نشریه

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال هفتم- شماره ۲۱- تابستان ۱۳۹۲ Vol. 7, No. 21, Summer 2013

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر خصوصیات بارش و شیب دامنه بر تنش برشی جریان و تشکیل شیار در سازند مارن (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان)

امین ذرتی پور[1*]، علی سلاجقه[2]، حسن احمدی[3]، محمود عرب خدری[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۰۲

چکیده

ذرات خاک در نتیجه وارد شدن نیروی تنش برشی جریان ناشی از باران، شروع به حرکت نموده، به طوری که با تداوم آن، رخساره شیاری در دامنه‌ها توسعه پیدا می کند. بررسی چگونگی تشکیل رخساره شیاری در فواصل زمانی و مکانی روی دامنه‌ها و نیز شرایط آستانه‌ای حاکم در شکل گیری آن، در درک بهتر فرایندهای فرسایش خاک و نیز تبیین و توسعه مدل‌های بومی فرسایش خاک، سودمند است. این مطالعه با استفاده از شبیه‌ساز باران به بررسی آزمایشگاهی تغییرات تنش برشی و بررسی آستانه‌های زمانی و مکانی تشکیل شیار بر روی سازند Gy۱ (مارن گچی و نمکی) در شدت بارندگی‌های معرف حوضه طالقان و در شیب‌های معرف سازند مذکور می‌پردازد. در نهایت متوسط تنش برشی جریان از حدود ۰/۲۱ تا ۱/۳۸ پاسکال برآورد گردید. از نظر آماری تاثیر عوامل شیب و شدت بارندگی، همچنین تاثیر متقابل هر دو عامل بر مقدار تنش برشی و هدررفت خاک در سطح معنی‌داری بالا (P<۰۱/۰) بود. ضمناً فاصله از بالای شیب تا نقطه شروع شیار با افزایش شیب و شدت بارندگی بصورت رابطه توانی کاهش یافت. متوسط هدررفت خاک برای باران با شدت‌های ۱۰میلی‌متربرساعت۰/۴۵، شدت‌های ۵۵ میلی‌متر برساعت۷/۳ وبرای شدت‌های۱۱۰ میلیمتربرساعت ۲۵/۶ کیلوگرم برآورد گردید. براین اساس مشخص شد که در سازند زمین‌شناسی Gy۱ (مارن گچی- نمکی) با افزایش شدت بارندگی هدررفت خاک افزایش می یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر دو عامل به طور مجزا و متقابل بر مقادیر تنش برشی و در نهایت هدررفت خاک دامنه تاثیر دارند.

