

بررسی اثر عمق خیزی بر توان برآورد رواناب و رسوب با استفاده از معادله اصلاح شده ویلیامز (منطقه مورد مطالعه: دامنه قلات شهرکرد)

مهدی پژوهش*: دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

شیوا پارسی: دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

نسرین قرهی: استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

خدایار عبدالهی: استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.3.0

چکیده

عمق خیزی، مقدار آبی است که در خاک نفوذ و لایه داخلی آن را مرطوب می‌کند و متغیری مهم در کاربردهایی مانند تولید رواناب و برآورد عملکرد رسوب است. این متغیر در برخی موارد در علم هیدرولوژیکی، جایگزینی برای نفوذ است و از آن به عنوان عاملی مهم در فرایندهای فرسایش خاک استفاده می‌شود. ارزیابی اثر عمق خیزی بر تولید رسوب و رواناب ناشی از فرسایش آبی با استفاده از باران‌ساز، در کشور و در دنیا موضوع جدیدی است و پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام نشده‌است. بنابراین اهمیت و ضرورت این تحقیق، برآورد رسوب معلق با اضافه کردن متغیر عمق خیزی به مدل منطقه‌ای است. هدف از این تحقیق نیز بررسی اثر عمق خیزی بر توان تولید رواناب و رسوب با استفاده از معادله اصلاح شده ویلیامز است. در این مطالعه میدانی، از یک شبیه‌ساز باران مجهز به سیستم‌های قطره‌ای نصب شده روی یک قطعه آزمایشی در دامنه کوه استفاده شد و منظور از آن، تولید بارندگی با دو شدت ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر در ساعت در سه شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با سه تکرار بود. سپس رواناب و رسوب به دست آمده از هر پلات، در فواصل زمانی ده دقیقه‌ای در بطری‌های مخصوص جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. در ادامه، مقدار رسوب تولید شده در پایان هر بارش، وزن و برای هر پلات محاسبه شد. برای اندازه‌گیری عمق خیزی با استفاده از میل‌های بافت نازک درجه‌بندی شده، میزان عمق خیس‌شدگی هر ده دقیقه یک‌بار به صورت قطری با سه تکرار در داخل پلات صورت گرفت. از ضریب تبیین (R^2) و معیار نش — ساتکلیف (Nse) نیز به عنوان معیارهای عملکرد رسوب برای مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که در ارزیابی نتایج در شبیه‌سازی میزان رسوب، ضریب نش — ساتکلیف و ضریب تبیین به عنوان دو مورد از پرکاربردترین شاخص‌ها، مقدار $Nse=0/88$ و $R^2=0/88$ را از خود نشان دادند. نتایج حاصل از برآورد میزان رسوب معلق در مراحل واسنجی ($Nse=0/81$) و اعتبارسنجی ($R^2=0/81$ و $Nse=0/81$)، برای منطقه مورد مطالعه بسیار مناسب بود.

واژگان کلیدی: شدت بارندگی، شیب، رسوب معلق، فرسایش خاک، عمق خیزی.

۱- مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی جهان است که بر توسعه پایدار تأثیر به‌سزایی دارد (Bakker et al, 2004) و منابع خاک و آب را به طور جدی تهدید می‌کند (Wolanch, 2010 & Borrelli et al, 2021). با توجه به اینکه در مناطق خشک و نیمه خشک فرسایش زیادی رخ می‌دهد، به مرور زمان این امر به کاهش نفوذپذیری خاک‌های عرصه منجر می‌شود. یکی از عوامل مهم و مؤثر خاک، نفوذپذیری خاک به خصوص نفوذپذیری افق زیرین آن است. همچنین یکی از عوامل مؤثر در نفوذپذیری خاک، موضوع عمق خیس‌شدگی یا ارتفاع خیس‌شدگی^۱ است. رطوبت قبل از پیشروی به درون خاک، در منطقه‌ای نزدیک سطح زمین جمع می‌شود که به عنوان عمق خیسی متمایز می‌شود. عمق خیس‌شدگی، عمقی است که در آن محتوای آب به دلیل ورود آب از منابع خارجی افزایش یا به دلیل تبخیر کاهش می‌یابد (Nelson et al, 2001). اهمیت عاملی نظیر عمق خیسی از آن جهت است که در حالت کلی، هر چه میزان نفوذ آب در خاک بیشتر باشد مقدار رواناب و رسوب تولید شده کمتر خواهد شد. عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های توپوگرافی، شیب، شدت بارندگی و مدت زمان بارندگی، بر عمق جبهه رطوبت در خاک‌های مختلف تأثیر می‌گذارد.

Wells و همکاران (2007) به بررسی تکنیک‌های ساده برای اندازه‌گیری عمق خیسی در خاک‌های انتخاب شده پرداختند. آنها عمق خیسی را به ویژه در خاک‌هایی که ترک یا شرایط خشک داشتند، نشان‌دهنده مقدار نفوذ دانستند؛ یعنی مفهوم بسیار نزدیکی به نفوذپذیری داشت. Sharma و همکاران (1983)، نتیجه گرفتند که در شیب‌های کم به دلیل سرعت کمتر میزان رواناب، میزان رسوب در آن کم و در نتیجه میزان عمق خیسی زیاد است. Mohammadi and kaviani (2010) با بررسی تغییرات زمانی رواناب و رسوب در مقیاس پلات به این نتیجه رسیدند که به دلیل تغییرات مکانی مختلف، رواناب، رسوب و عمق خیسی در شرایط محیطی مختلف نتایج متفاوتی را در پی دارد؛ به طوری که تولید رواناب و رسوب، تحت تأثیر تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک تغییر می‌یابد. قابلیت خاک در تولید رواناب و رسوب در طی زمان نیز ثابت نیست، بلکه با تغییرات اقلیم و ویژگی‌های خاک و باران تغییر می‌کند. تشکیل رواناب و دبی‌های سیلابی در سطح زمین به تخریب و هدررفت خاک سطحی منجر شده است که مجموع این فرایندها، کاهش کیفیت منابع آب (Morgan and Nearing, 2011 & Yang et al, 2009 & Varvani et al, 2019)، کاهش نفوذپذیری و آسیب خاک (Liu, 2016 & Niu et al, 2015) و کاهش ظرفیت آب در خاک را به همراه دارد. کاهش ظرفیت آب در خاک باعث شده ظرفیت نفوذ خاک کمتر و بارش مازاد به رواناب تبدیل شود. بنابراین، مطالعه و بررسی تولید رواناب و رسوب یکی از فرایندهای اصلی و مهم فرسایش و هدررفت خاک است که آگاهی از ویژگی‌های مؤثر بر آن امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به موارد بالا، فرایند رواناب — بارش، بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی و خصوصیات تغییر زمانی و مکانی است (Van de Giesen et al 2000). تولید رواناب به عوامل مختلفی بستگی دارد؛ مانند شیب، شدت بارندگی، استفاده از اراضی، ساختمان و نفوذپذیری خاک (Vahabi et al, 2008 & Borrelli et al, 2021). Huang و همکاران (2013) آزمایش باران‌ساز را به منظور بررسی تأثیر شدت بارندگی، سطح زیرین و درجه شیب بر نفوذ خاک انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با افزایش شدت

