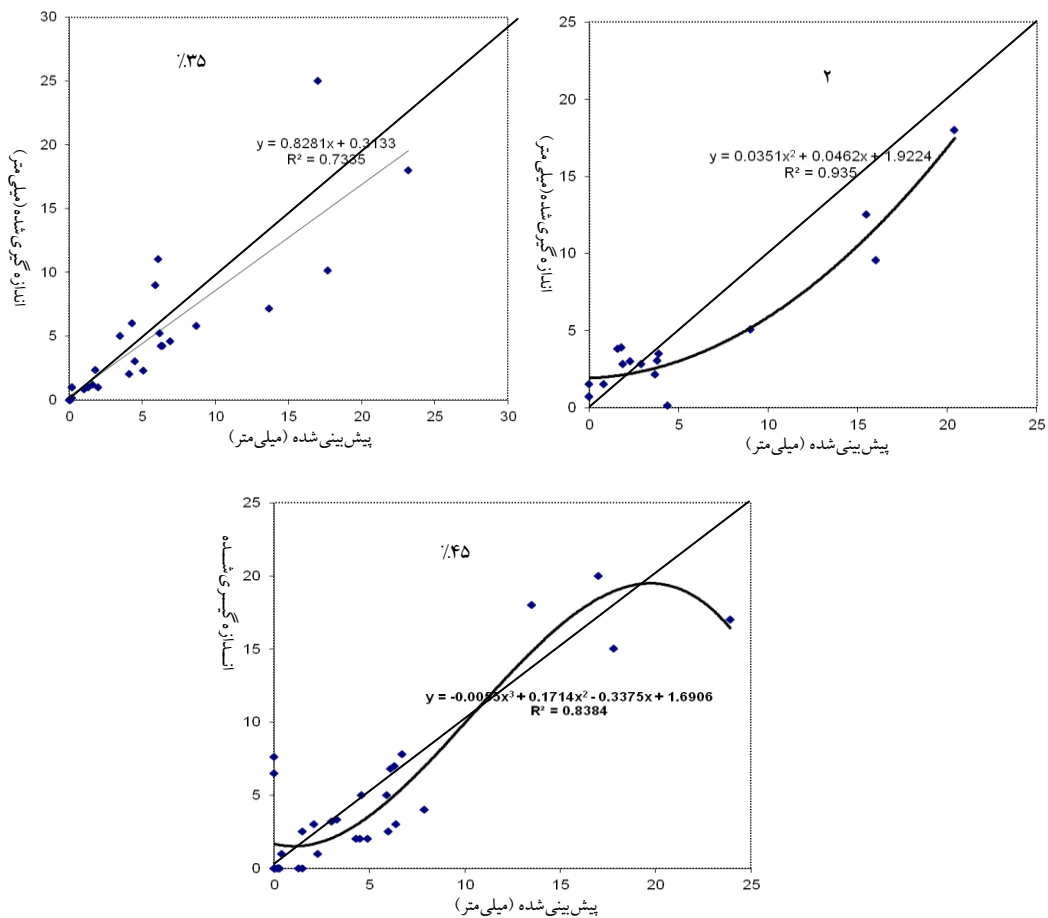
همچنین، مقادیر منفی شاخص ناش-ساتکلیف در دو شیب ۲۵ و ۳۵ درصد نشان‌دهنده کارایی پایین مدل در برآورد فرسایش خاک در این دو شیب است. بررسی شاخص خطای اریبی برآورد نشان می‌دهد که

بررسی شاخص‌های ارزیابی و کارایی مدل در برآورد فرسایش، که در جدول ۴ نشان داده شده، مبین آن است که کمترین خطای برآورد در شیب ۳۵ درصد و بیشترین آن در شیب ۴۵ درصد است.

یادشده بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۸ متغیر بود، البته، بررسی نمودارهای پخشی یادشده نشان‌دهنده کم‌برآوردی فاحش مدل نسبت به مقادیر واقعی است که از ارقام شاخص MBE در جدول ۴ نیز چنین روندی به ویژه در شیب ۴۵ درصد کاملاً مشخص است.

مدل در همه پلات‌ها برآوردی کمتر از میزان واقعی داشته است. این امر به‌ویژه در پلات شیب ۴۵ درصد خود را نشان داده است.

