

ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از شبیه‌ساز باران

مجید محمودآبادی^{1*}، حسینقلی رفاهی و حسن روحی‌پور

استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mahmoodabadi@mail.uk.ac.ir

استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران؛ rafahi@ut.ac.ir

دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، تهران؛ rouhi@rifr-ac.ir

چکیده

فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع رایج فرسایش در اراضی کشاورزی محسوب می‌شود. تحقیق حاضر به ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از شبیه‌ساز باران می‌پردازد. به این منظور، سه شدت 25، 50 و 75 میلی‌متر در ساعت باران در چهار شیب 2/5، 5/0، 7/5 و 10/0 درصد فلود روی سه نمونه خاک زراعی با توزیع اندازه ذرات متفاوت ایجاد شد. ارزیابی مدل در دو حالت بدون واسنجی و با واسنجی، هر یک در دو شرایط شامل؛ تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و تمامی تنش برشی‌ها انجام شد. نتایج ارزیابی مدل بدون واسنجی نشان داد که در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، مدل WEPP تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد. با در نظر گرفتن تنش برشی‌های بیش‌تر از آستانه به علت نقش رواناب در جدانمودن ذرات، میزان اریبی مدل کاهش یافت. پس از واسنجی، مقادیر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری پایه (K_{ti})، برای تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و تمام تنش برشی‌ها به ترتیب بین 6/44 تا 11/05 و 3/57 تا 9/56 برابر کم‌تر از مقادیر تخمینی مدل، برآورد شد. همچنین مشخص شد که کارایی مدل در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری، بستگی به خاک دارد. ارزیابی مدل پس از واسنجی نشان داد که مدل WEPP، تمایل به بیش‌برآورد مقادیر خیلی کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ دارد. از طرفی، با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها در مقایسه با تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، دقت مدل کاهش یافت. در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و پس از واسنجی مدل به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی، ضریب تبیین (R²) به ترتیب 0/76 و 0/66 و ضریب کارایی به ترتیب 0/68 و 0/58 به دست آمد. با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها، مقدار ضریب تبیین (R²) به ترتیب 0/67 و 0/60 و ضریب کارایی به ترتیب 0/55 و 0/60 تعیین شد. یافته‌های این تحقیق لزوم ارائه روشی استاندارد برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بین‌شیاری و همچنین تشخیص فرسایش غالب بر اساس تنش برشی آستانه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی آستانه، شبیه‌سازی باران، فرسایش‌پذیری بین‌شیاری، واسنجی مدل.

مقدمه

فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع رایج فرسایش در اراضی زراعی و کشاورزی محسوب می‌شود (کینل،

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرمان، بلوار 22 بهمن، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی، کد پستی 76169-133

* دریافت: فروردین 1391 و پذیرش: آبان 1391

اصلاحی از فرسایش‌پذیری بین‌شیاری پایه یا K_{ib} به‌دست می‌آید) بر حسب $(kg\ s\ m^{-4})$ ، I_e شدت بارندگی مؤثر $(m\ s^{-1})$ ، Q_{ir} شدت جریان رواناب بین‌شیاری $(m\ s^{-1})$ ، SDR_{RR} نسبت تحویل رسوب از نواحی بین‌شیاری، F_{nozzle} فاکتور اصلاحی برای در نظر گرفتن تغییرات انرژی برخورد قطرات در نازل‌های آبیاری بارانی، R_s فاصله بین شیاریها (m) و W عرض شیاری (m) است (فاستر و همکاران، 1995).

پارامتر K_{iadj} با اعمال ضرایب اصلاحی در فرسایش‌پذیری بین‌شیاری پایه (K_{ib}) تعیین می‌شود. در خاک‌های زراعی، این ضرایب شامل شش عامل آسمانه گیاهی، پوشش سطحی، ریشه‌های گیاهی، سله سطحی، یخبستن و ذوب شدن و شیب ناحیه بین‌شیاری است. با توجه به شرایط حاکم بر این تحقیق، پارامتر K_{iadj} بر اساس ضریب اصلاحی اثر شیب و از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود.

(2)

$$K_{iadj} = K_{ib} (CK_{isl}) \quad (kg\ s\ m^{-4})$$

که در آن؛ CK_{isl} پارامتر اصلاحی اثر شیب بین‌شیاری و بدون بعد است. مقدار K_{ib} با استفاده از روابطی که از آزمایش‌های صحرائی به‌دست آمده، برآورد می‌گردد. بر این اساس، برای خاک‌های زراعی که حاوی 30 درصد یا بیشتر شن باشند، K_{ib} از رابطه زیر تعیین می‌شود:

(3)

$$K_{ib} = 2728000 + 1921000Q(vfs) \quad (kg\ s\ m^{-4})$$

که در آن؛ vfs بخش شن خیلی ریز در خاک سطحی است. اگر میزان شن خیلی ریز بیشتر از 40 درصد باشد، مقدار vfs برابر با 0/4 در نظر گرفته می‌شود. پارامتر CK_{isl} نیز از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود (لیبنو و همکاران، 1990):

$$CK_{isl} = 1.05 - 0.85 \exp(-4 \sin \theta) \quad (4)$$

که در آن؛ θ زاویه شیب بین‌شیاری است. پارامتر CK_{isl} برای سطوح افقی برابر با 0/2 و برای شیب 100 درصد برابر با 1/0 به‌دست می‌آید به طوری که در شیب‌های بیش از 50 درصد افزایش اندکی دارد.

در ارتباط با ارزیابی مدل WEPP تحقیقات متعددی توسط محققان انجام شده است. در این زمینه، نتایج متفاوتی از کم‌برآورد (سوتو و دیازفایروز، 1998؛ یو و همکاران، 2000؛ پیری و همکاران، 2007) و یا بیش-برآورد (یو و رزول، 2001؛ کینکید، 2002) مدل گزارش شده است. گروش و جارت (1994) دریافتند که مقادیر

2005؛ لیو و همکاران، 2006) که با پیشرفت‌های اخیر در زمینه مدل‌سازی فرآیندهای فرسایش، از فرسایش شیاری تفکیک شده است (فاستر و همکاران، 1981). فرسایش بین‌شیاری، در اثر جداشدن و انتقال ذرات خاک توسط قطرات باران (مایر و هارمون، 1984) و یا جریان سطحی کم‌عمق (بارتز و روز، 2002) اتفاق می‌افتد. این نوع فرسایش تأثیر معنی‌داری بر تلفات خاک به ویژه ذرات ریز و البته حاصلخیز دارد و می‌تواند باعث آلودگی آب-های سطحی توسط مواد شیمیایی کشاورزی گردد (باجراچاریا و همکاران، 1992). شدت بارندگی، شیب، شدت رواناب، عمق جریان و نوع خاک به همراه اثرات متقابل بین آن‌ها، مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش بین-شیاری محسوب می‌شوند. قطره باران نه تنها باعث جداشدن ذرات خاک می‌شود، بلکه انتقال رسوب به وسیله جریان سطحی کم‌عمق را نیز افزایش می‌دهد (زانگ و همکاران، 1998).