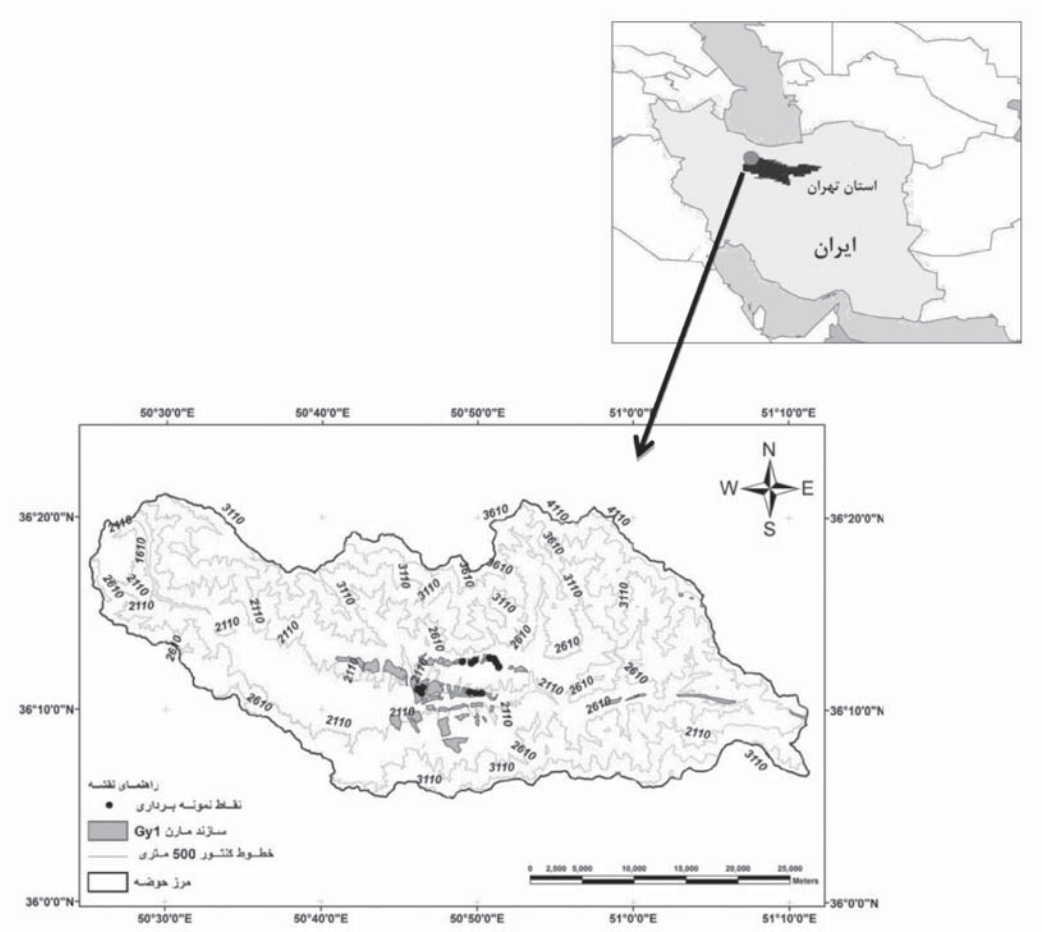
واژه‌های کلیدی: هدررفت خاک، تنش برشی، فرسایش شیاری، شدت بارندگی، شبیه ساز باران و سازند مارن گچی- نمکی.

مقدمه

براساس قانون آستانه حرکت ذرات، در جریانهای سطحی ناشی از بارش، کنش ذرات وقتی صورت می‌گیرد که تمام متغیرهای هیدرولیکی نظیر دبی جریان، قدرت آبراهه و تنش برشی بزرگتر از مقادیر بحرانی آنها در خاک گردند، [۷]. شروع حرکت ذرات در نتیجه وارد شدن نیروی تنش برشی جریان ناشی از باران به ذرات است [۸]. همچنان که تنش برشی بر روی دامنه‌های شیبدار به آهستگی افزایش می‌یابد (با در نظرگرفتن دیگر آستانه‌های هیدرولیکی جریان)، به نقطه بحرانی خواهد رسید که در آن، ذرات در جهت شیب دامنه شروع به حرکت می‌نمایند. بررسی تغییرات تنش برشی و پارامترهای هیدرولیکی جریان جزء اصول اولیه در بررسی زیرفرایندهای فرسایش آبی و به کلامی دیگر فرسایش‌های ورقه‌ای، بین شیاری و شیاری است [۷]. فرسایش شیاری از تمرکز جریانهای کم عمق و نازک سطحی رخ می‌دهد. به طوری که روان‌آب تمرکز یافته، ذرات خاک را با سرعت بیشتری نسبت به فرسایش بین شیاری جدا می‌نماید. با تداوم بارش، نیروی جریان و جداشدن ذرات خاک در اراضی شیبدار، شیارها را بزرگتر می‌نماید [۵]. فرسایش شیاری تابعی از عامل فرسایش‌پذیری خاک، ظرفیت انتقال روان‌آب و تنش هیدرولیکی جریان آب می‌باشد [٦]. گسترش فرسایش شیاری به نیروی برشی[5] آب (قدرت جداسازی آب) و مقاومت خاک[6] در برابر جدا شدن ذرات آن از یگدیگر بستگی دارد. شیارها پس از بوجود آمدن، به طرف بالادست و پایین دست دامنه‌های شیبدار گسترش می‌یابند. البته اکثر شیارها ابتدا با پیشروی به طرف بالادست گسترش می‌یابند. سرعت این پیشروی به مقدار جریان، شیب زمین و مقاومت خاک بستگی دارد [۵]. شرایط بحرانی تشکیل شیار مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این راستا تووی و همکاران [۱۲]، براساس نتیجه حاصل در مطالعه خود درباره فرسایش شیاری اظهار نمود که عامل اصلی تولید شیار توزیع غیر یکنواخت تنش برشی در سطح دامنه است. وی همچنین بیان نموده

