

بررسی کارایی مدل فیزیکی WEPP در پیش‌بینی رواناب و فرسایش خاک در کاربری دیم در شرایط نیمه خشک

یحیی پرویزی¹

استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه؛ yparvizi1360@gmail.com

دریافت: 91/10/25 و پذیرش: 92/7/22

چکیده

مدل فرآیندی WEPP تمامی متغیرهای اثرگذار در فرآیند فرسایش را بر اساس مفاهیم فیزیکی و به کمک معادلات ریاضی محاسبه می‌کند و جهت شبیه‌سازی این فرآیند در کاربری زراعت کاربرد خوبی دارد. هدف از اجرای این طرح تعیین قابلیت مدل WEPP در تخمین تلفات خاک و تولید رواناب در کاربری دیمزار و تعیین پتانسیل مدل در شبیه‌سازی اثرات عملیات مدیریتی در فرسایش بود. این طرح در کبوده علیا در حوضه آبخیز قره‌سو به مرحله اجرا درآمد. پلات‌های آزمایشی جمع‌آوری رواناب و رسوب به ابعاد 10×3 متر با 3 تکرار در شیب‌های 6، 12، 16 و 20 درصد نصب شد. داده‌های اقلیمی بارندگی و دما با نصب باران‌نگار و دماسنج ماکزیمم و مینیمم ثابت در داخل ایستگاه ثبت و داده‌های سرعت و جهت باد، تشعشع خورشیدی و درجه حرارت نقطه شبنم از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تهیه گردید. شبیه‌سازی فرسایش و رواناب با استفاده از نسخه WEPP v2008.9 مدل WEPP در هر پلات انجام شد. بررسی نتایج ارزیابی مدل نشان داد که با افزایش شیب دقت برآورد رواناب افزایش یافته است. به گونه‌ای که مقادیر منفی شاخص ناش-ساتکلیف در دو شیب 6 و 12 درصد و مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا (به ترتیب با متوسط 3/16 و 4/82 لیتر) نشان از کارایی پائین مدل در این دو شیب دارد. همچنین مدل در اغلب پلات‌ها، به استثنای پلات‌های شیب 6 درصد، به درجات متفاوتی در برآورد رواناب کم‌برآورد بود. همچنین بیشترین کارایی مدل در برآورد فرسایش در شیب 16 درصد و کمترین کارایی مدل در پلات‌های شیب 20 درصد بود، جایی که خطای کم برآوردی 7/5 کیلوگرم در پلات در سال و شاخص ناش-ساتکلیف مقدار منفی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: نسخه WEPP v2008.9، پلات‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب

مقدمه

ریاضی برخوردارند، که هرکدام از عناصر آن اهمیت خاصی دارند. مدل جامع محیطی WEPP به عنوان مدل فرآیندی تمامی متغیرهای اثرگذار در فرآیندهای فرسایش را به صورت ریاضی محاسبه می‌کند و جهت شبیه‌سازی این فرآیندها در اراضی دامنه‌ای و آبخیزهای کوچک کاربرد خوبی دارد.

امروزه توسعه فناوری پیش‌بینی و مدل‌سازی فرسایش خاک با اهداف اجرایی و تحقیقاتی گسترش روزافزونی داشته است که محور عمده این توسعه نگرش فرآیندی و مدل‌سازی ریاضی به منظور انتخاب بهترین و کاراترین مدل برای پیش‌بینی و روندیابی این فرآیند می‌باشد. مدل‌های ریاضی از پی‌کرندگی یک معادله

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرمانشاه، بلوار جام جم، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

عرصه بین شیار برخورد قطرات باران و اثر جریان سطحی نازک است. در مدل‌های فرآیندی از جمله WEPP مدل بقاء جرم به کار رفته، معادله غیرماندگار پیوستگی رسوب است که توزیع مکانی و زمانی بار رسوب در جریان را تبیین می‌کند (فلانگان و نیرینگ 1995).

برای ارزیابی کارایی مدل WEPP تحقیقات نسبتاً زیادی در سطح دنیا انجام شده است. اولین بررسی‌ها مربوط به ویلکاکس و سیمانتون (1996) بود که کارایی نسخه پایه مدل WEPP را در پیش‌بینی تولید رواناب و فرسایش خاک در پلات‌های $10/67 \times 3/05$ متر در آمریکا ارزیابی کردند. آنها همبستگی معنی‌داری بین نوع مدیریت و دقت پیش‌بینی فرسایش مدل WEPP بدست آوردند ولی بین مقادیر رواناب پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده همبستگی ضعیفی وجود داشت. در تحقیق دیگری باون و همکاران (1998) کارایی نسخه پایه مدل WEPP را در پلات‌های آزمایشی 10×4 متر در شیب‌های 30، 35، 40، 45، 50 و 60 درصد بصورت تک رگبار ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل WEPP در مقادیر رواناب بالاتر از یک میلیمتر عمق و تلفات خاک بیش از 0/1 تن در هکتار به خوبی و با دقت بالایی رواناب و رسوب را تخمین می‌زند.

لان و همکاران (2009) قابلیت نسخه پایه مدل WEPP را در برآورد فرسایش و تولید رسوب با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از پلات‌های $10/7 \times 3$ متر حاصل از 18 رگبارش در غرب آمریکا ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که رابطه معنی‌داری با ضریب تبیین برابر 0/6 بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده رسوب به دست آوردند. در تحقیق دیگری گیدی و همکاران (2000) نیز با روش مشابهی کارایی نسخه آبخیز این مدل را در پیش‌بینی فرسایش و تولید رسوب در یک حوضه آبخیز کوچک 5/6 هکتاری برای ده رگبارش تند ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که این مدل مقادیر رواناب و تلفات خاک را بین 10/4 تا 44/9 درصد بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کرد. همچنین، کینساید (2002) نشان داد که مدل WEPP در برآورد رواناب در نقاط کم‌شیب از دقت بیشتری نسبت به اراضی پرشیب برخوردار است. همچنین نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مدل توسط آنان نشان داد که مدل به داده‌های هدایت هیدرولیکی بیشترین حساسیت را دارد. به نحوی که مدل در مقادیر کمتر هدایت هیدرولیکی خاک مقادیر رواناب و فرسایش را بیش برآورد می‌نماید.