با وجود این‌که معادله جهانی تلفات خاک (USLE)¹، بیش‌ترین استفاده را در زمینه برآورد فرسایش در اراضی کشاورزی داشته (رینارد و همکاران، 1997) و کاربرد آن با موفقیت‌های زیادی قرین بوده، اما استفاده از آن با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. این در حالی است که مدل WEPP²، یکی از محصولات جدید فن‌آوری برآورد فرسایش است که علاوه بر توانایی‌های معادله جهانی، قابلیت‌های زیادی نیز به آن افزوده است (یو و رزول، 2001). در مدل WEPP، فرآیندهای فرسایش بین‌شیاری، شیاری و رسوبگذاری در نسخه دامنه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نسخه، فرسایش و رسوبگذاری خالص با استفاده از معادله پیوستگی رسوب در حالت پایدار محاسبه می‌شود. همچنین، مفهوم فرسایش بین‌شیاری به صورت فرآیند حمل رسوب به مسیرهای متمرکز جریان (شیاری) مدل‌سازی شده است. فرآیندهای جداشدن، حمل و رسوبگذاری در این ناحیه به طور جداگانه برآورد نمی‌گردند، بلکه تنها در قالب یک معادله تولید رسوب محاسبه می‌شوند. شدت فرسایش بین‌شیاری از رابطه زیر به‌دست می‌آید (فاستر و همکاران، 1995):

(1)

$$D_i = K_{iadj} I_e Q_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} \left[\frac{R_s}{W} \right] \quad (kg\ m^{-2}\ s^{-1})$$

که در آن؛ D_i شدت فرسایش بین‌شیاری یا جریان عرضی رسوب از نواحی بین‌شیاری $(kg\ m^{-2}\ s^{-1})$ ، K_{iadj} فرسایش‌پذیری بین‌شیاری اصلاح شده (با اعمال ضرایب

1. Universal Soil Loss Equation

2. Water Erosion Prediction Project

خورده پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج و مزرعه آیش در روستای عباس‌آباد منطقه سهیلیه، نمونه‌برداری شد. از این به بعد این سه نوع خاک به ترتیب با اسامی خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه ذکر می‌شوند. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در معرض هوا خشک شد و سپس از الک با چشمه 10 میلی‌متر عبور داده شد. معمولاً برای گذراندن خاک از الک، از الک‌های با اندازه چشمه کوچک‌تر از 10 میلی‌متر استفاده نمی‌شود تا خاک به شرایط طبیعی شبیه‌تر باشد (زانگ و همکاران، 2005).

شدت‌های مختلف بارندگی شامل سه شدت 25، 50 و 75 میلی‌متر در ساعت در چهار شیب 2/5، 5/0، 7/5 و 10/0 درصد فلووم روی سه نمونه خاک زراعی ایجاد شد. بدین ترتیب که پس از انتقال نمونه‌ها به داخل فلووم، تسطیح و به آرامی از زیر اشباع شد. پس از 24 ساعت و اطمینان از اشباع نمونه‌ها، آب تغلی از طریق سیستم زهکش، تخلیه می‌شد. سپس، فلووم در شیب مورد نظر تنظیم و باران با شدت ثابت، ایجاد شد. در هر آزمایش با استفاده از کرنومتر و ظروف جمع‌آوری، از رواناب حاوی رسوب خروجی از انتهای فلووم و در فواصل زمانی مشخص نمونه‌گیری می‌شد. فواصل زمانی نمونه‌گیری از رواناب برای دو دقیقه ابتدای آزمایش هر 30 ثانیه یکبار، تا دقیقه پنجم، هر یک دقیقه یکبار و در ادامه تا پایان آزمایش هر پنج دقیقه یکبار بود. مدت هر آزمایش بسته به زمان لازم برای رسیدن به حالت پایدار، بین 30 تا 50 دقیقه در نظر گرفته شد. سرعت جریان به روش رنگ‌سنجی و عمق رواناب در چند تکرار تعیین شد. بدین منظور، با استفاده از پرمنگنات پتاسیم محلولی پررنگ تهیه و پس از تزریق به جریان رواناب، زمان لازم برای طی مسیر یک متر طول فلووم در چندین تکرار اندازه‌گیری می‌شد. با داشتن دبی حجمی و سرعت رواناب، عمق جریان نیز محاسبه شد. نمونه‌های رواناب حاوی رسوب، جمع‌آوری و پس از خشک نمودن در آون، شدت جریان و غلظت رسوب در زمان‌های مختلف رخداد تعیین شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها

به منظور بررسی نقش ویژگی‌های خاک‌ها بر نتایج حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی باران، ویژگی‌های مهم خاک‌ها تعیین شد. بافت به روش هیدرومتری، توزیع اندازه ثانویه ذرات در حالت تر با استفاده از شیکر الک و سری الک، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه اندازه‌گیری شد (پیچ و همکاران، 1992 a). همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور و همکاران (1952)، درصد سدیم تبدلی (ESP) از طریق اندازه‌گیری

برآوردی مدل WEPP به‌خصوص در شیب‌های بیش از 30 درصد، کم‌تر از مقادیر واقعی تلفات خاک بوده تا جایی‌که در شیب 85 درصد، به حدود نصف آن می‌رسد. همچنین کینکید (2002) ابراز داشت که این مدل، تمایل به بیش‌برآورد شدت رواناب و فرسایش دارد. در تحقیق دیگری، اسدی و همکاران (1386) تمایل مدل WEPP در بیش‌برآورد مقادیر کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ را گزارش کردند. برخی از این محققان به لزوم واسنجی مدل به‌منظور برآورد مطلوب‌تر اشاره داشته‌اند (یو و همکاران، 2000؛ پیری و همکاران، 2007). با توجه به اهمیت فرسایش بین‌شیاری در اراضی کشاورزی، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از شبیه‌سازی باران در دو حالت بدون واسنجی و با واسنجی انجام شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های شبیه‌ساز باران

تحقیق حاضر در آزمایشگاه فرسایش مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شد. سیستم بارش متشکل از یک نازل جارویی¹ می‌باشد که روی چارچوب اصلی در ارتفاع چهار متر نصب شده است (دلتا لب، 1992). فلووم مورد استفاده به ابعاد یک متر در یک متر و دارای سیستم زهکش است که قابلیت تغییر و تنظیم شیب را نیز دارد. با استفاده از این شبیه‌ساز می‌توان باران‌هایی در دامنه شدت 20 تا 150 میلی‌متر در ساعت ایجاد نمود. میانه حجمی قطر قطرات 1/5 میلی‌متر، ضریب یکنواختی شدت بارندگی بین 90 تا 96 درصد و سرعت سقوط نهایی و انرژی جنبشی باران به ترتیب 5/50 متر بر ثانیه و 15/125 ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران است. تمام آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در حالت خاک دارای زهکش انجام شد. بدین ترتیب، رفتار خاک‌های مورد مطالعه در برابر فرآیندهای نفوذ و فرسایش به شرایط طبیعی شباهت بیشتری پیدا خواهد کرد.

آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

با توجه به اهمیت نمونه‌برداری، سعی شد تا خاک‌هایی با خصوصیات کاملاً متفاوت، انتخاب گردد. انتخاب خاک بر مبنای توزیع اندازه ذرات (اولیه و ثانویه) و پایداری خاکدانه انجام شد. نمونه‌برداری از عمق لایه شخم (15 سانتی‌متر سطحی) اراضی زراعی انجام شد. بر این اساس، سه نوع خاک به‌ترتیب از مزرعه‌ای زیر کشت گندم در روستای بختیار منطقه هشتگرد، مزرعه شخم-

¹ Oscillating nozzle

ضمنی، میزان خطای مدل قابل تعیین است. در روش مطلوب‌سازی سعی بر آن است تا خطای این تابع را برای داده‌های آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای به حداقل رساند (نیرینگ و همکاران، 1989). علاوه بر روش مطلوب‌سازی، از میانگین K_{fb} سایر آزمایش‌ها نیز در برآورد K_{fb} استفاده گردید. در نهایت، کارایی مدل (ME) از طریق معادله زیر تعیین شد (نش و ساتکلیف، 1970):

$$M.E = 1 - \frac{\sum(Y - O)^2}{\sum(O - \bar{O})^2} \quad (5)$$

که در آن؛ Y مقادیر برآوردی مدل، O مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{O} میانگین مشاهدات یا اندازه‌گیری‌ها است. این پارامتر بین $-\infty$ و یک متغیر است. مقادیر منفی ME نشان‌دهنده این است که در نظر گرفتن متوسط مشاهدات، معیار بهتری نسبت به برآورد مدل به‌دست می‌دهد (یو و رزول، 2001). در صورتی که ME برابر با یک باشد، نشان می‌دهد که مدل قادر است تمام مقادیر اندازه‌گیری شده را برآورد نماید و اگر برابر با صفر باشد، یعنی این‌که یک متوسط از مقادیر اندازه‌گیری شده به اندازه مقادیر برآوردی مدل، قابل اعتماد است (زانگ و همکاران، 2005).

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

جدول (1) برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به رغم اندازه ریزتر ذرات اولیه در خاک هشتگرد، میانگین وزنی قطر برای این خاک (0/77 میلی - متر) بزرگ‌تر از خاک‌های دانشکده و سهیلیه (به ترتیب با 0/33 و 0/19 میلی‌متر) بود. این روند عکس، در مورد دو خاک دیگر نیز وجود داشت. خاک‌های مورد مطالعه فاقد سنگریزه و گچ بوده و مقادیر کربن آلی که در پایداری خاکدانه عامل مهمی به حساب می‌آید، در خاک هشتگرد بیش‌تر و در خاک سهیلیه کم‌تر بود. درصد سدیم تبادلی و هدایت الکتریکی نیز کم و بیش در هر سه خاک کم و مقدار کربنات کلسیم در خاک هشتگرد بیش از دو خاک دیگر بود.

ارزیابی مدل WEPP بدون واسنجی

مقدار K_{fb} که با استفاده از رابطه 3 محاسبه شد، برای خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب 8500605، 9187683 و 9826735 کیلوگرم ثانیه بر توان چهارم متر ($kg \ s \ m^{-4}$) به‌دست آمد. با توجه به ساختار رابطه مورد استفاده، تنها دلیل تفاوت ضریب K_{fb} در خاک‌های مورد مطالعه، مقادیر مختلف شن خیلی ریز

سدیم تبادلی با استفاده از فلیم فوتومتر و مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی تعیین شد (بیچ و همکاران، 1992 b). به علاوه، واکنش خاک (pH) در گل اشباع، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع، کربن آلی به روش والکی و بلاک (1934)، آهک به روش تیتراسیون و گچ به روش استون اندازه‌گیری شد (پانسو و گاتیرو، 2006).

ارزیابی مدل WEPP

در مدل WEPP برای تفکیک فرسایش بین‌شیاری از شیاری، از پارامتر تنش برشی آستانه استفاده می‌شود. در مقادیر کم‌تر از آستانه، فرسایش از نوع بین‌شیاری و در مقادیر بیش‌تر از آن که جریان رواناب متمرکز می‌شود، فرسایش شیاری در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در هیچ یک از آزمایش‌ها، در سطح خاک شیاری مشاهده نشد، ارزیابی مدل WEPP در این تحقیق در دو حالت شامل؛ تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و تمامی تنش برشی‌ها انجام شد. همچنین، ارزیابی مدل در دو حالت بدون واسنجی و با واسنجی صورت گرفت. در حالت اول، با توجه به سیستم شبیه‌سازی باران و شرایط حاکم بر تحقیق حاضر، ضرایب چهارگانه SDR_{RR} ، F_{Nozzle} ، R_s و W در معادله 1 برابر با واحد فرض شدند. همچنین، ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری اصلاح شده (K_{iadj}) در رابطه 2، تنها بر اساس عامل شیب اصلاح شد که عامل شیب نیز با استفاده از معادله 4 به‌دست آمد. پارامتر فرسایش‌پذیری مبنا (K_{fb}) با توجه به ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه، با استفاده از رابطه 3 و با توجه به درصد شن خیلی ریز محاسبه شد. در نهایت، شدت فرسایش بین‌شیاری (D_i)، با استفاده از رابطه 1 تعیین شد. به منظور واسنجی شدت فرسایش بین‌شیاری، ارزیابی معادله 1 به روش جک نایفینگ (شائو و تو، 1995) انجام شد. در این راستا، پس از تعیین K_{fb} ، مقدار آن برای هر آزمایش (رخداد بارش)، یکی یکی از مجموعه K_{fb} های مربوط به آن خاک کنار گذاشته شد. سپس با استفاده از پارامتر K_{fb} مربوط به سایر آزمایش‌ها، مقدار آن مجدداً برآورد شد. به منظور برآورد مجدد K_{fb} ، از دو روش مطلوب‌سازی¹ (بلاو و همکاران، 1988) و میانگین‌گیری استفاده شد. در ادامه از طریق معادله 2 مقدار K_{iadj} با استفاده از دو پارامتر شیب و ضریب K_{fb} برآوردی برای هر آزمایش، محاسبه و در نهایت شدت فرسایش بین‌شیاری برای آن رخداد از معادله 1 محاسبه شد. در روش مطلوب‌سازی پارامتر مجموع مربعات خطا به عنوان تابع ضمنی² به کار برده شد. با استفاده از تابع