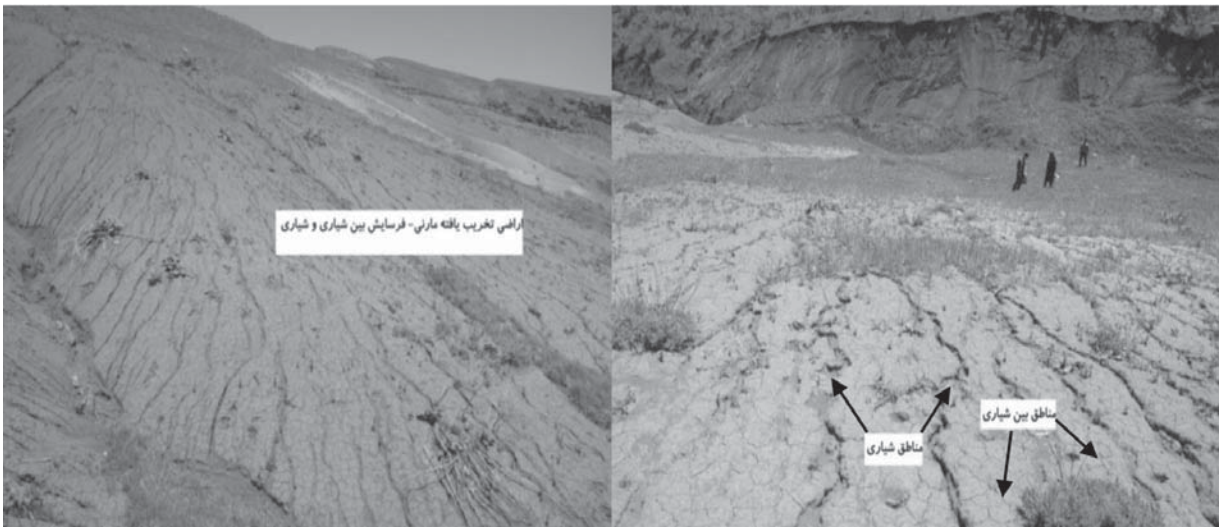
۱- نویسنده مسئول و استادیار دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، Email: Zoratipor@yahoo.com.
۲- دانشیار دانشگاه تهران
۳- استاد دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران - گروه آبخیزداری
٤- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