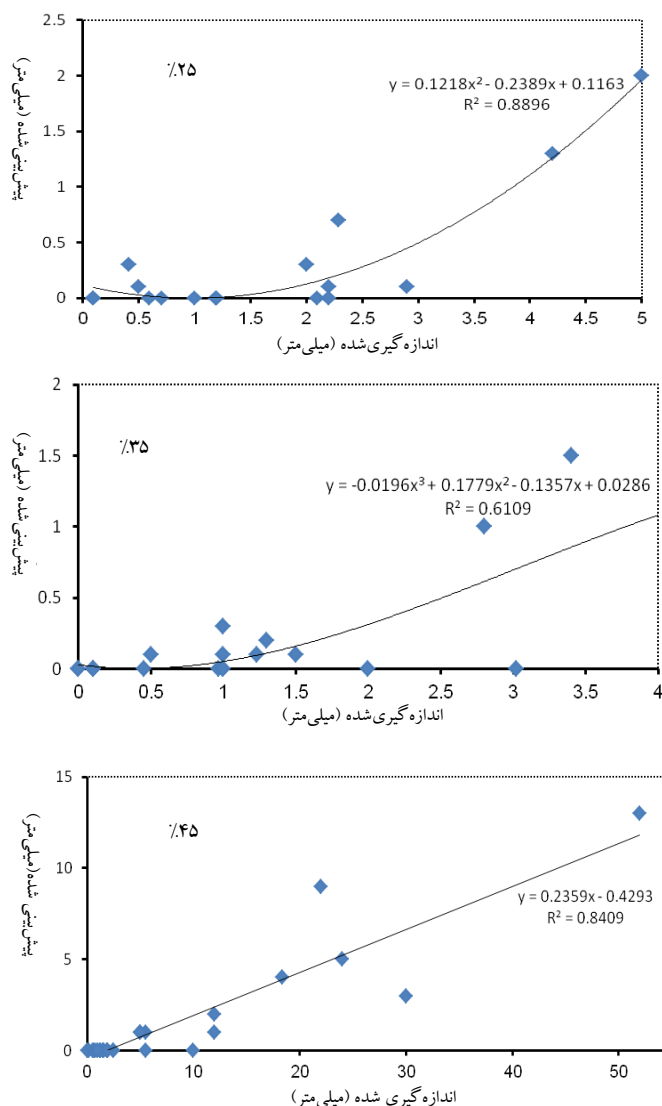
بررسی نمودارهای پخشی بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در پلات‌های آزمایشی، که در شکل ۴ نشان داده شده، مبین رابطه غیرخطی بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای است. ضریب R2 بین مقادیر



شکل ۴. نمودار پخشی مقادیر محاسبه‌ای رواناب در مقابل مقادیر برآوردی مدل WEPP

جدول ۴. شاخص‌های ارزیابی مدل WEPP در برآورد فرسایش خاک در پلات‌های مرتعی

٪۴۵	٪۳۵	٪۲۵	
۶٫۲۵	۱٫۰۶	۱٫۳۳	MAE
-۶٫۲۵	-۱٫۰۶	-۱٫۳۳	MBE
۱٫۹۶	۰٫۳۱	۰٫۳۹	RMSE
۰٫۱۰	-۰٫۴۳	-۰٫۴۷	NSE



شکل ۵. نمودار بخشی مقادیر محاسبه‌ای فرسایش در مقابل مقادیر برآوردی مدل WEPP در شیب‌های مختلف

بحث و نتیجه‌گیری

عمده مقادیر فرسایش در اواخر زمستان و اوایل بهار اتفاق می‌افتد که خاک عمدتاً لخت است، ولی بارندگی رواناب‌ساز زیاد است. بیشترین تعداد وقایع رواناب مربوط به شیب ۲۵ درصد و کمترین آن‌ها مربوط به شیب ۳۵ درصد با شرایط مدیریتی قرق بود. این امر مبین آن است که مدل به‌خوبی به وضعیت پوشش و مدیریت در بخش شبیه‌سازی رواناب حساس است.