1. Optimization

2. Objective function

مبنا (K_{ib}) برای هر آزمایش محاسبه شد. برای خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه مقدار میانگین K_{ib} در تنش برشی‌های کمتر از آستانه، به ترتیب 769027، 1425872 و 1416950 کیلوگرم ثانیه به توان چهارم متر ($kg\ s\ m^{-4}$) و در تمامی تنش برشی‌ها به ترتیب 888914، 2285248 و 2751235 کیلوگرم ثانیه به توان چهارم متر به دست آمد. این مقادیر بسیار کم‌تر از مقادیر برآوردی با استفاده از ویژگی‌های خاک (معادله 3) می‌باشد. به نحوی که مقادیر K_{ib} برای تنش برشی‌های کمتر از آستانه و تمامی تنش برشی‌ها به ترتیب بین 6/44 تا 11/05 و 3/57 تا 9/56 برابر کم‌تر از مقادیر تخمینی از طریق ویژگی‌های خاک، برآورد شده‌اند.

پس از واسنجی مدل برای هر خاک، مقادیر برآوردی شدت فرسایش بین‌شیاری در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده، ترسیم و خط رگرسیون بر ابر نقاط برازش داده شد. جداول (2) و (3) نتایج ارزیابی مدل WEPP را پس از واسنجی به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی به ترتیب برای تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و همچنین تمامی تنش برشی‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف در مقادیر آماری مربوط به سه خاک مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که کارایی مدل در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری بستگی به نوع خاک داشته باشد. قبل از این نیز اسدی و همکاران (1386) شدت فرسایش بین‌شیاری برآوردی با استفاده از مدل WEPP را وابسته به خصوصیات خاک دانسته‌اند. در کل، خاک هشتگرد کم‌ترین مقدار فرسایش بین‌شیاری مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مقایسه میانگین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد که میانگین مقادیر حاصل از روش مطلوب‌سازی به واقعیت نزدیکتر بوده و میانگین مربعات خطای آن کم‌تر است. در مجموع، مقایسه دو جدول (2) و (3) همچنین دلالت بر این دارد که با در نظر گرفتن تنش برشی‌های کمتر از آستانه به جای تمامی تنش برشی‌ها، مقادیر نزدیک‌تر به واقعیت برآورد شده‌اند.

شکل‌های (3) و (4) مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده شدت فرسایش بین‌شیاری، به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی در دو حالت تنش برشی نشان می‌دهد. به‌طور کلی به نظر می‌رسد که در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی برتری چندانی بر یکدیگر ندارند، حال آن‌که در تمامی تنش برشی‌ها، روش مطلوب‌سازی روش مناسب‌تری برای واسنجی مدل می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مدل WEPP صرفنظر از خاک، تمایل به بیش-برآورد مقادیر خیلی کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ

است. فرسایش‌پذیری خصوصیتی دینامیکی است و لذا، در نظر گرفتن مقدار ثابت برای آن (نظیر K_{ib}) صحیح نیست (اقاسی و برادفورد، 1999). شکل‌های (1) و (2) مقادیر برآوردی مدل WEPP در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده شدت فرسایش بین‌شیاری را به ترتیب برای تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و تمامی تنش برشی‌ها نشان می‌دهد. با قراردادن مقادیر مختلف تنش برشی جریان در برابر شدت‌های فرسایش اندازه‌گیری شده، میزان تنش برشی آستانه برابر با 0/15 پاسکال تعیین شد. برای هر سه خاک مورد مطالعه و در هر دو حالت تنش برشی، مدل WEPP تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد، هر چند با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها، میزان آریبی مدل کاهش یافته است.

عدم لحاظ فرآیند ترسیب ذرات به صورت فرآیندی که همزمان با فرآیندهای جداشدن اتفاق می‌افتد، می‌تواند به عنوان یکی از دلایل بیش‌برآورد مدل WEPP مطرح باشد. همچنین اثرات متقابل بارندگی و رواناب، به صورت حاصلضرب این دو پارامتر (I و Q) با سهم یکسان ارائه شده است. به عبارتی، در این مدل هر دو عامل بارندگی و رواناب با توان یک بیان شده‌اند و بسته به شرایط حاکم بر سیستم فرسایش (ترکیب‌های مختلف بارندگی و رواناب)، اثر غالب هر یک در کنترل شدت فرسایش تنها به شکل رابطه خطی معکوس در نظر گرفته شده است. به علاوه، افزایش شدت جریان رواناب می‌تواند ناشی از افزایش شدت بارندگی باشد. بنابراین، در مدل WEPP اثرات بارندگی و رواناب به‌طور کامل از یکدیگر تفکیک نشده است. با در نظر گرفتن تنش برشی‌های بیش‌تر از آستانه (شکل 2) به علت نقش احتمالی رواناب در جدا نمودن ذرات، میزان آریبی مدل کاهش یافته است. همچنین، در فرسایش بین‌شیاری عمق جریان نیز در میزان جداشدن ناشی از قطرات باران اهمیت دارد (شاکرشنر و همکاران، 2005) که در مدل WEPP اثر آن بر فرآیند جداشدن، به‌طور مستقیم مد نظر قرار نگرفته است. این موضوع به‌طور ویژه توسط اسدی و همکاران (1386) مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. این محققان نشان دادند که مدل WEPP در شرایط بدون واسنجی، تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد و این‌که میزان آریبی بستگی به نوع خاک دارد.