5- Shear force
6- Soil resistance



شکل۱- موقعیت و نقاط نمونه‌برداری در حوزه آبخیز طالقان

است تنش برشی و نرخ کنش جریان در وسط شیار دارای بیشترین مقدار است. همچنین بیان داشت در صورتی که جریان درون شیارها ادامه یابد، شروع به زیرشویی نموده تا زمانی که تنش برشی جریان با تنش بحرانی خاک همسان شود ادامه می‌یابد، به طوری که شیار به عمق نهایی خود می رسد، ازآن پس هیچ گونه فرسایشی صورت نمی‌گیرد. مطالعات اندکی بر روی تاثیر شیب و شدت بارندگی و چگونگی تاثیر این عوامل بر تنش برشی صورت گرفته است. یائو و همکاران [۱۳]، مطالعه خود را در آزمایشگاه شبیه ساز باران برروی خاک سیلتی لومی در ۵ شیب مختلف و ۳ شدت بارندگی با دستگاه شبیه‌ساز باران انجام داد. نتایج مطالعات نشان داد که شیب از اهمیت نسبی بالاتری نسبت به شدت بارندگی و همچنین تعیین موقعیت شکل‌گیری شیار دارد. تنش برشی در این مطالعه از حدود ۱/۳۳ $_{Pa}$ تا ۲/۶۳ و بطور متوسط ۱/۹٤ $_{Pa}$ برآورد گردید. همچنین مشخص گردید تنش برشی بحرانی ارتباط معکوسی با شیب دارد و متاثر از شدت بارندگی نمی‌باشد. ناپن و همکاران [۷]، در تحقیقی جامع بصورت مرور منابع، در خصوص عوامل موثر در مقاومت خاک، در برابر جریانهای متمرکز، مقدار فرسایش‌پذیری شیاری را برای ٤۷۰ خاک مختلف بین $۱۰^{-۳}$ × ۰/۰۰۲ و $۱۰^{-۳}$ × ۲۵۰ ثانیه بر متر و تنش برشی را بر اساس ۵۲۲ آزمایش صحرایی بین صفر تا ۱۵ پاسکال عنوان کرد. آنها عنوان کردند که دو عامل فرسایش‌پذیری شیاری و تنش برشی مستقل از یکدیگر هستند و همچنین خاک و خصوصیات محیطی، بر مقدار فرسایش‌پذیری شیاری و ایجاد آن تاثیر می‌گذارد. وی همچنین در مطالعه خود بیان نمود که اغلب فرسایش‌پذیری شیاری (K_r) پارامتر مناسب‌تری نسبت به تنش برشی برای بیان تغییرات مقاومتی خاک در برابر شرایط مختلف فرسایشی محیطی و خاکی نظیر چگالی مخصوص خاک، محتوی رطوبتی خاک به نظر می‌رسد [۷]. بطور کلی سازندهای مارنی گچی- نمکی به‌دلایل مختلف نسبت به فرسایش بسیار حساس بوده و یکی از منابع مهم رسوب در حوزه آبخیز طالقان می‌باشند [۱]. مساحت انواع مارنها در سطح ایران حدود ۲۵-۳۰ میلیون هکتار برآورد شده است [۱]. بنابراین تحقیقات بیشتری در مورد عوامل مؤثر بر فرسایش روی اراضی سازند مارنی گچی- نمکی ضرورت دارد. هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی تغییرات تنش برشی و همچنین بررسی آستانه‌های زمانی و مکانی تشکیل شیار بر روی سازند زمین‌شناسی مارن $Gy_۱$ در شدت بارندگی‌های و شیب‌های معرف سازند در منطقه مطالعاتی است. یائو و همکاران [۷] در مطالعه خود بیان نمود



شکل‌های ۲و۳- اشکال فرسایش بین شیاری و شیاری در اراضی سازند مارن گچی- نمکی Gy_1 حوزه آبخیز طالقان

که دو پارامتر هیدرولیکی جریان که در شکل‌گیری رخساره فرسایش شیاری موثر می باشند، فاکتور تنش برشی و سرعت جریان در سطح دامنه می‌باشد. فاکتور تنش برشی هیدرولیکی جریان با استفاده از رابطه زیر اندازه‌گیری می‌شود، (Cao و همکاران) [٤]:

$$\tau = \rho g h s \qquad (۱)$$

بطوریکه در آن τ، تنش برشی جریان (Pa)، ρ چگالی سیال (کیلوگرم برمترمکعب)، h عمق جریان (m)، g شتاب گرانشی (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، S شیب فلوم (متربه متر) است. همچنین بمنظور برآورد عمق جریان (h)، بر اساس رابطه پیوستگی جریان، برای دبی واحد در عرض فلوم می توان از رابطه زیر استفاده نمود (Yao و همکاران)، [۱۳]:

$$h = \frac{q}{V} \qquad (۲)$$

که در آن h متوسط عمق آب در هر نقطه از فلوم (m)، q دبی واحد جریان ($m^2 s^{-1}$) در عرض فلوم و در نهایت V سرعت جریان ($m\ s^{-1}$) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در زیر حوضه کرکبود طالقان، یکی از شاخه‌های آبخیز سفید رود انجام گرفت. وسعت کل حوضه طالقان۱۲٤۳ کیلومترمربع و محیط آن ۲۰٦ کیلومتر می باشد. سازند مارن Gy_1 حوزه آبخیز طالقان در شیب‌های کم تثبیت یافته بوده و فعالیت فرسایش پایینی دارد و پوشش گیاهی تنکی دارا است، ولی در شیب‌های بالاتر فعالیت فرسایش بالایی دارد، [۱]. در این مطالعه ابتدا طبقه‌بندی شیب سازند Gy_1 حوزه آبخیز طالقان به سه کلاس،۰ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۰ درصد و ۳۰ تا ٦۰ درصد انجام گردید. با توجه به بررسی نقشه کاربری حوزه، نوع کاربری اراضی، شیب ۰-۱۵ درصد، جز اراضی کشاورزی دیم و آبی زیرحوزه کرکبود محسوب شده و جزء اراضی مرتعی نبوده، بنابراین این کلاس در فرایند شبیه‌سازی استفاده نگردید، از اینرو دو شیب ۲۲/۱٦ درصد، میانه کلاس شیب متوسط زیرحوزه و ٤٤/٦۳ درصد، میانه کلاس شیب بالای زیرحوزه کرکبود، بعنوان شیب‌های معرف جهت شبیه‌سازی فرایند بارش- فرسایش انتخاب گردیدند. همچنین با بررسی منحنی‌های شدت- مدت- فراوانی ایستگاه سینوپتیک طالقان، سه کلاس شدت بارش کم، متوسط و بالا در دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی گردید و سپس از میان بارانهای شبیه‌سازی شده، بارانهایی که دارای بیشترین ضریب یکنواختی بودند انتخاب شدند. در نهایت، باران‌های با شدت ۱۰، ۵۵ و ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب معرف شدت‌های باران کم، متوسط و بالای منطقه مطالعاتی بودند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی، در ٤ منطقه رخنمون شده سازند مارن Gy_1 در حوزه طالقان، که در منطقه سه نقطه نمونه‌برداری شد (شکل۱)، در جدول (۱) آورده شده است. خاک مورد مطالعه از اراضی تخریب یافته مارنی دارای بافت رسی و ساختمان توده‌ای (بدون ساختمان) است. مقدار سنگ و سنگریزه در این خاک ۸/۵٪ اندازه‌گیری گردید.

در مرحله آماده‌سازی فلوم، ۱۵ سانتی‌متر کف فلوم را از ذرات ماسه درشت دانه (۱-۲سانتی‌متر)، بعنوان لایه زهکش پر گردید و بر روی آن ۲۵ سانتی‌متر از خاک سطحی سازند مارن Gy_1 گذاشته شد. خاک سازند از عمق ریشه (۵۰ سانتی متر بالایی سطح خاک) [۱۱و۳]، از اراضی تخریب یافته مارنی منطقه برداشت و بعد از انتقال به سایت آزمایشگاه هوادهی شده و از الک یک سانتی‌متر عبور داده شد [۱۱و۳]. تیمارهای آزمایشی در این مطالعه در سه شدت بارندگی ۱۰ و ۵۵ و ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت و ۲ شیب ۲۲/۱٦ و ٤٤/٦۳ درصد در دو تکرار آزمایشی انجام گرفت. بنابراین ۱۲ آزمایش شبیه‌سازی باران- فرسایش در شیب‌ها و شدت‌های مورد نظر (شرایط بحرانی) در روی فلوم خاک انجام گردید (جدول۲).