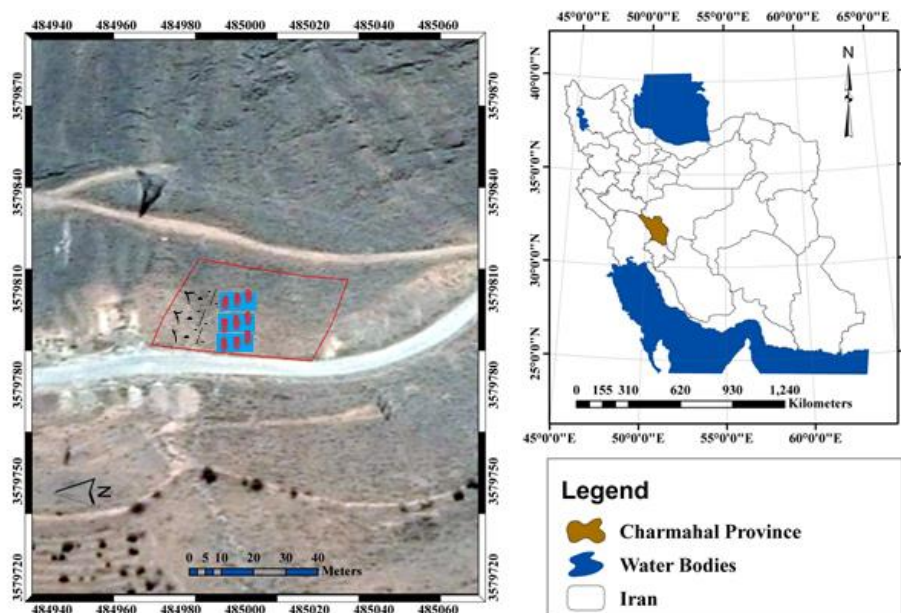
¹ Depth to wet/wetting front

بارندگی، میزان نفوذ کاهش می‌یابد که این امر، به دلیل متلاشی شدن خاکدانه‌های موجود و ممانعت از ورود آب به درون زمین است. Santos و همکاران (2003) با ارزیابی مقایسه‌ای بین نفوذ، رواناب و فرسایش قطرات آبیاری روی خاک‌ها دریافتند که تخریب خاک بر اثر باران و در پی آن کاهش تخلخل درشت خاک، به کاهش سرعت نفوذ آب در خاک منجر می‌شود و این رخداد، تولید رواناب، فرسایش خاک و در نتیجه تولید رسوب را به همراه خواهد داشت. تحقیق Norouzi و همکاران (2021) نشان داد که در نظر گرفتن عمق خیزی در مدل MUSLE، ممکن است به بهبود کاربردهای هیدرولوژیکی و رسوبی منجر شود.

به طور کلی، داده‌های شبیه‌ساز باران ممکن است درک و دانش ما را از فرایندهای ژئومورفولوژیکی آبی مرتبط با رواناب کل و فرسایش خاک افزایش دهد؛ با این حال، اگر چه در زمینه تأثیر شیب و شدت بارندگی بر رواناب و رسوب پژوهش‌های متعددی انجام شده، اما با توجه به پیشینه تحقیق، در زمینه تأثیر عمق خیزی بر روی رسوب در شدت‌ها و شیب‌های متفاوت پژوهشی صورت نگرفته است. بررسی این پژوهش، درک و آگاهی کلی را برای محققان در زمینه نقش عمق خیزی در ایجاد رسوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جزئی از حوضه آبخیز کارون است که با مساحت ۱۷۱۷ مترمربع، در دامنه قلات شهر کرد در طول و عرض جغرافیایی $50^{\circ}50'50''$ و $32^{\circ}21'92''$ و در ۲۱۸۶ متر از سطح دریا واقع شده است. میانگین دمای سالانه از $8/5$ - تا $12/45$ درجه سلسیوس متغیر است، میزان بارندگی سالانه $320/9$ میلی‌متر، متوسط رطوبت نسبی ۴۴ درصد و بافت خاک منطقه مورد مطالعه نیز لومی تا سندی — کلی — لوم است (Chaharmahal & bakhtiari meteorological administration, 2018) (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه (اعداد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ در شکل بیانگر درصد شیب در منطقه مورد نظر است)

۳- مواد و روش

در این تحقیق، میزان عمق خیس‌شدگی، رواناب و رسوب به روش پلات‌های آزمایشی اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی رواناب و رسوب در منطقه مورد مطالعه، از یک دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی — که مدل تهیه شده در دانشگاه شهرکرد است — استفاده شد. در این تحقیق از سامانه شبیه‌ساز باران با ارتفاع ۲/۵ متر نوع قطره‌ای، در پلاتی به اندازه ۰/۹ متر طول و ۰/۵ متر عرض استفاده شد. مشخصات باران‌سازها، به نوع قطرات استفاده شده و چگونگی تنظیم قطرات باران بستگی دارد. علاوه بر این، شدت بارندگی و روش اندازه‌گیری آن نیز بر اندازه قطرات تأثیر می‌گذارد (Marques et al, 2007). این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌است؛ از جمله موتور برق برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه، سیستم کامپیوتری کنترل نازل‌ها، مخزن، پمپ آب و فشارسنج، سیستم پاشش قطرات باران، چهارچوب دستگاه با پایه‌های قابل تنظیم ارتفاع تا ۲/۴۰ متر و کورت آزمایش. مخزن آب باران‌ساز، از طریق شیلنگ‌هایی به سر نازل‌ها وصل شد و از شیرری که در بالای آن قرار داشت نیز برای تنظیم شدت بارندگی استفاده شد.