ارزیابی مدل WEPP با واسنجی

همان‌طور که مطرح شد، با داشتن مقادیر شدت فرسایش بین‌شیاری، شدت بارندگی و شدت جریان در واحد سطح، پارامتر K_{indj} با استفاده از معادله 1 برآورد شد. سپس با استفاده از معادله 2، ضریب فرسایش‌پذیری

سازی تغییرات رواناب و تلفات خاک است. البته رواناب و تلفات خاک را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. آن‌ها همچنین عنوان داشتند که استفاده از این مدل نیاز به واسنجی دارد. مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی مدل WEPP و اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای تولید رسوب، توسط پیری و همکاران (2007) دلالت بر تمایل مدل به کم‌برآورد میزان فرسایش داشت. این محققان معتقدند که برآورد کم‌تر از مقادیر واقعی تولید رسوب در مدل WEPP ممکن است به عدم واسنجی پارامترهای فرسایش‌پذیری ارتباط داشته باشد. به‌طور مشابهی، اسدی و همکاران (1386) تمایل مدل WEPP در بیش‌برآورد مقادیر کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ را گزارش کرده‌اند. این محققان معتقدند که برهمکنش فرآیندهای ناشی از بارندگی و رواناب و همچنین در نظر نگرفتن اثر عمق آب در این مدل از عواملی هستند که چنین رفتاری را باعث می‌شود.

با توجه به اصل عدم قطعیت، مقادیر برآوردی مدل تا حدی نسبت به مقادیر واقعی یا اندازه‌گیری شده، متفاوت می‌باشند و لذا بر خط 1:1 کاملاً منطبق نمی‌شوند. در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و پس از واسنجی مدل به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی، ضریب کارایی به ترتیب 0/68 و 0/58 به‌دست آمد. این مقادیر با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها، به ترتیب 0/55 و 0/60 تعیین شد. مقایسه ضرایب کارایی مدل WEPP نشان می‌دهد با در نظر گرفتن تمام تنش برشی‌ها، روش مطلوب‌سازی روش بهتری است. یو و همکاران (2000) در بررسی اعتبارسنجی مدل WEPP روی یک خاک شنی، نشان دادند که متوسط ضریب کارایی مدل در برآورد رواناب و تلفات خاک با استفاده از ویژگی‌های خاک برابر با 0/02- و بعد از واسنجی آن، 0/66 بود. مقدار ضریب تبیین (R^2) متناظر نیز به ترتیب 0/57 و 0/81 به‌دست آمد.

مفاهیمی که در ارتباط با فرسایش بین‌شیاری توسعه یافته‌اند، گاهی غیردقیق بوده که یک علت آن وابستگی فرآیندهای فرسایش به نحوه اندازه‌گیری یا روش کار و نیز اعمال سلیقه در نوع معادله مورد استفاده است (آقاسی و برادفورد، 1999). ترومن و برادفورد (1995) معتقدند که معادله مورد استفاده، روش تحقیق، زمان و نیز میزان رطوبت اولیه خاک، همگی بر مقادیر محاسبه‌شده فرسایش بین‌شیاری تأثیر می‌گذارند. همچنین روش‌های آزمایشگاهی بررسی فرسایش، متأثر از سطح و حجم مورد آزمایش، شرایط مرزی کرت و روش آماده‌سازی خاک است که این موارد بر نتایج حاصله اثر می‌گذارد. از این روست که هیچ روش استاندارد برای

دارد. از طرفی با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها در مقایسه با تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، ضریب تبیین (R^2) کاهش یافته است. یکی از دلایل احتمالی این موضوع، حضور جریان رواناب در جدانمودن و انتقال ذرات است. کینل (2000) با بررسی نتایج مایر و هارمون (1984) عنوان داشت که در خاک‌هایی که حتی در آنها شیار ایجاد نمی‌شود، با افزایش طول شیب به خصوص اگر با افزایش درجه شیب نیز همراه باشد، غلظت رسوب افزایش می‌یابد. وی علت افزایش نقش درجه شیب به ویژه در شیب‌های تندتر از 10 درصد بر میزان تلفات خاک را ناشی از افزایش تنش برشی جریان بر شمرده (کینل، 2000). اسدی و همکاران (1386) نیز غالب بودن فرآیندهای ناشی از رواناب و برهمکنش مثبت بین این فرآیندها با فرآیندهای ناشی از بارندگی را از دلایل کم‌برآورد مدل WEPP در شیب‌های تندتر از 10 درصد عنوان داشته‌اند. با توجه به تغییر عمق آب با شیب و شدت بارندگی و اثر آن بر میزان فرسایش ناشی از بارندگی، این محققان همچنین اهمیت عمق آب در میزان برآورد این مدل را گزارش نموده‌اند.

لازم به ذکر است که در حین آزمایش ممکن است شیار قابل مشاهده‌ای تشکیل نشود و با توجه به برخورد قطرات باران به ویژه در عمق‌های کم آب، شیاریهای بسیار کوچکی نیز که ایجاد می‌شود، پایدار نباشند. بنابراین، به‌طور معمول (بر اساس مشاهدات در حین آزمایش)، فرسایش از نوع بین‌شیاری در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در واقع، تمرکز جریان در میکروریل‌ها¹ یا پرتوریل‌ها² تفاوت‌های چشمگیری در افزایش تولید رسوب از سطح مورد آزمایش را باعث می‌شود. تشخیص این‌که شیار تشکیل شده است یا خیر، با توجه به دینامیک فرسایش متأثر از باران، بسیار دشوار است. روحی‌پور و همکاران (2006) یکی از دلایل احتمالی برهمکنش منفی بین باران و رواناب برای یک خاک شنی لومی را ناشی از اثر باران در صاف و پُر نمودن شیارک‌ها دانستند.

در ارتباط با برآورد فرسایش بین‌شیاری مدل WEPP، نتایج متفاوتی از بیش و کم‌برآوردی آن توسط محققان گزارش شده است. سوتو و دیازفایروز (1998) ابراز داشتند که مدل WEPP تلفات خاک را با صحت قابل قبولی برآورد می‌کند، با این وجود مدل تمایل به کم‌برآورد مقادیر واقعی دارد. یو و همکاران (2000) با ارزیابی مدل WEPP دریافت که این مدل قادر به شبیه‌

1. Microrills
2. Protorrills

نزدیک‌تر به واقعیت برآورد شد. مقایسه میانگین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری‌شده، نشان داد که میانگین مقادیر حاصل از روش مطلوب‌سازی به واقعیت نزدیکتر بوده و میانگین مربعات خطای آن کم‌تر است. همچنین، واسنجی مدل نشان داد که مدل WEPP صرفنظر از خاک، تمایل به بیش‌برآورد مقادیر خیلی کوچک و کم‌برآورد مقادیر بزرگ دارد. از طرفی با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها در مقایسه با تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، دقت مدل کاهش یافت. در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه و پس از واسنجی مدل به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی، ضریب کارایی به ترتیب 0/68 و 0/58 به دست آمد. این مقادیر با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها، به ترتیب 0/55 و 0/60 تعیین شد.