در مجموع، کارایی مدل در برآورد رواناب در هر سه شیب نسبتاً بالاست؛ به گونه‌ای که در این سه شیب ضریب کارایی ناش-ساتکلیف بین ۰/۶۹ تا ۰/۷۳ محاسبه شد، که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در این زمینه است. نتایج تحقیق سریواستانا و همکاران [۱۸] نیز نشان‌دهنده صحت قابل قبول پیش‌بینی مدل بود؛ به نحوی که ضریب کارایی ناش-ساتکلیف بین ۰/۵ و ۰/۸۵ و با مقدار متوسط ۰/۶۷ صحت پیش‌بینی‌های مدل را نشان می‌داد. با این حال،

۳۷ درصد و ۱۵ درصد بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند، مطابقت نداشت [۱۰، ۱۲، ۱۷]، ولی با یافته‌های یک منبع تحقیقی دیگر، که نشان از کم‌برآوردی مدل در و وقایع فرسایش بزرگ داشت، تا حدودی همخوانی دارد [۴]. رابطه غیرخطی بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای با ضریب R^2 بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۸ اندکی بیش از مقدار یافته‌های لان و همکاران [۱۵] با $R^2 = ۰/۶$ است. همچنین، مقادیر یادشده از رقم ۰/۳۶ حاصل از نتایج تحقیق ژانگ و همکاران [۲۰] بیشتر بود. با وجود این، نمودارهای پخش‌ی نشان‌دهنده کم‌برآوردی فاحش مدل نسبت به مقادیر واقعی است.

مدل WEPP به‌خوبی و با کارایی بالایی می‌تواند تغییرات تولید رواناب را به صورت دینامیک در بخش مرتع رونمایی کند. بدین ترتیب، می‌توان اثر اقدامات مدیریتی را در طول زمان در میزان رواناب تولیدی بررسی کرد. همچنین، این مدل مقادیر رواناب را در بخش مرتعی با اندکی بیش‌برآورد با خطای بین ۰/۵ تا ۰/۶ لیتر بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زند، ولی در تخمین میزان فرسایش در این کاربری خطای کم‌برآوردی دارد. با توجه به اینکه مرور سوابق مطالعاتی نشان داد که حساسیت بالای این مدل در تخمین و ارائه داده‌های زبری، پوشش، و ارقام فرسایش‌پذیری شیاری، بین شیاری، تنش برشی بحرانی، و نفوذپذیری است، پیشنهاد می‌شود در تداوم این خط تحقیقی پارامترهای لازم برای تعیین فاکتورهایی که مدل به آن‌ها حساس است کالیبره و تعیین شود، زیرا نرم‌افزار رایانه‌ای مربوطه به نحوی طراحی شده که می‌توان این پارامترها را به صورت دستی نیز به مدل وارد نمود. همچنین، نسخه آبخیز مدل زمینه مناسب تحقیقاتی دیگری برای ارزیابی و بررسی است که ارزیابی آن پیشنهاد می‌شود.

مدل در برآورد رواناب با انحراف ۹ درصدی از متوسط در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای به صورت کم‌برآورد پیش‌بینی می‌نمود.

در تحقیق هلیل [۱۲] میانگین RMSE رواناب بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل WEPP، ۱۱/۵ متر مکعب در ثانیه بود. مدل در شیب‌های تند در مقادیر پایین رواناب و در شیب‌های ملایم در مقادیر بالای رواناب بیش‌برآورد نشان می‌دهد. نتایج تحقیق باون و همکاران [۳] نیز نشان داد که مدل در مقادیر رواناب بالاتر از یک میلی‌متر به‌خوبی و با دقت بسیار بالایی رواناب را تخمین می‌زند. نتایج تحقیق بریزر و همکاران [۴] نیز نشان داد که مدل در مقادیر وقایع رواناب بزرگ کم‌برآورد داشته و در وقایع کوچک بیش‌برآورد دارد. در تحقیق کینساید [۱۳] نشان داده شد که مدل WEPP در برآورد رواناب در نقاط با شیب کم از دقت بیشتری نسبت به اراضی شیب‌دار برخوردار است. بررسی‌های گریس [۱۱] نشان داد مدل WEPP در پیش‌بینی رواناب برای رگبارهای انتخابی بیش‌برآورد نشان داده و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف مدل بین ۰/۳۲ تا ۰/۵۷ متغیر بوده است.