در تحقیقی کارایی مدل اصلاح شده WEPP در پیش‌بینی تغییرات رواناب توسط سرواستانا و همکاران

مدل WEPP¹ از دسته مدل‌های ریاضی است که به شکل پیوسته و با استفاده از مفاهیم فیزیکی، متغیرهای وابسته فرسایش را با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک متغیرهای مستقل که از نظرتئوریک با فرسایش مرتبط هستند، روندیابی و پیش‌بینی می‌کند. این مدل پراکندگی مکانی و زمانی تلفات خاک و ته‌نشست رسوب، رواناب، رشد گیاه، و تجزیه بقایا را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل فیزیکی و پویا است و توالی محاسباتی آن شامل توزیع و مرتب سازی پارامترهای ورودی، شبیه‌سازی پیوسته و در نهایت پیش‌بینی متغیرهای فرسایش است. اجزاء مدل عبارتند از مولد اقلیم²، جزء هیدرولوژی دامنه، هیدرولوژی زمستان، جزء خاک، جزء رشد گیاه، جزء مدیریت و تجزیه بقایا، جزء هیدرولیک جریان سطحی، جزء فرسایش و جزء آبیاری. در جزء مولد اقلیم، داده‌های بارش را با استفاده از زنجیره دو جمله‌ای مارکوف تولید و در اجزاء هیدرولوژی و رشد گیاه و تجزیه بقایا و فرسایش استفاده می‌شوند (الیوت 2004).

برای محاسبه و شبیه‌سازی تولید رواناب در جزء هیدرولوژی مدل WEPP، عناصر هیدرولوژی سطحی دامنه، بیلان آب و فرونشست عمقی و هیدرولوژی زیرسطحی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. توالی محاسباتی در هیدرولوژی سطحی دامنه به ترتیب تعیین مقدار نفوذ، توزیع بارندگی مازاد، ذخیره چلابی، هیدروگراف رواناب و در نهایت بده اوج است. برای تعیین بده اوج رواناب در شبیه‌سازی تک‌رگبار از روش حل نیمه آنالیتیک معادله موج سینماتیک و برای شبیه‌سازی پیوسته از روش تقریب استفاده می‌شود. از آنجا که رواناب محاسبه شده در جزء هیدرولوژی به زبری بسیار حساس است. در مدل WEPP در جزء هیدرولیک جریان سطحی، زبری با تفکیک به سطوح شیار، بین شیار و کانال و لحاظ نمودن اثر فاکتورهای پوشش سطح و بقایا، رشد گیاه و زبری تصادفی، محاسبه می‌شود (فلانگان و همکاران 2007 و فلانگان و نیرینگ 1995).

برای محاسبه فرسایش در مدل WEPP فرآیندهای فرسایش شیاری، بین‌شیاری و فرسایش کانال در جزء فرسایش شبیه‌سازی می‌شود. در شیار و کانال برش هیدرولیکی جریان متمرکز، ظرفیت انتقال و بار رسوب جریان محاسبه می‌شود. فرآیندهای حاکم در

1. Water erosion prediction project

2. Climate generator

مواد و روش‌ها

این طرح در محدوده دیمزارهای کبوده علیا در 5 کیلومتری جنوب شرق کرمانشاه و در حوضه آبخیز قره‌سو که یکی از سرشاخه‌های اصلی کرخه می‌باشد، انجام شد. متوسط بارندگی سالانه منطقه 470 میلی متر با اقلیم نیمه خشک سرد، ارتفاع از سطح دریا 1550 متر است. خاک دامنه‌ها در رده‌بندی آمریکائی از رده آنتیسول و زیررده اورتنت بوده و دارای رژیم حرارتی و رطوبتی مزیک زریک است. داده‌های اقلیمی از قبیل آمار روزانه مقدار و تداوم بارندگی، درجه حرارت متوسط، حداقل و حداکثر روزانه با نصب باران‌نگار و دماسنج ماکزیمم و مینیمم ثبات 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 5 کیلومتری محل قرار دارد تهیه گردید. پلات‌های آزمایشی جمع‌آوری رواناب و رسوب به ابعاد 10×3 مترمربع با 3 تکرار در شیب‌های 6، 12، 16 و 20 درصد که بیشترین فراوانی را در میان مزارع دیم حوضه قره‌سو داشتند، ایجاد شدند. شکل شیب پلات‌ها یکنواخت و حتی‌الامکان فاقد تقعر و تحدب و در جهت‌های شمالی و شرقی پراکنده بودند. مشخصات پلات‌ها و مدیریت غالب در آنها در جدول 1 ارائه گردیده است.

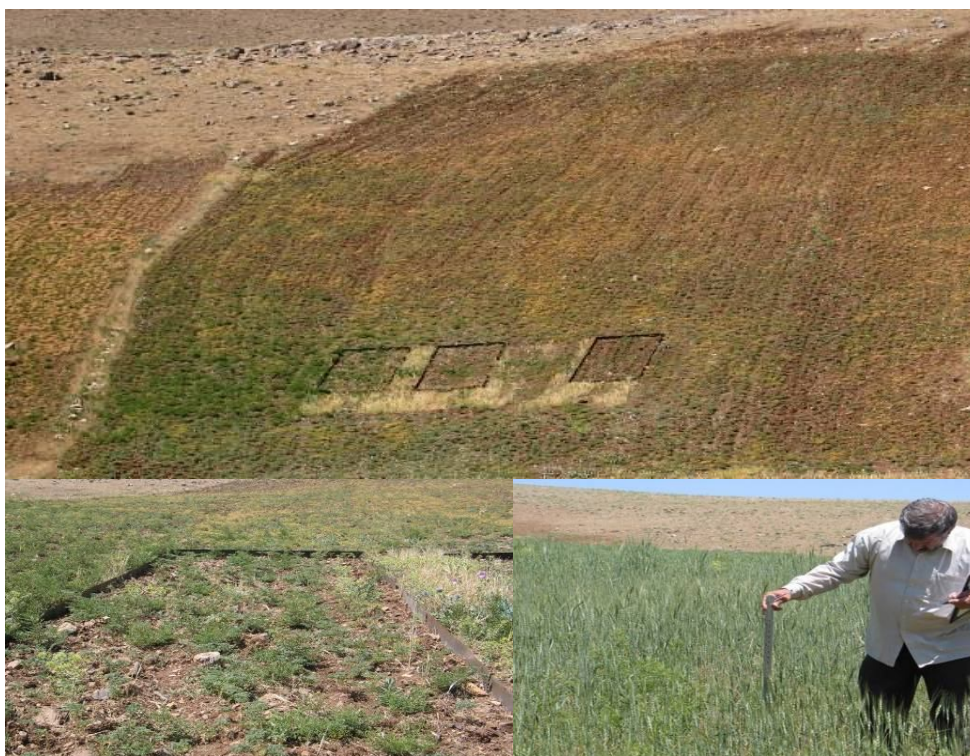
(2011) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی آنها با ضریب کارائی ناش-ساتکلیف بین 0/5 و 0/85 و با مقدار متوسط 0/67 صحت پیش‌بینی‌های مدل را نشان می‌داد. با این حال مدل در برآورد رواناب با انحراف 9 درصدی از متوسط، به صورت کم‌برآورد پیش‌بینی می‌نمود. همچنین مدل در برخی سال‌ها مقدار پیک رواناب را به صورت بیش برآورد و در برخی سال‌ها به صورت کم‌برآورد پیش‌بینی می‌نمود. لافلن و همکاران (2008) در یک بررسی اجمالی و با استفاده از مجموع 1594 داده از پلات‌های رواناب و رسوب نیکوئی برازش پیش‌بینی فرسایش مدل WEPP را مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی‌های آنها نشان داد که مدل در طیف گسترده‌ای از شرایط مدیریتی بویژه در مقیاس حوضه‌های کوچک قادر به شبیه‌سازی فرسایش و رسوب است. گریس (2007) به ارزیابی کارائی مدل WEPP در پیش‌بینی تغییرات رواناب و فرسایش در جاده‌های جنگلی با استفاده از پلات‌های آزمایشی پرداخت. داده‌های مورد استفاده شامل 8 واقعه بارندگی طی دو سال آزمایش بود. نتایج تحقیقات وی حاکی از مقداری بیش برآورد در تخمین فرسایش و رواناب توسط مدل بوده است. ضریب کارائی ناش و ساتکلیف در پیش‌بینی فرسایش بین 0/73 و 0/92 و در پیش‌بینی رواناب بین 0/32 تا 0/57 متغیر بود. در تحقیقی دان و همکاران (2009) به بررسی کارائی نسخه اصلاح شده مدل WEPP و مقایسه آن با نسخه اولیه در برآورد فرسایش و رواناب پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان از برآورد رواناب به میزان 262 میلیمتر در سال توسط نسخه اصلاح شده بود که همخوانی بسیار زیادی با مقدار 275 میلیمتر اندازه‌گیری شده داشت. ضمناً ضریب کارائی ناش - ساتکلیف نیز برای شبیه‌سازی روزانه و پیوسته یا فصلی به ترتیب 0/45 و 0/57 بود.