مقایسه ضرایب کارایی مدل WEPP نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی تنش برشی‌ها، روش مطلوب‌سازی روش بهتری است. از دلایل خطای برآورد فرسایش بین‌شیاری توسط مدل WEPP می‌توان به (1) در نظر نگرفتن اثر عمق آب بر فرآیندهای ناشی از بارندگی، (2) در نظر نگرفتن برهمکنش واقعی بین دو عامل بارندگی و رواناب، (3) عدم توجه به فرآیند ترسیب ذرات در حین بارندگی در معادله فرسایش بین‌شیاری و (4) در نظر نگرفتن نقش رواناب در جدانمودن و انتقال ذرات در تنش برشی‌های بیش‌تر از آستانه اشاره نمود. در مجموع، یافته‌های این تحقیق لزوم ارائه روشی استاندارد و مورد قبول در سطح بین‌المللی برای تعیین و یا اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بین‌شیاری و همچنین تشخیص فرسایش غالب بر اساس تنش برشی آستانه را نشان می‌دهد.

تعیین یا اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بین‌شیاری وجود ندارد (ترومن و برادفورد، 1995). جتن و همکاران (1999) علت دقت کم مدل‌های برآورد فرسایش را به وجود اثرات متقابل شدید بین فرآیندهای فرسایش نسبت دادند که به طور کامل شناخته نشده‌اند. از طرفی، تعیین آستانه تنش برشی، اهمیت بسیار زیادی در تفکیک فرآیندهای فرسایش دارد. در این زمینه محققان مختلف، ترکیب‌های متفاوتی از شدت- شیب (قدرت جریان و یا تنش برشی) را ایجاد نموده‌اند، که مقایسه نتایج را دشوار و تا حدی غیرممکن ساخته است. به علاوه هنوز روشی قابل قبول برای همگان برای تعیین حدود آستانه وجود ندارد.

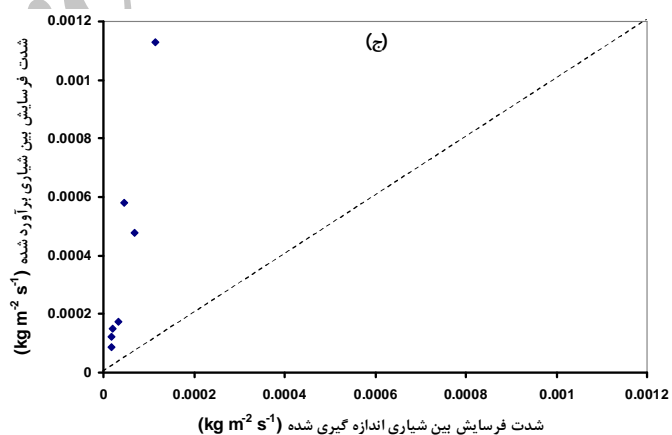
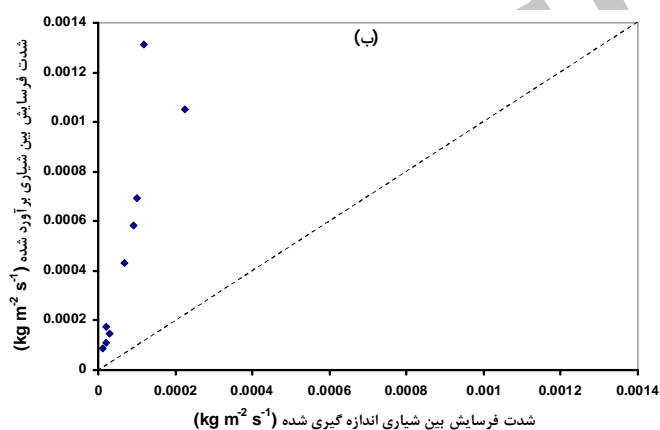
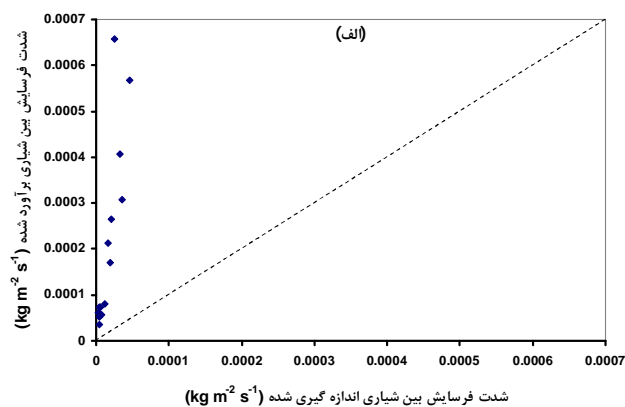
نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری نشان داد که برای هر سه خاک مورد مطالعه در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، مدل WEPP تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد. با در نظر گرفتن تنش برشی‌های بیش‌تر از آستانه به علت نقش احتمالی رواناب در جدانمودن ذرات، میزان ارزیابی مدل کاهش یافت. پس از واسنجی مدل، مقادیر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری پایه (K_{ib})، برای تنش برشی‌های کمتر از آستانه و تمامی تنش برشی‌ها به ترتیب بین 6/44 تا 11/05 و 3/57 تا 9/56 برابر کم‌تر از مقادیر تخمینی با استفاده از ویژگی‌های خاک، برآورد شد.