ارزیابی مدل در برآورد فرسایش نشان داد که کمترین خطای برآورد در شیب ۳۵ درصد بود، اما مقادیر کم و حتی منفی شاخص ناش-ساتکلیف نشان‌دهنده کارایی پایین مدل در برآورد فرسایش خاک در شرایط مراتع مورد مطالعه است. این نتایج با تحقیقی که حاکی از کارایی بالای مدل با ضریب کارایی بین ۰/۷۳ و ۰/۹۲ در پیش‌بینی فرسایش بود، متفاوت است [۱۱]. همچنین، مدل در همه پلات‌ها به ویژه در پلات شیب ۴۵ درصد برآوردی کمتر از واقعی داشت و با نتایج تحقیق برخی محققان، که نشان دادند مدل مقادیر رسوب را به ترتیب به میزان

References

- [1]. Ahmadi, H., Jafari, M., Golkarian, A., Abrisham, E. and Laflen, J. (2009). Estimating water erosion and sediment using WEPP model (Case study of Bar-Erieh Watershed, Neyshabur), *Pajouhesh & Sazandegi*, 75, 161-172.
- [2]. Asadi, H., Roohipour, H., Refahi, H. and Shorafa, M. (2007). Evaluation of WEPP model for interrill erosion prediction in laboratory condition, *Iranian Journal of Agricultural Science*, 38(4): 553-562.
- [3]. Bowen, W., Baigorria, G., Barrera, V., Cordova, J., Muck, P. and Pastor, R. (1998). A Process-based model (WEPP) for simulating soil erosion in the Andes, CIP Program Report, *Natural Resource Management in the Andes*, 403-408.
- [4]. Brazier, R.E. Beven, K.J., and Freer, J. and Rowan, J.S. (2000). Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the GLUE methodology to WEPP-the water erosion prediction project-for sites in the UK and USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(8): 825-845.
- [5]. Dun, S., Wu, J.Q., Elliot, W.J., Robichaud, P.R., Flanagan, D.C., Frankenberger, J.R., Brown, R.E. and Xu, A.C. (2009). Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications, *Journal of Hydrology*, 366, 46-54.
- [6]. Elliot, W.J. (2004). WEPP Internet Interfaces for Forest Erosion Prediction, *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2): 299-309.
- [7]. Flanagan, D.C., Gilley, J.E. and Franti, T.G. (2007). Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements, *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, Paper 27. University of Nebraska - Lincoln. USA.
- [8]. Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. (ed.). (1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project: Technical Documentation*, NSERL Report No. 10. West Lafayette, IN, USA.
- [9]. Foltz, R.B., Elliot, W.J. and Wagenbrenner, N.S. (2011). Soil erosion model predictions using parent material texture-based parameters compared to using site specific parameters, *Transactions of the ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54(4): 1347-1356.
- [10]. Ghidry F., Alberts, E.E. and Kramer, L. (2000). Comparisons of measured and WEPP predicted runoff and sediment loss from deep Loess soils watershed, *Soil Erosion for 21st century symposium*, USDA-Agricultural Research Service.
- [11]. Grace, J.M. (2007). Modeling Erosion from Forest Roads with WEPP, http://www.dcs.ufla.br/site/_adm/upload/file/pdf/Prof%20Marx/Aula%205/Outro%20art%20interesse/Grace_WEPP_estradas%20florestais.pdf (21/02/2013).
- [12]. Halil, K. (2002). Comparison of Erosion and Runoff Predicted by WEPP and AGNPS Models Using a Geographic Information System, *Turkish Journal of Agriculture*, 26, 261-268.
- [13]. Kincaid, D.C. (2002). The WEPP model for runoff and erosion prediction under center pivot irrigation, *Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*, 45(1): 67-72.
- [14]. Laflen, J.M., Flanagan, D.C. and Enge, B.A. (2008). Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP, *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2): 289-294.
- [15]. Lane, L.J., Nichols, M.H. and Paige, G.B. (2009). *Modeling erosion on hillslopes: Concepts, theory, and data*, USDA-Agricultural Research Service, Tucson AZ, USA.
- [16]. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, 1: A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- [17]. 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.
- [18]. Srivastava, A., Dobre, M., Bruner, E., Elliot, W.J., Miller, I.S. and Wu, J.Q. (2011). Application of the WEPP model to simulate streamflow in Apnforest watershed, *Proceedings of International Symposium on Erosion and Landscape Evolution*, Anchorage, Alaska.
- [19]. Wilcox, B.P. and Simanon, J.R. (1996). *Predicting runoff in semiarid woodlands: Evaluation of the WEPP model*, USDA- ARS. TEKTRAN.
- [20]. Zhang, X.C., Nearing, M.A., Risse, L.M. and McGregor, K. (1995). Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data, *American Society of Agricultural Engineering*, p. 95-2381. *ASAE Meeting*, Chicago, IL June, 18-23, 1995.