نکته حائز اهمیت در کشور ما، خلاء تحقیقاتی جدی در خصوص امکان‌سنجی کاربرد مدل‌های فیزیکی و فرآیندی در پیش‌بینی پویایی تولید رواناب و فرسایش خاک بویژه در کاربری زراعی است. بررسی‌های نگارنده نشان می‌دهد، علیرغم ظرفیت بالای علمی و تحقیقاتی مدل WEPP، تاکنون در کشور بررسی جامعی در خصوص ارزیابی کارائی و صحت پیش‌بینی مدل در برآورد رواناب و فرسایش با استفاده از داده‌های پلات‌های آزمایشی استاندارد این مدل‌ها انجام نشده است. لذا هدف اصلی این تحقیق تعیین قابلیت نسخه دامنه¹ مدل WEPP در تخمین تلفات خاک و میزان رواناب می‌باشد.

¹ Hillslope

جدول 1- مشخصات پوشش گیاهی پلات‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب

شیب%	جهت دامنه	نوع شخم	شکل فرسایش	تناوب
6	شمال شرقی	در جهت شیب	سطحی	گندم - جو
12	شرقی	خلاف جهت شیب	سطحی	گندم - آیش - نخود
16	شرقی	خلاف جهت شیب	سطحی	گندم - نخود
20	شمالی	در جهت شیب	سطحی و شیری	گندم - نخود



شکل 1- تصویر پلات‌های زراعی در نمای کلی (شکل بالا شیب 20%) و در دو کشت نخود دیم 16% (بائین سمت چپ) و نحوه اندازه‌گیری پارامترهای رشد گیاه در گندم دیم شیب 12% (بائین سمت راست)

ورودی و داده‌های مورد نیاز آنها به قرار زیر می‌باشد. داده‌های اقلیم، داده‌های مدیریت و پوشش گیاهی، داده‌های شیب و داده‌های خاک سطحی و زیرسطحی بود. داده‌های اقلیمی از قبیل آمار روزانه مقدار و تداوم بارندگی، درجه حرارت متوسط، حداقل و حداکثر روزانه با نصب 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 5 کیلومتری محل قرار دارد تهیه گردید. داده‌های شیب شامل طول و عرض و درصد شیب هر پلات، شکل دامنه و جهت آن، و داده‌های خاک شامل

کل رواناب در هر واقعه بارندگی روزانه، پس از اندازه‌گیری، جمع‌آوری شده و رسوب آن توزین گردید. در طول دو سال جمع‌آوری رواناب و رسوب در مجموع تعداد وقایع بارندگی رواناب‌ساز بسته به شیب و کاربری بین 7 واقعه در شیب 6 درصد تا 29 واقعه در شیب 16 درصد متغیر بود. تعداد وقایع رواناب منجر به فرسایش یا تولید رسوب نیز از 7 واقعه در شیب 12 درصد تا 26 واقعه در شیب 16 درصد متغیر بود.

با استفاده از مدل WEPP (نسخه 2008.9v) با جمع‌آوری و تهیه چهار فایل مورد نیاز مدل، میزان رواناب، تلفات خاک، توزیع مکانی و زمانی فرسایش در هر بارندگی موثر توسط مدل برآورد گردید. فایل‌های

توسط مدل محاسبه و تولید می‌شود و مدل به مقادیر آنها حساس می‌باشد. همچنین آلبیدو خاک سطحی خشک و لخت نیز در این فایل وارد گردید. برای تهیه این اطلاعات در کنار محل پلات‌ها یک پروفیل حفر و از افق‌های مختلف خاک نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد.

ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد شن، رس، ماده آلی و سنگریزه برای هر لایه خاک، بافت خاک و درصد اشباع رطوبتی اولیه خاک بود (جدول 2). این اطلاعات برای محاسبه پارامترهای هدایت هیدرولیکی مؤثر، فرسایش‌پذیری بین‌شیاری، فرسایش‌پذیری شیاری، تنش برشی بحرانی به مدل وارد شد. این پارامترها بطور پویا

جدول 2- مشخصات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک در پروفیل‌های حفر شده

رس %	سیلت %	شن %	کربن آلی %	ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی‌اکی‌والان در صد گرم خاک)	درصد آهک	درصد رطوبت اشباع %	عمق (سانتی‌متر)	شیب %
56/4	36	7/6	1/02	13/4	30	52	0-25	
59/4	28	12/6	0/56	22	36	52	25-50	
51/4	25	23/6	0/34	20	54	51	50-65	
36/4	25	38/6	0/32	13/6	56	42	65-100	6
50	36	14	1/21	26	28/5	56	0-20	
52	34	14	1/02	29	29	54	20-45	
52	34	14	0/84	28	30	56	45-65	
52	36	12	0/84	29	33	53	65-100	
56/4	28	15/6	1/50	38/4	5	59	0-15	
54/4	28/6	17	1/36	38/8	4	59	15-30	16
58	24	18	1/02	39/6	6	61	30-50	
52	28	20	0/74	24	24	54	50-100	
58/4	33	8/6	1/30	40	10	56	0-22	
62/4	26	11/6	1/21	44	7	63	22-50	20
61/4	27	11/6	1/02	31	18	54	50-100	