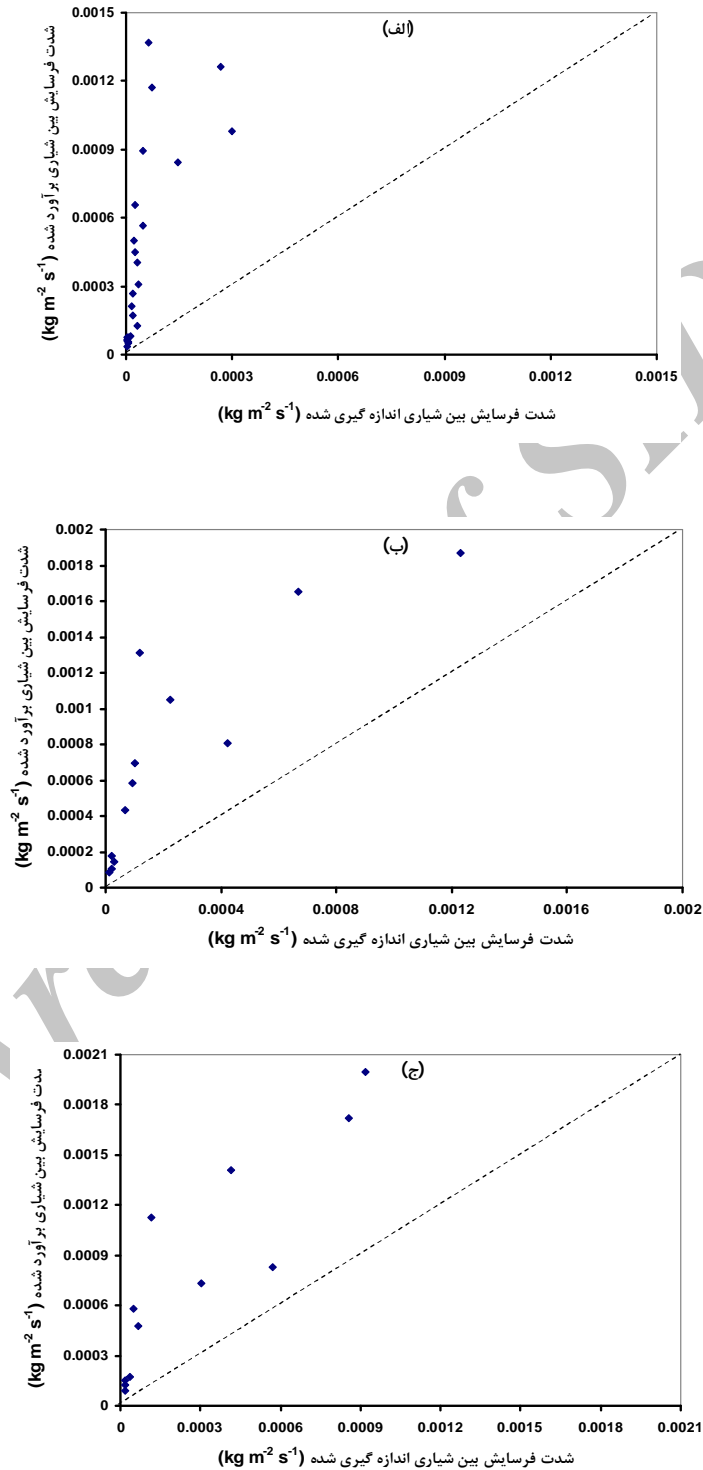
نتایج ارزیابی مدل نشان داد که کارایی مدل در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری بستگی به نوع خاک دارد. همچنین با در نظر گرفتن تنش برشی‌های کمتر از آستانه به جای تمامی تنش برشی‌ها، مقادیر فرسایش

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

| ویژگی خاک | واحد | خاک هشتگرد | خاک دانشکده | خاک سهیلیه |
|------------------------------|------------------|------------|-------------|------------|
| شن | (%) | 34/0 | 49/0 | 61/5 |
| سیلت | (%) | 44/0 | 32/5 | 23/5 |
| رس | (%) | 22/0 | 18/5 | 15/0 |
| میانگین وزنی قطر (تر) | mm | 0/77 | 0/33 | 0/19 |
| جرم مخصوص ظاهری | $g\ cm^{-3}$ | 1/61 | 1/64 | 1/72 |
| ظرفیت تبادل کاتیونی | $meq\ 100g^{-1}$ | 25/8 | 14/7 | 13/3 |
| درصد سدیم تبدلی | (%) | 1/54 | 1/22 | 1/88 |
| واکنش خاک (عصاره اشباع) | - | 8/5 | 8/3 | 8/3 |
| هدایت الکتریکی (عصاره اشباع) | $dS\ m^{-1}$ | 1/15 | 1/58 | 0/91 |
| کربن آلی | (%) | 1/5 | 0/78 | 0/21 |
| کربنات کلسیم معادل | $meq\ L^{-1}$ | 19/3 | 5/6 | 8/8 |
| گچ | $meq\ L^{-1}$ | 0 | 0 | 0 |



شکل 1- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی شدت فرسایش بین شیاری با استفاده از مدل WEPP قبل از واسنجی، در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه برای؛ (الف) خاک هشتگرد، (ب) خاک دانشکده و (ج) خاک سهیلیه



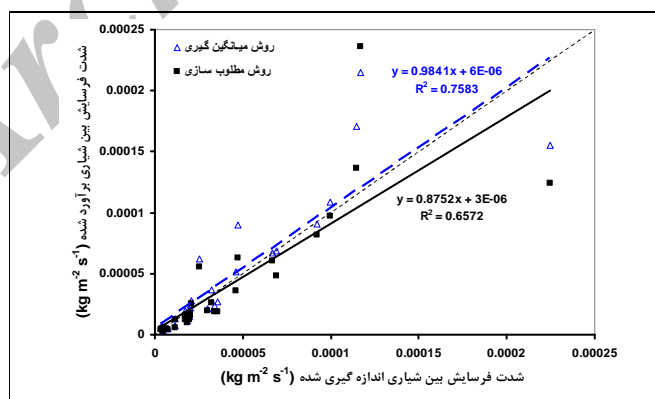
شکل 2- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از مدل WEPP قبل از واسنجی، در تمامی تنش برشی‌ها برای؛ (الف) خاک هشتمگرد، (ب) خاک دانشکده و (ج) خاک سهیلیه

جدول 2- نتایج ارزیابی مدل WEPP در برآورد فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه برای تنش برشی‌های کمتر از آستانه پس از واسنجی فرسایش‌پذیری پایه به دو روش (الف) میانگین‌گیری و (ب) مطلوب‌سازی

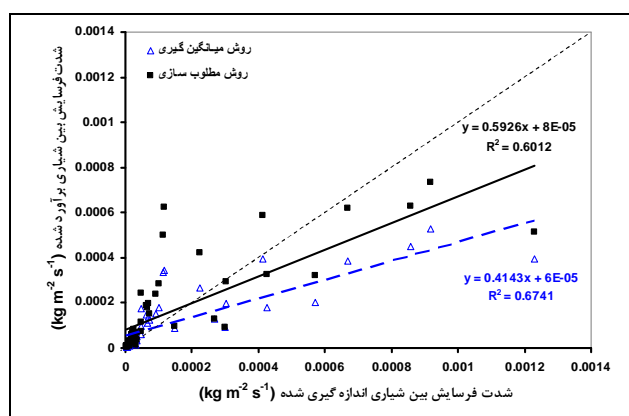
| پارامتر مربوط به فرسایش بین‌شیاری | | خاک هشتگرد | | خاک دانشکده | | خاک سهیلیه | |
|--|-------|------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| | (الف) | (ب) | (الف) | (ب) | (الف) | (ب) | (الف) |
| میانگین اندازه‌گیری شده ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 1/70 | | 7/58 | | 4/58 | | |
| میانگین برآورد شده ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 1/97 | 1/51 | 7/94 | 7/45 | 5/77 | 4/33 | |
| شیب خط برازش‌یافته | 1/15 | 0/84 | 0/83 | 0/74 | 1/55 | 1/23 | |
| عرض از مبدأ ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 0/02 | 0/09 | 2 | 2 | -1 | -1 | |
| ضریب تبیین (R^2) | 0/69 | 0/55 | 0/66 | 0/48 | 0/91 | 0/91 | |
| میانگین مربعات خطا ($\times 10^{-10}$) | 1/12 | 1/06 | 16/3 | 27/4 | 7/33 | 2/18 | |