هر آزمایش بمنظور همگنی در منحنی رطوبتی خاک فلوم، ۲٤ساعت

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در شبیه‌سازی

خصوصیات خاک	واحد	ماکزیمم	مینیمم	میانگین
شن	درصد	١٤	٦	٨
سیلت	درصد	٤٨	٣٢	٣٨
رس	درصد	٦٢	٤٦	٥٤
وزن مخصوص ظاهری	گرم بر سانتی‌متر مکعب	١/٤٤	١/٣٥	١/٤
تخلخل	درصد	٥٥/٧	٣٨/٦	٤٦/١٥
مواد آلی	درصد	٠/٩٥	٠/٣	٠/٤٥
هدایت الکتریکی (EC)	دسی زیمنس بر متر	٠/٧	٠/٦	٠/٦٥
PH عصاره اشباع	---	٨	٧/٧	٧/٩
کربنات کلسیم (Caco٣)	درصد	٢٨/٨	١٦/٩	١٩
گچ	درصد	١٨/٥	٨/٢	١١/٣
سدیم تبادلی (ESP)	درصد	٣/٧	٥/٥	٤/٥
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	میلی اکی والانت در ١٠٠ گرم	٣١/٨	٢٣/٢	٢٦/٨
نسبت جذب سدیم SAR	میلی اکی والانت در لیتر	٢/٦	٣/٩	٣/٢
رطوبت اشباع	درصد	٥٧/٦	٣٨/٣	٤٢/٢

بعد از عمل اشباع سازی فلوم انجام گرفت [٨ و٩]. زمان نمونه‌برداری بعد از رسیدن اولین روان‌آب به خروجی فلوم آغاز گردید. زمان شروع روان‌آب و زمان تشکیل اولین شیار بر خاک ثبت گردید. در هر آزمایش نمونه‌های رسوب و دبی روان‌آب خروجی بعد از شروع روان‌آب در فواصل زمانی یک دقیقه ای نمونه‌بردای می‌گردید. دبی نمونه‌ها در هر نمونه‌برداری از روش حجمی با استفاده از ظروف استوانه‌ای پلاستیکی تعیین گردید. سرعت روان‌آب با استفاده از تکنیک ردیابی رنگ [٤ و ٧] صورت گرفت. در این راستا تاثیر سطوح مختلف شدت بارندگی در شیب‌های مختلف فلوم بر تنش برشی جریان به صورت آزمون تجزیه عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS ١/٩ تجزیه و تحلیل گردید. فاکتورها شامل میزان شدت بارندگی (١٠، ٥٥ و mm١١٠) و شیب‌های مختلف فلوم (٢٢٪ و ٤٤٪) بودند. مقایسه میانگین بین تیمارها با استفاده از آزمون توکی در سطح معنی‌داری ٠/٠٥ انجام گردید. در نهایت این تحقیق بعد از انجام چهار مرحله نمونه‌برداری صحرایی، واسنجی شبیه‌ساز باران، اندازه گیری‌ها و نمونه‌برداری آزمایشگاهی و در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌ها در شیب و شدت‌های مختلف بارش بصورت زیر مشخص گردید.

نتایج

این سازند از نظر بافتی از درصد رس بالایی برخوردار و مواد آلی ناچیزی داشته، بطوری که در منطقه مطالعاتی بیشتر سطوح بصورت سله‌بندی شده قابل رویت هستند. میزان رس بیشتر از ٤٠ درصد، خاکدانه‌های کوچکتری را تشکیل داده که به آسانی با ضربات قطرات باران متلاشی می‌شوند. درصد سدیم تبادلی (ESP) و نسبت جذب سدیم (SAR) نیز در این خاک پایین بوده، بنابراین جزء خاک‌های قلیا و شور و سدیمی محسوب نمی‌شود. البته املاح نمکی بخاطر آبشویی لایه فوقانی سازند، توسط فرسایش بین شیاری و شیاری، یا به سطوح پایین سازند رفته و یا از دسترس خارج شده‌اند. نتایج مربوط به نقطه شروع شیار از بالای فلوم (آستانه مکان شیار)، زمان شروع روان‌آب (آستانه تولید روان‌آب) و زمان شروع شیار (آستانه زمانی شیار) و مقدار هدررفت خاک در هر آزمایش ثبت گردید و در جدول (٣) آورده شده است.