این شبیه‌ساز باران برای مطالعات هیدروژئومورفولوژیکی شامل رواناب، نفوذ، خصوصیات رسوب و انتقال آلاینده‌ها در تحقیقات خاک، روشی استاندارد محسوب می‌شود. پلات‌های آزمایشی، در سه منطقه با سه شیب متفاوت ده درصد (شیب کم)، بیست درصد (شیب متوسط) و سی درصد (شیب زیاد) در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. دستگاه شبیه‌ساز باران در هر پلات آزمایشی با دو شدت ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت شصت دقیقه ایجاد شد. در هر پلات، سه تکرار صورت گرفت. در ادامه برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی سطح خاک انجام شد. در هر شدت، سه شیب و برای هر شیب، سه تکرار در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، درصد آهک خاک (کربنات کلسیم خاک) به روش تیتراسیون و روش خنثی‌سازی (Fenton et al, 1993)، مواد آلی خاک به روش والکی بلک (Walkey and Black, 1934)، رطوبت اولیه خاک با دستگاه رطوبت‌سنج مدل SM01 Azar-khak-Ab urmia به روش مستقیم در عمق خاک، و پایداری خاک از روش الک تر (Kay, 2000) اندازه‌گیری شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، در جدول ۱ نشان داده ذکر شده‌است. بعد از تنظیم باران‌ساز مصنوعی بر روی پلات آزمایشی، رواناب و رسوب به دست آمده از هر پلات در فواصل زمانی ده دقیقه‌ای در بطری‌های مخصوص جمع‌آوری و در ظروف شماره‌گذاری شده به صورت جداگانه به آزمایشگاه منتقل شد. پس از جداسازی و خشک کردن نمونه‌ها در آون در حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار رسوب تولید شده در پایان هر بارش پس از ۲۴ ساعت (Walling et al, 2001) وزن و برای هر پلات محاسبه شد. برای اندازه‌گیری عمق خیسی نیز از میل بافت نازک استفاده شد. میل بافت نازک را در بازه زمانی هر ده دقیقه با سه تکرار، یک‌بار به داخل پلات — که ریزش باران در آن صورت می‌گرفت — فرو کردند و قسمتی از آن که رطوبت داشت، با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، داده‌های مورد نظر به اکسل ۲۰۱۰ منتقل شد. برای کم کردن اختلاف میان آزمایش‌ها، میانگینی از سه تکرار حاصل شد.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه (انحراف معیار $\pm$ میانگین)

ویژگی	شیب	مقدار (واحد)
رس	٪۱۰	۲۹/۹ $\pm$ ۳/۱ درصد
	٪۲۰	۳۱/۹ $\pm$ ۲/۳ درصد
	٪۳۰	۳۱/۹ $\pm$ ۳/۱ درصد
سیلت	٪۱۰	۴۸/۱ $\pm$ ۳/۱ درصد
	٪۲۰	۴۸/۱ $\pm$ ۸/۳ درصد
	٪۳۰	۵۲/۷ $\pm$ ۲ درصد
شن	٪۱۰	۲۲ $\pm$ ۶ درصد
	٪۲۰	۲۰ $\pm$ ۱۰/۶ درصد
	٪۳۰	۱۵/۳ $\pm$ ۳/۱ درصد
بافت	٪۱۰	لومی رسی
	٪۲۰	لومی رسی
	٪۳۰	لومی سیلتی رسی
آهک	٪۱۰	۲۹ $\pm$ ۲/۸* درصد
	٪۲۰	۳۶ $\pm$ ۹/۵a درصد
	٪۳۰	۲۹/۵ $\pm$ ۹/۲a درصد
ماده آلی	٪۱۰	۱۴ $\pm$ ۰/۱a درصد
	٪۲۰	۰/۲۲ $\pm$ ۰/۱a درصد
	٪۳۰	۰/۴ $\pm$ ۰/۲a درصد
پایداری خاکدانه	٪۱۰	۳ $\pm$ ۰/۸a درصد
	٪۲۰	۲/۳ $\pm$ ۱/۴a درصد
	٪۳۰	۴/۵ $\pm$ ۲a درصد
رطوبت اولیه خاک	٪۱۰	۱۱/۲ $\pm$ ۴/۸a درصد
	٪۲۰	۸/۲ $\pm$ ۲/۱a درصد
	٪۳۰	۶/۹ $\pm$ ۱/۲a درصد

*حروف مشترک در یک ستون، بیانگر معنی‌دار نبودن قدام معنی‌داری تفاوت میانگین‌ها در سطح ۰/۰۵ با استفاده از آزمون دانکن (LSD) است.



شکل ۲: نمایی از باران‌ساز در منطقه مورد مطالعه

انتخاب متغیرهای مستقل و وابسته در مدل ویلیامز

Williams و همکاران (2008)، رابطه تجربی زیر را برای تعیین میزان رواناب پیشنهاد کردند:

$$R_e = a_f (q_e \times q_{pe})^{b_f} \times D \times A^{c_r} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه R_e میزان رواناب، q_e حجم رواناب، q_{pe} دبی اوج رواناب و D ، A ، b ، c ، a ضرایب ثابت است که به روش‌های حداقل‌سازی خطای برازش توسط نرم‌افزار اکسل برآورد شده‌اند. این پارامترهای منطقه‌ای است که با توجه به نوع منطقه تغییر می‌کند و بقیه ضرایب، براساس ضرایب انتخاب شده توسط کاربر است. برآورد ضرایب بدین صورت بود که با استفاده از ابزار Goal seek در منوی What-If Analysis در اکسل، مقدار بهینه با تغییر ضرایب سلول‌ها محاسبه شد. در صورتی که بیشترین معیار نش ساتکیف در بین ضرایب مختلف حاصل شود، آن ضرایب به عنوان ضرایب منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود.

در تحقیق حاضر برای برآورد رسوب از معادله ویلیامز استفاده شد:

$$Q_s = a_f (q_e \times q_{pe})^{b_f} \times D \times S^{c_r} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه Q_s میزان رسوب، q_e حجم رواناب، q_{pe} دبی اوج رواناب، S مقدار شیب، a ، b ، c ، D و ضرایب می‌باشند که بر اساس حداقل‌سازی خطای برازش، به روش برنامه‌ریزی خطی تعیین شده‌اند.

برای برآورد میزان رسوب در منطقه مورد مطالعه با توجه به اینکه تولید رسوب، وابستگی مستقیم و زیادی با خصوصیات و شرایط حوضه دارد؛ پارامترهایی شاخص که تأثیر به‌سزایی بر تولید رسوب دارند، محاسبه شد. این پارامترها شامل رواناب، شیب، عمق خیسی، شدت بارندگی و شیب است (Restrepo et al, 2006). در این پژوهش میزان رسوب به عنوان متغیر وابسته و مقدار رواناب، شیب، عمق خیسی، شدت بارندگی و شیب به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند.