جدول 3- نتایج ارزیابی مدل WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه برای تمامی تنش برشی‌ها پس از واسنجی فرسایش‌پذیری پایه (K_{ii}) به دو روش (الف) میانگین‌گیری و (ب) مطلوب‌سازی

| پارامتر مربوط به فرسایش بین‌شیاری | | خاک هشتگرد | | خاک دانشکده | | خاک سهیلیه | |
|--|-------|------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| | (الف) | (ب) | (الف) | (ب) | (الف) | (ب) | (الف) |
| میانگین اندازه‌گیری شده ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 5/09 | | 25/0 | | 28/2 | | |
| میانگین برآورد شده ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 4/64 | 5/31 | 17/9 | 28/4 | 21/4 | 31/0 | |
| شیب خط برازش‌یافته | 0/37 | 0/38 | 0/29 | 0/38 | 0/44 | 0/62 | |
| عرض از مبدأ ($\times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$) | 3/00 | 3/00 | 10/0 | 20/0 | 9/00 | 10/0 | |
| ضریب تبیین (R^2) | 0/43 | 0/32 | 0/57 | 0/41 | 0/72 | 0/71 | |
| میانگین مربعات خطا ($\times 10^{-10}$) | 34/0 | 40/7 | 750 | 743 | 449 | 321 | |



شکل 3- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی فرسایش بین‌شیاری با استفاده از مدل WEPP پس از واسنجی به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی در تنش‌های کمتر از آستانه



شکل 4- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی فرسایش بین‌شیبایی با استفاده از مدل WEPP پس از واسنجی به دو روش میانگین‌گیری و مطلوب‌سازی در تمامی تنش برشی‌ها

فهرست منابع:

1. اسدی، ح.، ح. روحی‌پور، ح. رفاهی و م. شرفا. 1386. ارزیابی مدل WEPP برای برآورد فرسایش بین‌شیبایی در شرایط آزمایشگاهی. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد 38، شماره 4، صص. 563-553.
2. Agassi, M. and J.M. Bradford. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Till. Res.*, 49: 277-287.
3. Bajracharya, R.M., W.J. Elliot, and R. Lal. 1992. Interrill erodibility of some Ohio soils based on field rainfall simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 267-272.
4. Barthes, B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 47: 133-149.
5. Blau, J.B., D.A. Wodhiser, and L.J. Lane. 1988. Identification of erosion model parameters. *Trans. ASAE*, 31(3): 839-845, 854.
6. Bower, C.A.R., F. Reitemeier, and M. Fireman. 1952. Exchangeable-cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.*, 73: 251-261.
7. Delta Lab. 1992. Technical manual: Rainfall simulator, EID 340. Voreppe, France, 17 p.
8. Foster, G.R., D.C. Flanagan, M.A. Nearing, L.J. Lane, L.M. Risse, and S.C. Finkner. 1995. Hillslope erosion component. Chapter 11, In: Flanagan, D. C. and Nearing, M. A. (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
9. Foster, G.R., D.K. McCool, K.G. Renard, and W.C. Moldenhauer. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. *J. Soil Water Conserv.*, 36: 355-359.
10. Grosh, J.L. and A.R. Jarrett. 1994. Interrill erosion and runoff on very steep slopes. *Trans. ASAE*, 37: 1127-1133.
11. Jetten, V., A. de Roo, and D. Favis-Mortlock. 1999. Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena*, 37: 521-541.
12. Kincaid, D.C. 2002. The WEPP model for runoff and erosion prediction under sprinkler irrigation. *Trans. ASAE*, 45: 67-72.
13. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop- impact- induced erosion processes and prediction: A review. *Hydro. Process.*, 19: 2815-2844.
14. Kinnell, P.I.A. 2000. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1004-1008.
15. Liebenow, A.M., W.J. Elliot, J.M. Laflen, and K.D. Kohl. 1990. Interrill erodibility: Collection and analysis of data from cropland soils. *Trans. ASAE*, 33: 1882-1888.

16. Liu, Q.Q., H. Xiang, and V.P. Singh. 2006. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. *Hydro. Process*, 20: 469-486.
17. Meyer, L.D. and W.C. Harmon. 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1152-1157.
18. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydro.*, 10: 282-290.
19. Nearing, M.A., D.I. Page, J.P. Simanton, and L.J. Lane. 1989. Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. *Trans. ASAE*, 32(3): 919-924.
20. Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Jeeney. 1992 a. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties*. SSSA Pub. Madison. 1750 p.
21. Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Jeeney. 1992 b. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and mineralogical properties*. SSSA Pub. Madison. 1159 p.
22. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. *Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer. 993 p.
23. Pieri, L., M. Bittelli, J.Q. Wu, S. Dun, D.C. Flanagan, P.R. Pisa, F. Ventura, and F. Salvatorelli. 2007. Using the water erosion prediction project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *J. Hydro.*, 336: 84-97.
24. Renard, K.J., G.A. Foster, G.A. Weesies, and D. K. McCool. 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook No. 703. Washington DC. US.
25. Rouhipour, H., H. Ghadiri, and C.W. Rose. 2006. Investigation of the interaction between flow-driven and rainfall-driven erosion processes. *Aust. J. Soil Res.*, 44: 503-514.
26. Schack-Kirchner, H., T. Schmid and E. Hildebrand. 2005. High-resolution monitoring of surface-flow depth with frequency-domain probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 343-346.
27. Shao, J. and D. Tu. 1995. *The jackknife and Bootstrap*. Springer, US. 516 p.
28. Soto, B. and F. Diaz-Fierros. 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.
29. Truman, C.C. and J.M. Bradford. 1995. Laboratory determination of interrill soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 519-526.
30. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37: 29-38.
31. Yu, B. and C.J. Rosewell. 2001. Evaluation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW, Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 39: 1131-1145.
32. Yu, B., Ciesiolka, C.A. A.C. W. Rose, and K.J. Coughlan. 2000. A validation test of WEPP to predict runoff and soil loss from a pineapple farm on a sandy soil in subtropical Queensland, Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 38: 537-554.
33. Zhang, X. C., Z.B. Li, and W. F. Ding. 2005. Validation of WEPP sediment feedback relationships using spatially distributed rill erosion data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1440-1447.
34. Zhang, X.C., M.A. Nearing, W.P. Miller, L.D. Norton, and L.T. West. 1998. Modeling interrill sediment delivery. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 438-444.