با توجه به جدول (٣)، مشخص گردید که در شدت‌های ١٠میلی متربرساعت درشیب ٢٢درصد، رخساره فرسایش شیاری در طول فلوم ایجاد نمی‌گردد. از نظر زمانی با افزایش مقادیر شیب و شدت بارندگی، هم در ایجاد جریان روان‌آب ناشی از بارش و هم در تشکیل رخساره شیار تسریع می‌شود و روند معنی‌داری را در دامنه‌های سازند مارن نشان می‌دهد. به کلامی دیگر با افزایش شیب و شدت باران، جریان روان‌آب و تشکیل شیار در زمان زودتری بوقوع می‌پیوندد. همچنین از نظر مکانی اگرچه مکان رخساره شیارها، با افزایش شیب تغییر محسوسی ندارد، ولیکن با افزایش شدت بارش روند تغییرات شدیدتر بوده و شیارها بسمت بالای فلوم توسعه می‌یابند.

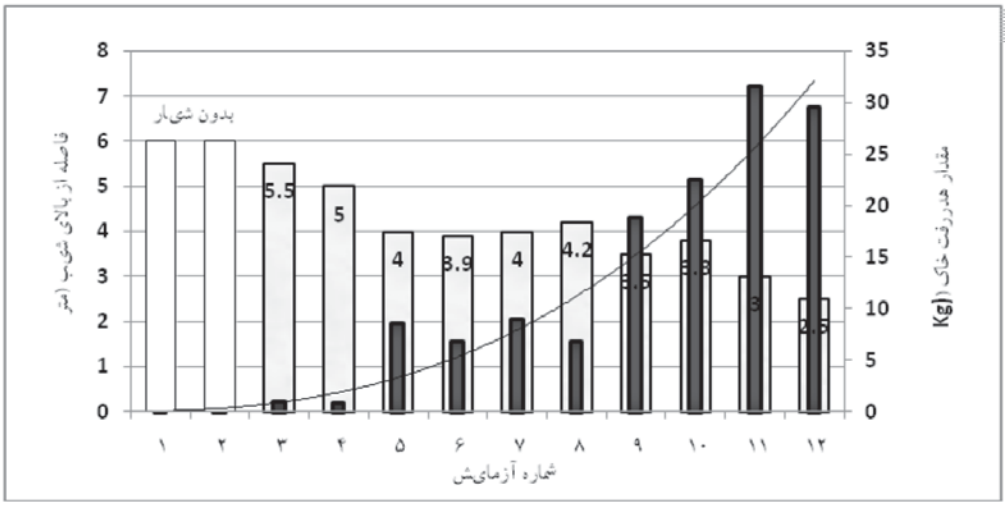
با توجه به شکل (٤) مشخص گردید از میان کلیه آزمایشها بیشترین هدررفت فرسایش شیاری در آزمایش ١١ و ١٢ یعنی مقدار شدت بارندگی ١١٠ میلی متربرساعت و شیب ٤٤ درصد، با میانگین ٢٥/٢

جدول ۲- تعداد تیمارها و تکرارهای آزمایشی اجرا شده در مطالعه آزمایشگاهی

درصد شیب	شدت بارندگی					
	۱۰		۵۵		۱۱۰	
۲۲/۱۶	۲	۱	٦	۵	۱۰	۹
٤٤/٦۳	٤	۳	۸	۷	۱۱	۱۲

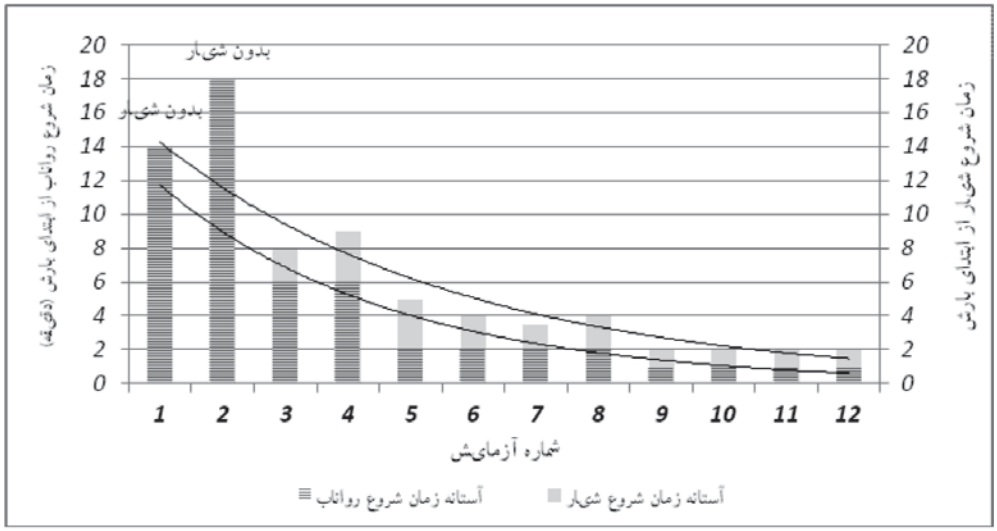
جدول ۳- مقادیر آستانه مکانی و زمانی تولید شیار و آستانه تولید روان‌آب و نرخ کنش خاک