دست نخورده، عمق شخم، زبری سطح و درصد اختلاط بقایا با خاک بود که پس از اندازه‌گیری، به مدل وارد شد. داده‌های مدیریت چرای دام شامل زمان شروع و پایان چرا، نوع و تراکم دام بود. داده‌های مدیریت بقایا شامل مقدار بقایای برداشت شده یا باقیمانده و نوع بقایا بود. داده‌های مدیریت برداشت شامل پارامترهای نوع گیاه که در داده‌های گیاهی بیان گردید و نیز پارامترهای بقایا و رسیدگی¹ بود. در نهایت اطلاعات حاصل از اجرا و شبیه سازی مدل WEPP و داده‌های حاصل از پلات‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب با هم مقایسه و کارائی مدل تعیین شد. برای ارزیابی و در نتیجه تعیین کارائی مدل از معیارهای آماری زیر استفاده شد.

داده‌های ورودی پوشش گیاهی، مدیریت و بقایا عبارت بودند از اطلاعات پوشش گیاهی و عملیات مدیریتی بودند که با ذکر تاریخ و چگونگی انجام در قالب اطلاعات پوشش گیاهی، شرایط اولیه و مدیریت مدل WEPP ثبت گردید. این داده‌های ورودی بسته به نوع تناوب و سیستم کاشت و داشت متفاوت بود. اهم داده‌های ورودی این بخش، بر اساس تقویم زمانی و مدیریت رایج زارعین، عبارت بودند از زمان عملیات شخم و آماده سازی زمین، نوع کشت (گندم، جو و نخود دیم و شخم آیش)، زمان و نحوه انجام عملیات مدیریت زراعی (نظیر کود پاشی و سمپاشی) و مراحل مختلف رشد گیاه بودند. همچنین برخی اختصاصات فیزیولوژیک و فنولوژیک گیاه به همراه برخی داده‌ها که در زمان مشخصی از فصل رشد اندازه‌گیری و ثبت می‌شد، جزء داده‌های ورودی مدل در این بخش بود. دیگر داده‌های مدیریت کشت و کار شامل اطلاعات عملیات شخم، مدیریت بقایای محصول و چرای دام و برداشت محصول بود. اطلاعات شخم و خاک‌ورزی، شامل زمان اعمال شخم، نوع ادوات، فاصله ردیف‌های شخم، درصد برگردان خاک و درصد خاک

¹ Senescence

الف - میانگین قدر مطلق خطا (MAE)¹:

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

ب - میانگین انحراف خطا (MBE)²:

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

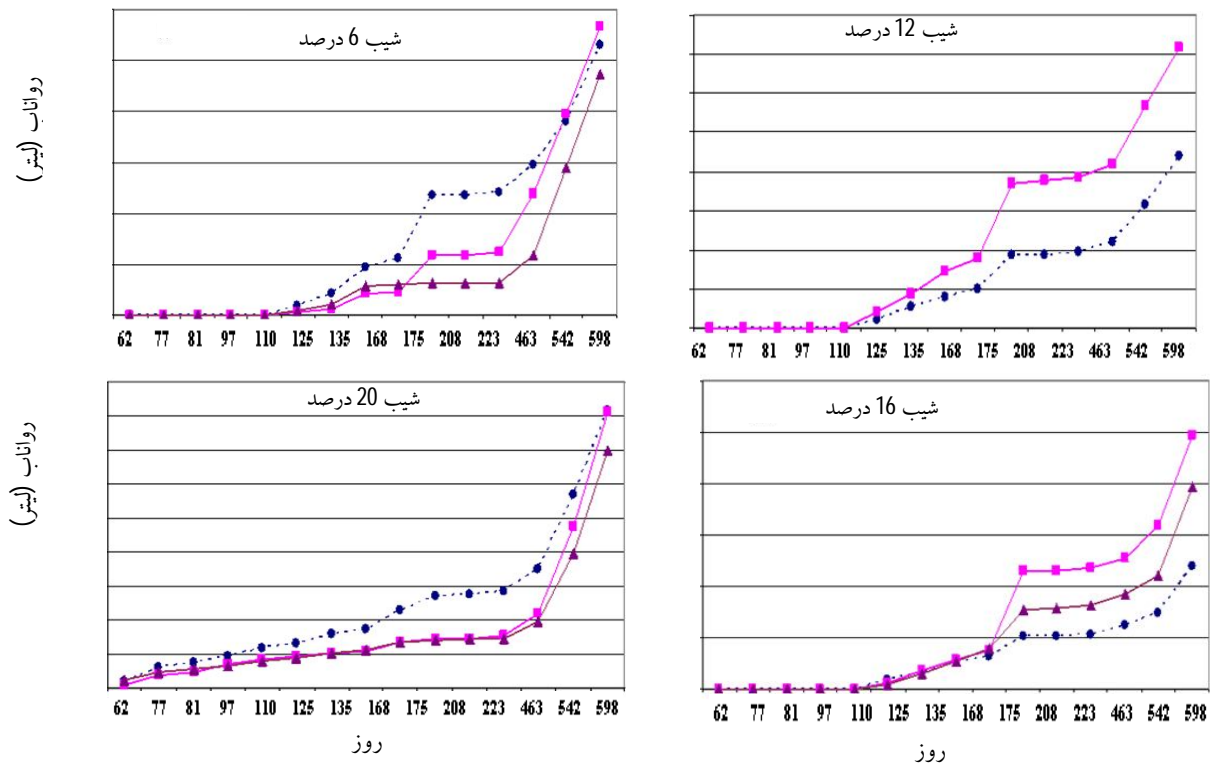
ج - ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)³:

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

د - ضریب کارایی ناش و ساتکلیف

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_o - \bar{y})^2} \quad (1970)$$

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 می‌باشد.