بررسی ارزیابی مدل

ارزیابی مدل از روش ضریب تبیین (R^2) (رابطه ۳) و نش - ساتکلیف (Nse) (رابطه ۴) صورت گرفت.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (q_{si} - \bar{q}_s)(S_{oi} - \bar{S}_o)]^2}{\sum_{i=1}^n (q_{si} - \bar{q}_s)^2 \sum_{i=1}^n (S_{oi} - \bar{S}_o)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن n تعداد مشاهدات، q_{si} و S_{oi} مقادیر متناظر مشاهده و پیش‌بینی شده میزان رسوب، $\bar{q}_s$ و $\bar{S}_o$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده میزان رسوب است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (S_{oi} - S_{si})^2}{\sum_i (S_{oi} - \bar{S}_o)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

S_{oi} : مقادیر مشاهده شده میزان رسوب، S_{si} : مقادیر شبیه‌سازی شده میزان رسوب و $\bar{S}_o$: میانگین مقادیر مشاهده شده رسوب است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

برای واسنجی داده‌ها به منظور شبیه‌سازی میزان رسوب، هفتاد درصد داده‌ها انتخاب و ضریب کارایی و همبستگی آنها محاسبه شد. از سی درصد داده‌ها به منظور افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت پیش‌بینی مدل اعتبارسنجی استفاده شد. در نهایت، بهینه‌سازی مدل نیز با ابزار Goal seek در نرم‌افزار اکسل صورت گرفت.

۴- یافته‌ها (نتایج)

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

با توجه به جدول ۱، در منطقه مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن (LSD) بین خاک سطحی در سه شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از نظر میزان آهک، مواد آلی، پایداری خاکدانه، رطوبت اولیه و بافت خاک وجود نداشت و این نشان می‌دهد که همه خصوصیات خاک یکسان بوده است.

محاسبه میزان رسوب معلق در شدت‌های متفاوت بارش و شیب‌های متفاوت

۴-۱- برآورد رسوب بدون استفاده از پارامتر عمق خیزی در مدل

جدول ۲، بهترین ضریب کارایی نش - ساتکلیف و ضریب تبیین را برای هر شدت بارندگی و سه شیب منطقه نشان می‌دهد که این امر با استفاده از رابطه ۲ صورت می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست آمده از ضریب کارایی در جدول ۲، اثر شدت بارش بر رسوب بیانگر اختلاف معنی‌دار است. ضریب نش در شدت‌های ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، به ترتیب مقادیر ۰/۸۴ و ۰/۶۳ درصد را به خود اختصاص داده؛ در حالی که ضریب نش برای شدت‌های ترکیبی (کل) ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، مقدار ۰/۵۵ است. با توجه به اینکه در یک منطقه از شدت‌های مختلف و شیب‌های متفاوت اندازه‌گیری و محاسبه استفاده شده است، مطمئناً این امر به سردرگمی و ناقص ماندن مدل منطقه منجر خواهد شد؛ به همین دلیل برای ارائه یک معادله مناسب، از ترکیب متغیرهای ذکر شده در بالا برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

جدول ۲: نتایج میزان رسوب معلق در شدت‌های ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با استفاده از ضریب کارایی نش ساتکلیف

(Nse) و ضریب تبیین (R^2)

شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	رسوب مشاهده‌ای (کیلوگرم بر متر مربع)	رسوب برآوردی (کیلوگرم بر متر مربع)	R^2 (درصد)	Nse
۴۵	0.082 ± 0.034	0.083 ± 0.027	۰/۸۶	۰/۸۴
۶۰	0.184 ± 0.089	0.184 ± 0.072	۰/۶۳	۰/۶۳
ترکیب دو شدت	0.133 ± 0.084	0.138 ± 0.049	۰/۵۸	۰/۵۵

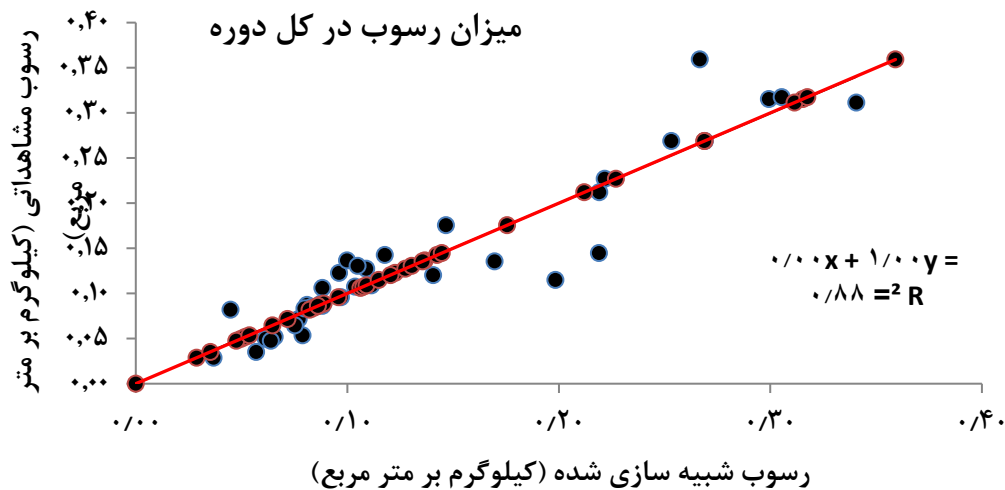
۲-۴- برآورد رسوب با استفاده از پارامتر عمق خیسی در مدل اصلاح شده ویلیامز

با توجه به ضریب نش پایین در ترکیب دو شدت در رابطه ۲ و برای بررسی عمق خیسی بر مقدار رسوب، به اصلاح معادله ویلیامز پرداخته شد که معادله اصلاح شده به صورت رابطه ۵ در زیر ارائه شد:

$$Q_s = (q_e \times q_{pe})^{0.32} \times S^{0.28} \times 1/17^{dp} \times D_A^{2/89} \quad \text{رابطه ۵}$$

در معادله بالا پارامترها عبارتند از: میزان رسوب (Q_s)، حجم رواناب (q_e)، دبی اوج رواناب (q_{pe})، شیب (S)، عمق خیسی (d_p) و مساحت منطقه (D_A).

نتایج حاصل نشان داد که عملکرد رسوب با عمق خیسی در شدت‌ها و شیب‌های مورد نظر، رابطه غیر خطی و نمایی معکوس و با پارامترهای شیب، حجم رواناب، دبی اوج رواناب و مساحت منطقه — از آنجایی که میزان رسوب برای هر مساحت از سطح زمین تعیین می‌شود، نیاز است که شاخص سطح در فرمول مورد نظر درج شود تا در صورت اجرای این رابطه در مناطق دیگر بتوان نسبت به آن مساحت، تخمین مناسب و قابل قبولی برآورد شود — رابطه‌ای مستقیم دارد؛ به طوری که افزایش شیب، رواناب، دبی اوج رواناب و مساحت منطقه، به افزایش میزان رسوب منجر می‌شود و افزایش عمق خیسی، به کاهش مقدار رسوب معلق. بنابراین، می‌توان بیان کرد مقدار رسوب زمانی افزایش می‌یابد که فضای منافذ موجود در خاک (عمق خیسی) کم باشد. نتایج ارزیابی کارایی مدل منطقه‌ای نشان داد که معادله به دست آمده برای منطقه (رابطه ۵)، برازش خوبی بر داده‌های مشاهداتی دارند؛ به طوری که ضریب تبیین خطوط برازش‌یافته بر داده‌ها، از ۰/۵۸ در معادله ویلیامز قبل از اضافه کردن عمق خیسی به ۰/۸۸ با اضافه کردن پارامتر عمق خیسی به همان مدل تغییر یافت. همچنین نتایج نشان داد که مقدار Nse از ۰/۵۵ به ۰/۸۸ تغییر یافت (شکل ۳).