شکل 2- مقادیر تجمعی رواناب جمع‌آوری شده طی دو سال در شیب‌های مختلف (سه تکرار)

¹ Mean Absolute Error

² Mean Bias Error

³ Root Mean Square Error

نتایج و بحث

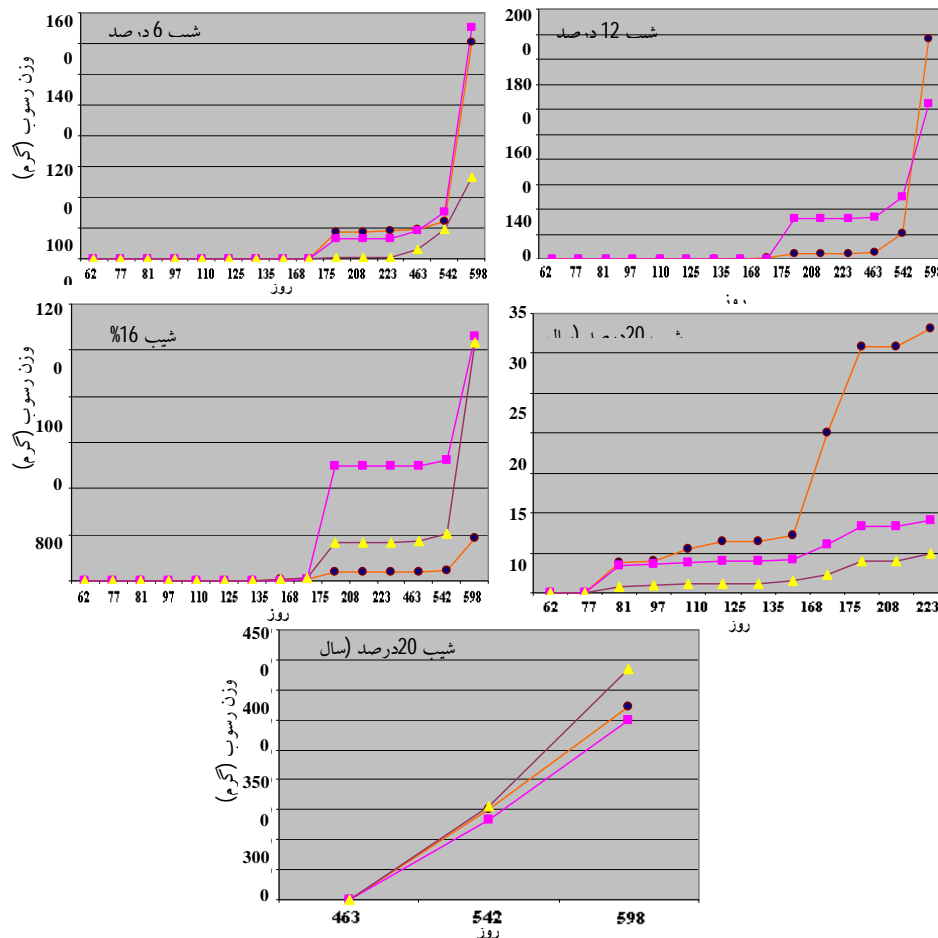
داده‌های رواناب و رسوب جمع‌آوری شده از پلات‌ها در شکل 2 و 3 آورده شده است ملاحظه می‌گردد که وضعیت فرسایش بویژه با افزایش شیب تشدید می‌گردد. در اوقاتی از سال که زمین به شکل سنتی آیش نگه داشته می‌شود فرسایش به شدت تشدید گردیده است. همچنین در زمان‌های پس از آماده‌سازی زمین تا استقرار پوشش زراعی نیز فرسایش شدت یافته است. این امر در گندم پائیزه و در باران‌های پائیزه و در بهار تا زمان ساقه دهی مشهود است.

در کشت نخود دیم، که به منظور افزایش پتانسیل ذخیره رطوبت در اواخر پائیز زمین شخم زده شده (که آن را به اصطلاح محلی چله‌بری می‌نامند)، و تا بهار که شخم دوم و کشت انجام می‌شود، زمین لخت و فاقد پوشش بوده، لذا فرسایش شدید مشاهده شده است. از سوی دیگر با توجه به تنک بودن و ظرفیت کم نگهداشت آسمانه نخود دیم، وضعیت حادی را از نظر فرسایش به وجود آورد. در شیب 16 درصد، داده‌های رواناب و رسوب نشانگر تشدید فرسایش نسبت به پلات با شیب 12 درصد با مدیریت زراعی مشابه می‌باشد. دلیل این امر به طور واضح عدم نگهداشت رواناب توسط پشته‌های حاصل از شخم و در نتیجه شکستن آنها و فرسایش سطحی و شیاری شدید می‌باشد. بارندگی‌های اول هر سال به دلیل خشک بودن خاک روانابی ایجاد نمود و در نتیجه فرسایش هم بوقوع نپیوست. معه‌ذا زمان پیدایش و شروع رواناب بسته به شیب و مدیریت متغیر بود، زمان اوج وقوع رواناب و فرسایش در اواخر زمستان و شروع بارندگی‌های بهاره و قبل از استقرار پوشش گیاهی بود.

همچنین با توجه به اعمال مدیریت‌های مختلف و نیز لحاظ نمودن عامل زمان، پیچیدگی بیشتری بر فرآیند فرسایش در شیب‌های مختلف حاکم بود. ولی به هر حال

با افزایش شیب، رواناب زیاد شد. به عنوان مثال در پلات‌های شیب 20 درصد در ابتدای زمان شبیه‌سازی به دلیل پوشش آنها توسط مالچ کاه و کلش رواناب کم است. ولی با اعمال آیش و کشت بهاره نخود رواناب تشدید می‌شود. در سال دوم نیز به دلیل شخم پائیزه و رگبارهای بسیار شدید در بهار رواناب و رسوب به شدت در کلیه پلات‌ها افزایش یافته است. اما تغییرپذیری زمانی رواناب تابع مدیریت اعمال شده و نیز فصل رشد بوده است. آهنگ تشدید رشد رواناب در سال دوم عمدتاً به دلیل رگبارهای شدید آغاز بهار بود که باعث تخریب خاک و در نتیجه تشدید رواناب شد. خاک‌های اراضی با شیب 16 و 20 درصد بیشتر تحت تأثیر این تخریب قرار گرفتند.

با افزایش شیب میزان فرسایش افزایش یافت. در شیب 6 درصد در طول فصل پائیز و زمستان هیچ گونه فرسایشی مشاهده نشد. دلیل این امر کم بودن شیب و نیز پوشش کاه و کلش و بقایای سال قبل بود. با این همه با آغاز فصل بهار و اعمال شخم اولیه برای آماده‌سازی زمین، فرسایش آغاز شد. تناوب‌های رایج در منطقه دارای تأثیر چندگانه بر فرآیند وقوع فرسایش می‌باشند. از جمله نقاط ضعف آنها خالی ماندن و لخت شدن خاک در فصولی از سال بویژه اواخر زمستان و اوائل بهار است و این در حالی است که در این فصول نیز این اراضی جهت کشت انتظاری بهاره شخم خورده‌اند و یا کشت پائیزه هنوز مستقر نشده و زمین شخم خورده و لخت است. ضمن آنکه اکثر بارندگی‌های فرساینده نیز در این فصل می‌باشند. نبود گیاهان علوفه‌ای در تناوب از نقاط ضعف سیستم تناوبی موجود بود، این در حالی است که در سال‌های قبل جزء لاینفک تناوب بودند. نقاط قوت این تناوب نیز صرفاً تناوب غلات با بقولات است که می‌تواند منتج به تقویت خاک شود.



شکل 3- مقادیر تجمعی رسوب جمع‌آوری شده در پلات‌های زراعی (سه تکرار)

این در حالی است که این مقدار آستانه در دیگر پلات‌ها بیشتر و در شیب 6% حداکثر است یعنی تا بارندگی 9 میلیمتر رواناب واقع نخواهد شد ضمن آنکه شیب منحنی رواناب با افزایش بارش نیز کمتر از بقیه می‌باشد. بررسی مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در برآورد رواناب در جدول 3 نشان داد که با افزایش شیب دقت برآورد مدل نیز افزایش یافته است. به گونه‌ای که مقدار منفی شاخص ناش-ساتکلیف در دو شیب شش و 12 درصد نشان از کمترین کارایی مدل در برآورد رواناب در این دو شیب داشت. علاوه شاخص‌های خطا نظیر مجذور میانگین مربعات خطا نیز در این دو شیب حداکثر بود و نشان داد که مقادیر رواناب با متوسط خطای برآورد 3/16 و 4/82 لیتر در هر پلات به ترتیب در شیب‌های شش و 12 درصد برآورد می‌شود. این در حالی است که کینساید (2002) بیان می‌دارد که مدل WEPP در برآورد رواناب در نقاط با شیب کم از دقت بیشتری نسبت به اراضی با شیب زیاد برخوردار است. بیشترین کارایی مدل

اگر چه با افزایش شیب در کاربری دیم مقادیر ارتفاع رواناب شبیه‌سازی شده افزایش یافته ولی حداکثر مقدار ارتفاع رواناب شبیه‌سازی شده مربوط به شیب 12 درصد با آیش و شخم در خلاف جهت شیب است که با مقادیر ثبت شده در پلات‌ها همانطور که بعداً شرح داده خواهد شد، منطبق است. این امر نیز نشانگر نقطه قوت و توانمندی بخش هیدرولوژی سطحی مدل است و این نتیجه را می‌دهد که شخم خلاف جهت شیب باعث تشدید تخریب و افزایش رواناب شده است. کمترین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده مربوط به شیب 16 درصد با تناوب گندم-آیش-نخود دیم است. روندیابی مقادیر رواناب ایجاد شده در بارندگی‌های مختلف در شکل 4 نشان می‌دهد که با افزایش بارندگی مقادیر رواناب نیز افزایش یافت. در شیب 12 درصد با شخم خلاف جهت شیب کمترین بارندگی با مقدار تجمعی 5 میلی‌متر برای شروع رواناب لازم بود به عبارتی حداکثر مقاومت پشته‌های ناشی از شخم در مقادیر تا 5 میلیمتر بارش می‌تواند باشد.

جیمز و همکاران (2001) که حساسیت نسخه دامنه مدل WEPP را در پیش‌بینی رواناب به هدایت هیدرولیکی مؤثر و ویژگی‌های خاک مربوط دانسته‌اند تفاوت دارد. یافته‌های فولتز و همکاران (2011) حاکی از دامنه تغییرات پیش‌بینی رواناب توسط مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، بسته به شرایط فرسایش‌پذیری و نفوذپذیری، بین 73 تا 85 درصد بود.

بررسی نمودارهای پخشی بین مقادیر مقایسه‌ای و برآوردی (شکل 5) نشان داد که دقت پیش‌بینی یا انطباق داده‌های مشاهده‌ای با برآوردی، با افزایش شیب افزایش یافت به نحوی که ضریب تبیین با افزایش شیب از حدود 0/65 به 0/85 ارتقاء یافت. تحقیقات ژانگ و همکاران (1995) در پلات‌های رواناب نیز نشان داد که ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در حالت تک‌رگبار، فصلی و متوسط سالانه رواناب به ترتیب برابر 0/77، 0/76 و 0/87 بود.

پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد که در شیب 16 درصد که سیستم خاکورزی به صورت شخم خلاف جهت شیب حاکم است، بیشترین فرسایش رخ داده و در شیب 12 درصد و با مدیریت تناوب گندم دیم - آیش - نخود دیم حداقل فرسایش بوقوع پیوست است. همچنین میزان متوسط سالانه فرسایش در شیب 12 درصد حتی از شیب شش درصد نیز کمتر خواهد بود (شکل 6). بررسی شاخص‌های ارزیابی و کارایی مدل در جدول 3 نشان داد که مدل در برآورد فرسایش از دقت چندان زیادی برخوردار نیست مورد استثناء پلات‌های شیب 16 درصد بود که ضریب کارایی ناش-ساتکلیف در این پلات‌ها حداکثر بود که با یافته‌های پیری و همکاران (2007) مطابقت دارد. تحقیقات سریواستانا و همکاران (2011) نیز نشان از ضریب کارایی ناش-ساتکلیف بین 0/5 و 0/85 و مقدار متوسط 0/67 برای مدل WEPP بود. کمترین کارایی مدل در پلات‌های شیب 20 درصد با خطای کم برآوردی حدود 7/5 کیلوگرم در پلات در سال بود

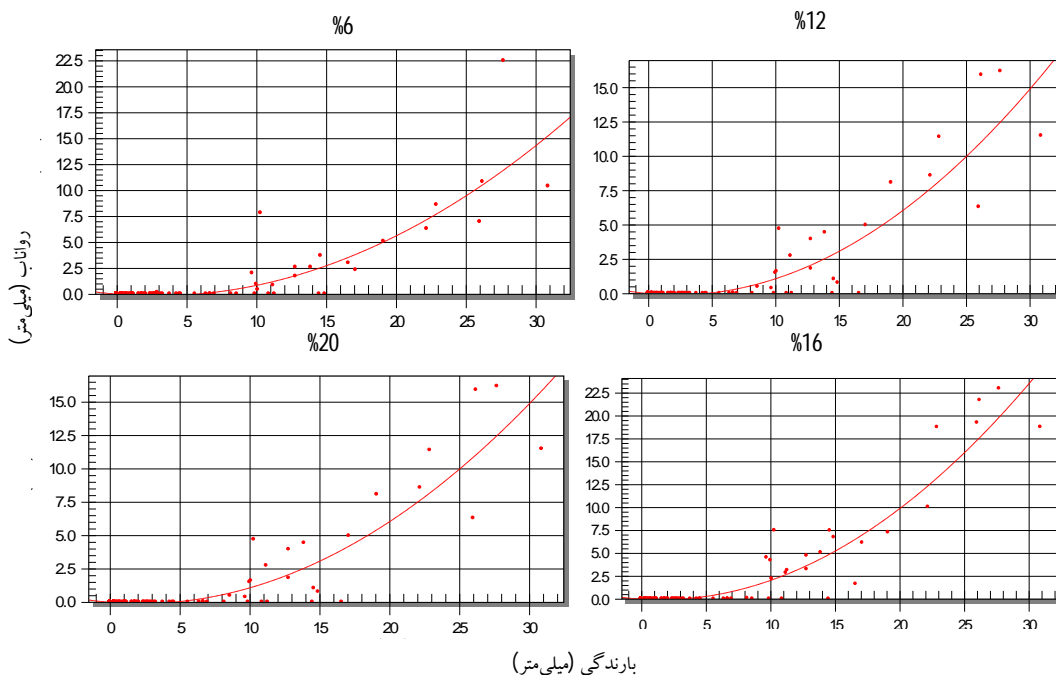
در پیش‌بینی رواناب مربوط به شیب 20% بود که با ضریب ناش-ساتکلیف برابر 0/77 و کمترین مقدار شاخص‌های خطای MAE و RMSE، بیشترین دقت برآورد را داشت. در تحقیق پیری و همکاران (2007) نیز ضریب کارایی ناش و ساتکلیف را برای مدل WEPP برابر 0/76 به دست آمد.