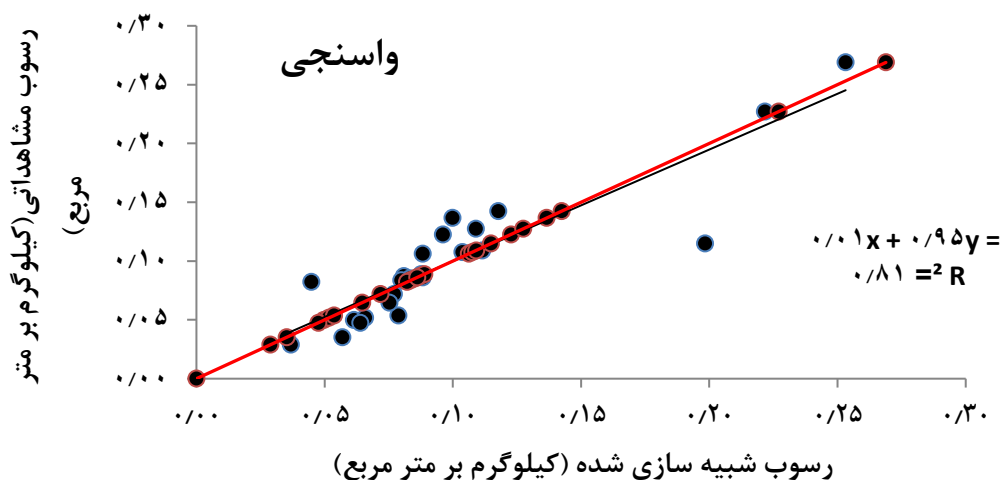


شکل ۳: نتایج حاصل از رسوب برآورد شده و مقدار واقعی بعد از استفاده از پارامتر عمق خیزی در منطقه مورد مطالعه

شاخص‌های ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی میزان تولید رسوب با نتایج واقعی در پژوهش حاضر، در بازه زمانی شصت دقیقه‌ای برای کل پلات‌های موردنظر به دست آمد. همچنین در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، مدل منطقه‌ای با مجموعه‌ای از عوامل به دست آمده از آخرین مرحله اعتبارسنجی و واسنجی اجرا و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شد.

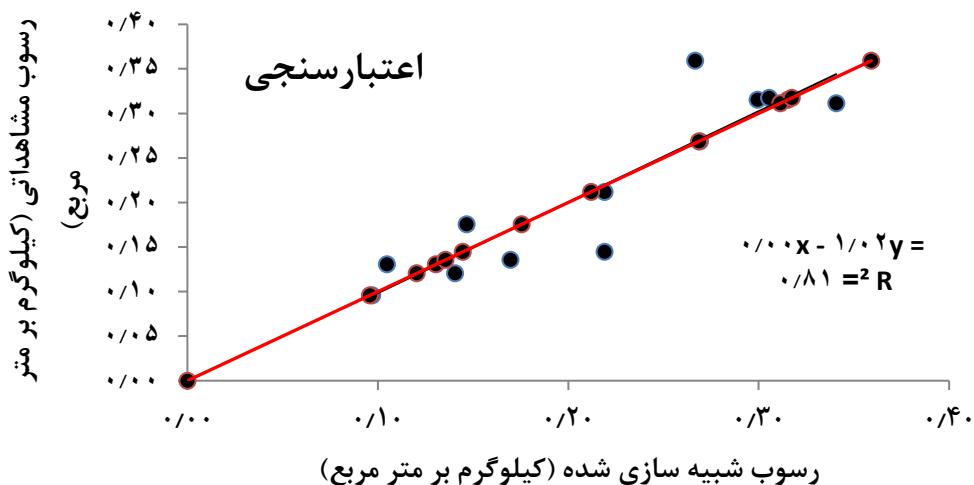
جدول ۳: نتایج مراحل اعتبارسنجی و واسنجی مدل بعد از استفاده از پارامتر عمق خیزی در منطقه مورد مطالعه

برازش داده‌ها	رسوب مشاهده‌ای (کیلوگرم بر متر مربع)	رسوب برآوردی (کیلوگرم بر متر مربع)	R ²	Nse
واسنجی	0.19 ± 0.056	0.19 ± 0.053	0.81	0.81
اعتبارسنجی	0.22 ± 0.094	0.22 ± 0.083	0.81	0.81
کل	0.14 ± 0.088	0.14 ± 0.084	0.88	0.88



شکل ۴: نتایج حاصل از واسنجی برای شبیه‌سازی میزان تولید رسوب بعد از استفاده از پارامتر عمق خیزی در منطقه مورد مطالعه

طبق شکل ۴، نتایج در مرحله واسنجی مدل با توجه به مقدار $Nse = 0/81$ و $R^2 = 0/81$ ، بیانگر دقت بالای مدل منطقه‌ای مذکور است؛ به طوری که این مدل، الگوی تغییرات میزان رسوب منطقه را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌است.



شکل ۵: نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی میزان تولید رسوب بعد از استفاده از پارامتر عمق خیزی در منطقه مورد مطالعه

طبق شکل ۵، نتایج نشان داد که در دوره اعتبارسنجی میزان تولید رسوب براساس $Nse = 0/81$ و $R^2 = 0/81$ است که نتایج بیانگر انطباق و عملکرد خوب مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی میزان رسوب در منطقه مورد مطالعه است. در این تحقیق با استفاده از خصوصیات متفاوت مربوط به منطقه مطالعاتی و اضافه کردن متغیر عمق خیزی به مدل منطقه‌ای در دوره اعتبارسنجی، کارایی بالایی حاصل شد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر عمق خیزی بر قابلیت ایجاد رواناب و تولید رسوب پرداخت؛ بدین صورت که پژوهش به صورت میدانی در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با شدت‌های بارش ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با استفاده از معادله اصلاح شده ویلیامز صورت گرفت. در حالت بدون در نظر گرفتن پارامتر عمق خیزی، نتایج نشان داد که در شدت‌های ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با افزایش درجه شیب، میزان رسوب و رواناب افزایش می‌یابد که دلیل این امر، انرژی برشی است که از طرف قطرات باران بر روی خاک ریخته و به تولید رواناب و رسوب منجر می‌شود. این امر مطابق با یافته‌های (Sharma et al, 1983) و (Assouline and Ben-Hur, 2006) است. افزایش شدت بارش و کاهش ظرفیت نفوذ لایه‌های سطحی خاک، به افزایش رواناب و رسوب منجر و در ادامه، نیروی بیشتری برای انتقال ذرات رسوب آماده می‌شود (Cammraat, 2004). اما با ترکیب شدت‌های بارندگی ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، مقدار ضریب نش به عنوان شاخص کارایی مدل برآزش شده کاهش یافت. از دلایل آن می‌توان به ناهمگنی مکانی در شیب‌ها و شدت‌های مختلف اشاره کرد. اگرچه افزایش شدت بارندگی در بیشتر خاک‌ها، با افزایش رواناب به افزایش رسوب منجر می‌شود، گاهی می‌تواند با کاهش رسوب — به دلیل فقدان تجانس مکانی شیب لایه سطحی خاک — به کم شدن کارایی میزان رسوب (ضریب کارایی نش ساتکلیف) منجر شود؛ به عبارت دیگر، در بخشی از شیب‌های زیاد به دلیل وجود شن،