ارزیابی وضعیت شاخص MBE که معیاری از اریبی برآورد مدل می‌باشد نیز نشان داد که مدل در اغلب پلات‌ها، به استثنای پلات‌های شیب شش درصد، به درجات متفاوتی در برآورد رواناب کم برآورد دارد. بیشترین اریبی برآورد در شیب 12 درصد که 6/24 لیتر کم برآورد را نشان می‌داد و کمترین آن در شیب 20 درصد بود، که حدود 0/4 لیتر کم برآورد را نشان می‌داد. همانگونه که از نمودارهای شکل 5 پیداست کم برآوردی در پلات‌های شیب 12 و 16 درصد بیشتر در وقایع رواناب با حجم بالا اتفاق می‌افتد. همچنین مدل در برآورد رواناب در شیب 6 درصد نیز با داشتن وقایع رواناب با حجم کم و فواصل طولانی‌تر بیشترین بیش‌برآورد را در پیش‌بینی رواناب نشان داد. این بیش‌برآوردی در مقادیر رواناب بزرگ بیشتر است که در تضاد با یافته‌های گیدی و آلبرت (1996) است که نشان از آن بود که مدل WEPP در بارندگی‌های با مقادیر رواناب پائین، رواناب و فرسایش را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زد. همچنین بررسی‌های بریزر و همکاران (2000) نیز نشان داد که مدل WEPP در مقادیر وقایع رواناب بزرگ کم برآورد داشته و در وقایع کوچک بیش‌برآورد دارد. همچنین یافته‌های گیدی و همکاران (2000) نشان از خطای بیش‌برآورد مدل در مقادیر کم رواناب بود. در تحقیق هلیل (2002) نیز مدل WEPP مقادیر رواناب را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای به میزان 15/5 درصد بیش‌برآورد می‌نمود.

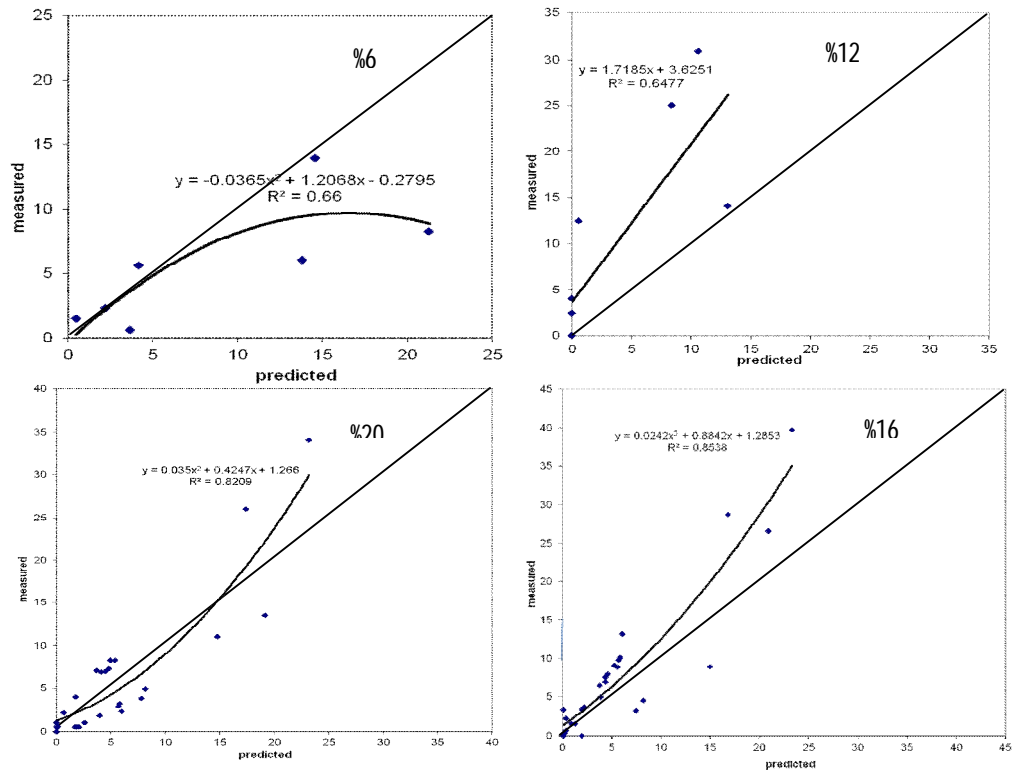
تغییرپذیری شدید در شاخص‌های ارزیابی در شیب‌های مختلف نشان از اثرات مدیریت رایج و سنتی حاکم بر برخی شیب‌ها می‌باشد که منبع عدم اطمینان در برآورد رواناب شده است. نتایج این تحقیق با یافته‌های

جدول 3- شاخص‌های ارزیابی مدل WEPP در برآورد رواناب و فرسایش

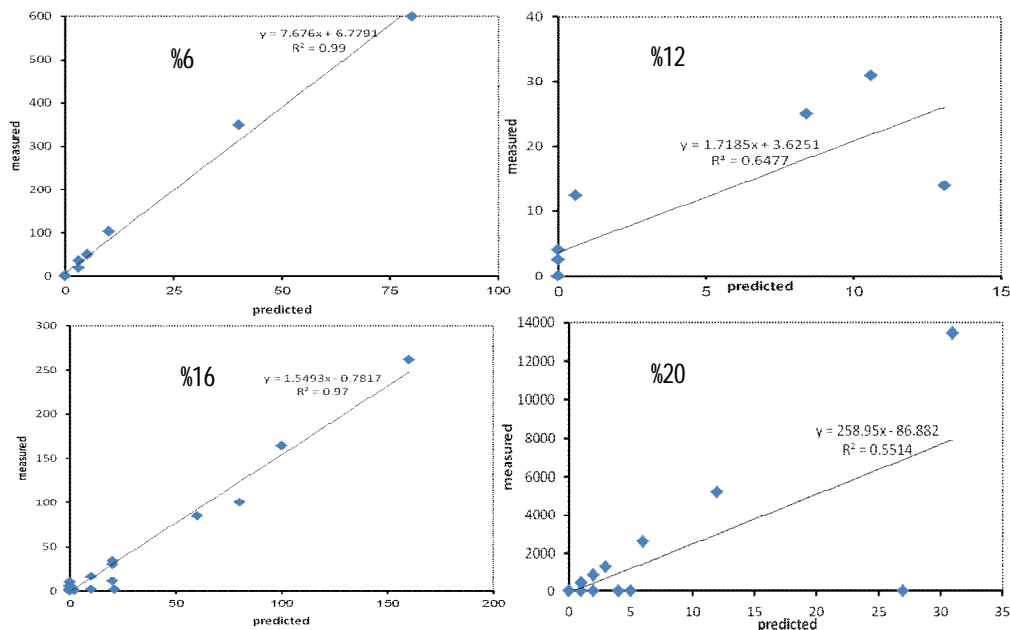
%20	%16	%12	%6	
رواناب				
2/75	3/19	6/24	3/87	MAE
-0/41	-2/17	-6/24	3/16	MBE
0/67	0/83	4/82	3/16	RMSE
0/77	0/72	-1/93	-2/74	NSE
فرسایش				
7452/25	10/75	124/77	74/48	MAE
-7451/41	-8/31	-124/77	-71/62	MBE
4604/46	4/17	83/02	43/99	RMSE
-0/09	0/83	-0/29	0/06	NSE



شکل 4- رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده با بارندگی در شیب‌های مختلف



شکل 5- نمودار پخشى مقادير مشاهده‌اى رواناب (بيتر) و برآوردى توسط مدل WEPP در شيب‌هاى مختلف



شکل 6- نمودار پخش‌ی مقادیر محاسبه‌ای فرسایش در مقابل مقادیر برآوردی (گرم) مدل WEPP در شیب‌های مختلف

(1995) است. با این حال، همانطور که از نمودارهای یاد شده و همچنین ارقام شاخص MBE در جدول (3-4) پیداست، مدل در همه شیب‌ها و همه مدیریت‌ها به درجات متفاوت کم‌برآورد نشان داده است.

نتیجه‌گیری کلی

تنوع اقدامات مدیریتی در دیمزارها باعث تغییرات شدید میزان فرسایش در این اراضی شده است. عمده مقادیر فرسایش در اواخر زمستان و اوائل بهار اتفاق می‌افتد که خاک لخت ولی بارندگی رواناب ساز زیاد است. مدل در برآورد رواناب در بیشتر شیب‌ها و مدیریت‌ها کم‌برآورد داشته به نحوی که متوسط خطا در این بخش بسته به شیب و نوع مدیریت بین 0/7 تا 4/8 لیتر در هر پلات در سال بود. همچنین خطای برآورد فرسایش به مراتب بیشتر است به نحوی که در همه موارد خطای کم‌برآوردی را نشان داده و خطای برآورد در شیب 20 درصد زیاد بود. به نظر می‌رسد این منبع عدم اطمینان در کاربری زراعی مربوط به عدم توانایی مدل در روندیابی اقدامات مدیریتی نظیر شخم در جهت شیب باشد. چرا که این روند در شیب‌های یاد شده بویژه در مواردی که شخم پاییزه جهت کشت گندم دیم انجام می‌شد، بیشتر بود.

که رقم بسیار بالایی را نشان داد. این خطا به طور اخص می‌تواند ناشی از این باشد که در این شیب، به دلیل شخم در جهت شیب در سال دوم، در چند بارندگی فرسایش بسیار شدیدی حاکم شد. این امر حکایت از آن دارد که مدل در برآورد فرسایش در شرایط مدیریتی شخم در جهت شیب در شیب‌های تند، ناتوان می‌باشد. همچنین مقادیر اندک و منفی شاخص ناش - ساتکلیف نیز موید کارایی پائین مدل در برآورد فرسایش بویژه در شرایط حاکم بر دو شیب 12 و 20 درصد بود.

شاخص ارزیابی برآورد MBE نشان داد که مدل در همه شیب‌ها و در کلیه مدیریت‌ها، کم‌برآوردی داشت. این یافته‌ها با نتایج پیری و همکاران (2007) همخوانی دارد. بعلاوه در یک واقعه بارندگی شدید، مدل مقدار فرسایش را 0/18 تن در هکتار برآورد نمود این در حالی بود که مقدار اندازه‌گیری شده 1/68 تن در هکتار بود. بیشترین دقت برآورد فرسایش مدل در این آزمایش مربوط به شیب 16 درصد است نمودار پخش‌ی مقادیر برآوردی در مقابل مقادیر مشاهده‌ای در شکل 6 نشان داده شده است. ضریب تبیین نمودار مربوطه 0/97 است که به مراتب بیش از مقدار 1/36 تحقیقات ژانگ و همکاران

نفوذپذیری است. لذا ضروری است با انجام تحقیقاتی پارامترهای لازم جهت تعیین عواملی که مدل به آنها حساس است، تعیین و کالیبره شوند.

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که حساسیت بالای این مدل در تخمین و ارائه داده‌های زبری، پوشش و ارقام فرسایش‌پذیری شیاری، بین شیاری، تنش برشی بحرانی و

فهرست منابع:

1. 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.
2. Brazier, R.E. and 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). pp. 825-845.
3. 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.
4. Elliot, W.J. 2004. WEPP Internet Interfaces for Forest Erosion Prediction. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA). 40(2):299-309.
5. 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
6. Flanagan, D.C. and Nearing M.A. (ed.). 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Technical Documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, IN, USA.
7. 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.
8. 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.
9. 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
10. Halil, K., 2002. Comparison of Erosion and Runoff Predicted by WEPP and AGNPS Models Using a Geographic Information System. Turk J Agric. 26:261-268
11. 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.
12. Laflen, J.M., D.C. Flanagan and B.A. Enge. 2008. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. Journal of the American Water Resources Association. 40(2):289-294.
13. 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.
14. Nash, J.E. and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, 1: A discussion of principles. J. Hydrol. 10:282-290.
15. 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.

16. 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
17. Wilcox, B.P. and Simanon, J.R. 1996. Predicting runoff in semiarid woodlands: Evaluation of the WEPP model. USDA- ARS. TEKTRAN.
18. 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. Am. Soc. Ag. Eng. Paper 95-2381. ASAE Meeting, Chicago, IL June 18-23, 1995.