تخلخل در آن قسمت زیاد است و به کاهش میزان رسوب در آن بخش منجر می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه مساحت مورد مطالعه، محدوده کوچکی را در برمی‌گرفت در صورت همپوشانی پلات‌ها در شیب مذکور، به خطای فاحش در میزان رسوب منجر می‌شد. هرچند این توجیه ممکن است تا حدی با فقدان قطعیت مواجه باشد، مطالعات تکمیلی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد؛ به‌خصوص آنکه میکرو توپوگرافی سطح خاک در تمامی شبیه‌سازی‌ها اثر داشته و فقط برای یک شدت خاص ظاهر نشده‌است.

نتایج این امر با پژوهش‌های (Foley and Silburn, 2002) و (Assouline and Ben-Hur, 2006) هم‌راستا است. اضافه کردن پارامتر شیب و عمق خیزی - که به میزان نفوذی است که اطراف لایه‌های پایین خاک را مرطوب می‌کند - از عوامل تأثیرگذار در تولید رسوب است (Fang et al, 2015). نتایج در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ارتباط بین عمق خیزی و میزان رسوب معلق، از طریق معادله $Q_s = (q_e \times q_{pe})^{0.32} \times S^{0.28} \times 1/17^{dp} \times DA^{2/89}$ حاصل شد؛ به طوری که بین میزان رسوب شسته شده با عمق خیزی، رابطه‌ی نمایی معکوس حاکم است. da Silva و همکاران (2018) طی پژوهشی به این نتیجه رسیدند که ارتباط رسوب و رواناب سطحی با عمق خیزی (نفوذ) به صورت نمایی است. در نتیجه، کاهش عمق خیزی این فرایند سبب می‌شود که توسعه پوستانه‌های سطح خاک، از حرکت آب به داخل خاک در درز و شکاف سطحی جلوگیری کند و در نهایت، به افزایش رسوب منجر شود. نتایج ارزیابی کارایی مدل منطقه‌ای نشان داد که معادله به دست آمده برای منطقه، برازش خوبی بر داده‌های مشاهداتی دارد. این تحقیق با نتایج (Zuoda Qi et al, 2007 & Moriasi et al, 2017) هم‌راستا است؛ به طوری که محققان ذکر شده طی ارتباطی که بین رسوب و عمق خیزی برقرار کردند، دریافتند که کارایی مدل از دقت بالایی برخوردار است. نتایج حاصل از برآورد میزان رسوب معلق در مراحل واسنجی ($R^2=0.81$; $Nse=0.81$) و اعتبارسنجی ($R^2=0.81$; $Nse=0.81$) برای منطقه مورد مطالعه، از برآورد قابل قبولی برخوردار بوده‌است. طبق نتایج به دست آمده از پژوهش مورد مطالعه، عمق خیزی یک متغیر بر عملکرد رسوب و تولید رواناب تأثیرگذار است. این یافته با نتایج (Hillel, 2003) و (Hayek, 2016) مطابقت دارد. Canton و همکاران (2009) نشان دادند که با کاهش عمق خیزی (نفوذ)، میزان رواناب و به دنبال آن رسوب نیز افزایش می‌یابد. همچنین Seeger و همکاران (2004) و Castillo و همکاران (2003) طی پژوهشی که انجام دادند، دریافتند که عمق خیزش‌دگی (جبهه رطوبت) - که میزان بارندگی در داخل خاک را (به عنوان نفوذ) کنترل می‌کند - یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار بر فرایندهای رسوب و رواناب است. همچنین با نتایج (Rangsiwanichpong et al, 2018 & Zhang et al, 2017 & Thuy and Lee, 2017 & Chuenchum et al, 2020) مطابقت دارد؛ به طوری که آنها نیز تلاش کردند با اصلاح عوامل تأثیرگذار مانند عمق خیزی، کارایی میزان رسوب را بهبود بخشند. بر اساس اطلاعات موجود، پژوهشی که بتواند ارتباط بین عمق خیزی و میزان تولید رسوب را بررسی کند تاکنون صورت نگرفته است. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به تنظیم شدت‌های بارندگی باران‌ساز، سرعت باد و حمل و نقل این سامانه در شیب‌های مختلف اشاره کرد. با توجه به محدودیت‌های اشاره شده در بالا، انتظار می‌رود دانش کافی در مورد برهم کنش حجم رواناب، شیب، شدت بارندگی، میزان رسوب و عمق خیزی حاصل شود. همچنین پیشنهاد می‌شود ارتباط بین عمق خیزی و رسوب در مناطق دیگر، با شرایط محیطی مختلف و در مدل‌های فرسایش و رسوب لحاظ شود.

۶- سپاس‌گزاری

از جناب آقای مهندس اکبر نوروزی، دانشجوی دکتری مهندسی طبیعت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد تشکر می‌کنم که در اجرای این تحقیق همکاری زیادی داشتند.

منابع

1. Assouline, S., & M. Ben-Hur., (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing, *Catena*, 66, 211-220.
2. Auerswald, K., 1993. Influence of initial moisture and time since tillage on surface structure breakdown and erosion of a loessial soil, *Catena*, 24, 93-101.
3. Bakker, M. M.; Govers, G.; & M. D. A. Rounsevell, 2004. The crop productivity erosion relationship: an analysis based on experimental work, *Catena*, 57, 55-76.
4. Borrelli et al., 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *science of the total environment*, 780,2-18
5. Cammraat, E. L. H., 2004. Scale Dependent Thresholds in Hydrological and Erosion Response of A Semi- Aid Catchment in Southeast Spain, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 317-332.
6. Canton, Y.; Sole-benet, A.; Asensio, C.; Chamizo, S.; & J. Puigdefabregas, 2009. Aggregate Stability in range sandy soils relationships with runoff and sediment, *Catena*, 14, 8,192-199.
7. Castillo, V. M.; Gomez-Plaza, A.; & M. Martinez-Mena, 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach, *Journal of Hydrology*, 284,114-130.
8. Chaharmahal & bakhtiari meteorological administration, 2018.
9. Cheng, Q.; Ma, W.; & Q. Cai, 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, north China, *Geo Journal*, 71, 117-125.
10. Chuenchum, P.; Xu, M.; & W. WTang, 2020. Estimation of soil erosion and sediment yield in the Lancang–Mekong River using the modified revised universal soil loss equation and GIS techniques, *Water*, 12, 135.
11. Da Silva, R. M.; Santos, C. A. G.; & J. Y. G. Dos Santos, 2018. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil, *International Journal of Sediment Research*, 33, 117-125.
12. Fang, H.; Sun, L.; & Z. Tang, 2015. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils, *Hydrological processes*, 29, 2649-2658.
13. Fenton, G.; Helyar, K. R.; & P. Orchard, 1993. Soil acidity and liming. NSW Agriculture Agfact AC 19.
14. Foley, J. L.; & D. M. Silburn, (2002). Hydraulic properties of rain impact surface seals on three clay soils—influence of raindrop impact frequency and rainfall intensity during steady state. *Soil Research*. 40, 1069-1083.
15. Gee, G. W.; & J. W. Bauder, (1986). Particle-size analysis. Pp: 383-411. In: Klute A (ed). *Methods of soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods. Part 1*(2nd ed), ASA and SSSA, Madison, WI.
16. Haan, C. T.; & Barfield, B. J.; & J. C. Hayes, 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments, Academic Press, San Diego, pp. 204-310.

17. Hayek, M., 2016. Analytical solution to transient Richards' equation with realistic water profiles for vertical infiltration and parameter estimation, *Water Resources Research*, 52, 4438-4457.
18. Hillel, D., 2003. Introduction to environmental soil physics. Elsevier, Co Inc, New York.
19. Hongsong, C.; Ming'an, S.; & W. Keli, 2006. Effects of initial water content on hill slope rainfall infiltration and soil water redistribution, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25, 24-31.
20. Huang, J.; Wu, P.; & X. Zhao, 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments, *Catena*, 104, 93-102.
21. Kay, B. D., 2000. Soil Structure, in: Handbook of Soil Science. CRC Press, E. M. Sumner, Ed., USA: F. I., Boca Raton A229-A264.
22. Kiani Harchegani, M.; Sadeghi, S. H. R.; & H. Asadi, 2015. Comparative Analysis of the Effects of Rainfall Intensity and Experimental Plot Slope on Raindrop Impact Induced Erosion (RIIE), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46, 631-640. (In Persian).
23. Kinnell, P. I. A., 2000. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion, *Soil Science Society and American Journal*, 64, 1004-1008.
24. Klute, A., 1986. Methods of soil analysis, Agron. 9, Part 1, American Society of Agronomy, Madison, WI, United State of America.
25. Liu, Y., 2016. Landscape connectivity in Soil Erosion Research: concepts, implication, quantification, *Geographical Research*, 1, 195-202.
26. Mohammadi, M., & E. Kaviani., (2010). Temporal variation of runoff and sediment in the plot scale. 12th. Iranian Soil Science Congress, Tabriz, 12-14 September. 1786-1788. (In Persian).
27. Morgan, R. P. C., & M. A. Nearing., (2011). Handbook of erosion modeling. John Wiley & Sons, Ltd
28. Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; & T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineer*, 50, 885-900.
29. Nassif, S. H., & E. M. Wilson., (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration Hydrological Sciences Bulletin. 20, 539-553.
30. Nelson, J. D.; Overton, D. D.; & D. B. Durkee, 2001. Depth of Wetting and the Active Zone, Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations. ASCE, pp. 95-109.
31. Niu, X. Y.; Yan-Hua, W.; Hao, Y.; Jia-Wen, Z.; Jun, Z.; Mei-Na, X.; & X. Biao, 2015. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake Watershed, China, *Pedosphere*, 25, 103-111.
32. Norouzi-Shokrlu, A.; Pajouhesh, M.; & K. Abdollahi, 2020. Relating Sediment Yield Estimations to the Wet Front Term Using Rainfall Simulator Field Experiments. *Water Resource Manage*, 34, 4181-4196. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02664-8>
33. Rangsiwanichpong, P.; Kazama, S.; & L. Gunawardhana, 2018. Assessment of sediment yield in Thailand using revised universal soil loss equation and geographic information system techniques, *River Research and Application*, 34, 1113-1122.
34. Restrepo, J. D.; Kjerfve, B.; Hermelin, M; & J. C. Restrepo, 2006. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River Colombia, *Journal of Hydrology*, 316, 213-232.
35. Rose, C. W., 1993. Erosion and sedimentation. In: hydrology and water management in the humid tropics - Hydrologic Research Issues and Strategies for Water Management, M. Bonell, M. M.

36. Santos, F. L.; Reis, J. L.; Martins, O. C.; Castanheira, N. L.; & R. P. Serralheiro, 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils, *Biosystems Engineering*, 86, 355-364.
37. Seeger, M.; Errea, M. P.; & S. Begueria, 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees, *Journal of Hydrology*, 288, 299-311.
38. Sharma, K.; Singh, H.; & O. Pareek, 1983. Rainwater infiltration into bare loamy sand, *Hydrological Sciences Journal*, 28, 417-424.
39. Stern, R.; Ben-Hur, M.; & I. Shainberg, 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses, *Soil Science*, 152, 455-462.
40. Thuy, H. T.; & G. Lee., (2017). Soil loss vulnerability assessment in the Mekong River basin. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 18, 37-47.
41. Vahabi, J., & M. H. Mahdian., (2008). Rainfall simulation for the study of the effects of efficient factors on runoff rate. *Current Science*. 95, 1439-1445.
42. Van de Giesen, N. C.; Stomph, T. J.; & N. De Ridder, 2000. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape, *Hydrological Processes*, 14, 165-175.
43. Varvani, J., & M. R. Khaleghi., (2019). A performance evaluation of neuro-fuzzy and regression methods in estimation of sediment load of selective rivers. *Acta Geophysica*. 67, 205-214.
44. Walkey, A., & I. A. Black., (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37, 29-38.
45. Walling, D. E.; Collins, A. L.; Sickingabula, H. A.; & G. J. L. Leeks, 2001. Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: A Zambian Example. *Land Degradation and Development*, 12, 387-415.
46. Wei, S.; Puling, L.; Mingyi, Y.; & X. Yazhou, 2003. Using REE tracers to measure sheet erosion changing to rill erosion, *Journal-chinese rare earth society-chinese edition*, 21, 711-715.
47. Wells, R. R.; Römken, M. J. M.; Parlange, J. Y.; DiCarlo, D. A.; Steenhuis, T. S.; & S. N. Prasad, 2007. A simple technique for measuring wetting front depths for selected soils, *Soil Science Society of America Journal*, 71, 669-673.
48. Williams, B. M.; Martinez-Mena, S.; & L. Deeks, 2004. Exponential distribution theory and aggregate erosion, *Soil Science Society of America Journal*, 6, 382-391.
49. Williams, J.; Izauralde, R.; & E. M. Steglich, 2008. Agricultural policy/environmental extender model theoretical documentation. Texas, Blackland Research and Extension Center.
50. Wolancho, L. W., 2010. Watershed management: an option to station dam and reservoir function in Ethiopia, *Journal of Environmental Science and Technology*, 5, 262-273.
51. Yang, Q.; Meng, F. R.; Zho, Z.; Chow, T. L.; Benoy, G.; Ress, H. W.; & C. P. A. Bourque, 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 132, 23-31.
52. Zhang, H.; Wei, J.; Yang, Q.; Baartman, J. E.; Gai, L.; Yang, X.; Li, S.; Yu, J.; Ritsema, C. J.; & V. Geissen, 2017. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the revised universal soil loss equation for large watersheds, *Geoderma*, 308, 36-45.
53. Zhao, Q.; Li, D.; Zhuo, M.; Guo, T.; Liao, Y.; & Z. Xie, 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope, *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29, 609-21.

54. Zuoda, Qi.; Gelin, K.; Chunli, C.; Yu, Q.; Ze, X.; & W. Yuqiu, 2017. Comparison of SWAT and GWLF Model Simulation Performance in Humid South and Semi-Arid North of China, *Water*, 567, 1-19.

Investigation of the Effect of Wetting Depth on Estimation of Runoff and Sediment Production Capacity Using the Modified Williams Equation (Study Area: Qalat Shahrekord Range)

Mehdi Pajouhesh¹: Associate professor, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Shahrekord, Chaharmahal va bakhtyari

Shiva Parsi: Ms.c in Watershed Management, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Shahrekord, Chaharmahal va bakhtyari

Nasrin Gharahi: Assistant Professor, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Shahrekord, Chaharmahal va bakhtyari

Khodayar Abdollahi: Assistant Professor, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Shahrekord, Chaharmahal va bakhtyari

Article History (Received: 2021/02/6

Accepted: 2022/01/11)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.3.0

Extended abstract

1- Introduction

Depth to wet front is generally considered as the amount of water which penetrates into soil and wets the internal soil layer. This is an important variable especially in applications such as runoff generation and sediment yield estimation. This variable in some cases is used as a hydrological science in the form of a proxy for infiltration as an important factor in soil erosion processes. The importance and necessity of this research is estimating the performance of suspended sediment by adding the wetting depth variable to the regional model. The aim of this study was to investigate the effect of wetting depth on runoff and sediment production capacity by using the modified Williams equation.

2- Methodology

In this field study, a rain simulator equipped with drip systems installed on a test site on a mountain slope to produce rainfall with intensities of 45 and 60 mm per hour on three slopes of 10, 20 and 30% was used with three replications. Adjacent to the experimental plots, soil surface depth was used to determine the physical and chemical properties of the soil, including soil texture, lime percentage, organic matter, initial moisture and aggregate stability. After setting the artificial sprinkler on the experimental plot, runoff and sediment obtained from each plot were collected in special bottles at 10-minute intervals and transferred to the laboratory. Then the amount of sediment produced at the end of each precipitation was weighed and calculated for each plot. Then, to measure the wetting depth using thin tissue rods, the wetting depth was measured every 10 minutes in diameter with 3 repetitions inside the plot. Explanation coefficient (R²) and Nash-Sutcliffe return (Nse) were used as sediment yield criteria for the model.

3- Results

According to the results obtained in the study area and the efficiency coefficient, before adding the wetting depth parameter, the effect of precipitation intensity on sediment indicates a significant difference. The Nash coefficients at intensities of 45 and 60 mm/h are 0.84 and 0.63%, respectively, while the Nash coefficient for the combined intensities (total) of 45- and 60 mm/h is 0.55. Due to the low Nash coefficient in the Williams equation, for investigating the wetting depth on the amount of sediment, the Williams equation was modified. Based on the results in the study area, the relationship between wetting

¹ Corresponding Author: Pajouhesh.mehdi@sku.ac.ir

depth and the amount of suspended sediment in the mentioned intensities and slopes through the equation of $Q_s = (q_e \times q_{pe})^{0/32} \times S^{0/28} \times 1/17^{dp} \times D_A^{2/89}$ was obtained. Sediment performance has a non-linear and inverse relationship with wetting depth at the desired intensities and slopes, and also with the parameters of slope, runoff volume, runoff peak discharge and area. The results showed that the extent that increasing the slope, runoff, runoff peak and area leads to increasing the amount of sediment, and increasing the wetting depth reduces the amount of suspended sediment. The calibration and validation results of estimating the amount of suspended sediment in the developed model showed the value of $Nse = 0.81$; $R^2 = 0.81$.

4- Discussion & Conclusions

This study investigated the effect of wetting depth on runoff and sediment production capacity in the field at slopes of 10, 20 and 30% with rainfall intensities of 45 and 60 mm/h using the modified Williams equation. In the present case without considering the wetting depth variable, the results showed that at intensities of 45 and 60 mm/h, the amount of sediment and runoff increases by increasing the slope. This is because the shear energy poured on the soil by raindrops has produced runoff and sediment. But by combining rainfall intensities of 45 and 60 mm per hour, the amount of Nash coefficient decreased. One of the reasons for this is the increase in the diameter of raindrops and also the increase in the number of droplets that hit the soil surface. Although increasing the intensity of rainfall in most soils increases sediment by increasing runoff, it can sometimes reduce sediment efficiency by reducing sediment due to the spatial homogeneity of the slope of the soil surface layer. Addition of slope and wetting depth parameter, which is due to the amount of infiltration that moistens the soil around the bottom layers, is one of the factors that affect the production of sediment. The results of evaluating the efficiency of the regional model showed that the equation obtained for the region fits well with the observational data to the extent that the coefficient of explanation of fitted lines on the data increased by adding the wetting depth variable. There is an inverse exponential relationship between the amount of leached sediment and the wetting depth. Performance coefficient indices such as sedimentation coefficient and explanation coefficient, as two of the most widely used indicators to evaluate the results in the simulation of the amount of sediment, showed the value of $Nse = 0.88$ and $R^2 = 0.88$. The results of estimating the amount of suspended sediment in the calibration ($Nse = 0.81$; $R^2 = 0.81$) and validation ($Nse = 0.81$; $R^2 = 0.81$) stages were very suitable for the study area.

Key Words: Rainfall intensity, Slope, Soil erosion, Suspended sediment, Wet depth.