آزمایش	شدت بارش (mm/h)	شیب (درصد)	تکرار	زمان شروع رواناب (min)	زمان شروع شیار (min)	فاصله از بالای شیار (m)	مقدارکل هدر رفت خاک (Kg m-2)
۱	۱۰	۲۲	۱	۱۴/۸	بدون شیار	۶	۰/۰۲
۲	۱۰	۲۲	۲	۱۸/۱	بدون شیار	۶	۰/۰۱۷
۳	۱۰	۴۴	۱	۶/۴	۸/۹	۵/۵	۰/۱۴۲
۴	۱۰	۴۴	۲	۶/۹	۹/۱	۵/۱	۰/۱۲
۵	۵۵	۲۲	۱	۲/۹	۵/۲	۴/۲	۱/۴۱۷
۶	۵۵	۲۲	۲	۲/۶	۴/۳	۳/۹	۱/۱۳۳
۷	۵۵	۴۴	۱	۲/۳	۳/۵	۴/۱	۱/۴۸۳
۸	۵۵	۴۴	۲	۲/۲	۴/۱	۴/۲	۱/۱۱۷
۹	۱۱۰	۲۲	۱	۱/۶	۲/۱	۳/۵	۳/۱۳۳
۱۰	۱۱۰	۲۲	۲	۱/۸	۲/۳	۳/۸	۳/۷۵
۱۱	۱۱۰	۴۴	۱	۱/۱	۱/۸	۳/۲	۵/۲۵
۱۲	۱۱۰	۴۴	۲	۱/۳	۱/۲	۲/۵	۴/۱۹



شکل ٤- نمودار آستانه مکانی تولید شیار و مقادیر هدررفت در تیمارهای آزمایش

کیلوگرم هدررفت خاک رخ داده است. بعد از آن شدت بارندگی ۵۵ میلی متربرساعت با هدررفت متوسط ۷/۷۲ کیلوگرم و در درجه بعدی، فرسایش در شدت‌های۱۰میلی متربرساعت با هدررفت متوسط ۰/٤۵کیلوگرم اندازه‌گیری شدند. همچنین، هدررفت خاک در شدت‌های بالا به سمت شدت‌های پایین دارای روندی کاهشی و معنی‌دار با ضریب همبستگی ۹۱ درصد محاسبه گردید. در کلیه



شکل ۵- نمودار آستانه زمانی تولید شیار و تولید روان‌آب در تیمارها و تکرارهای آزمایش

جدول٤ – اثر تغییرات شدت باران و شیب در هدررفت خاک

شیب (درصد)	متوسط تنش برشی در شدت‌های مختلف (نیوتن بر مترمربع)			
	تکرار	۱۰میلی متربرساعت	۵۵ میلی تربرساعت	۱۱۰میلیمتربرساعت
۲۲	۱	۰/۲۱۷٦	۰/۸	۰/۹
۲۲	۲	۰/۲	۰/۷۵	۰/۸۹
٤٤	۱	۰/۲۷	۱/۲٤	۱/٤۷
٤٤	۲	۰/۲۸۲	۱/۲۲	۱/۳۸

جدول ۵ – اثر تغییرات شدت باران و شیب در تنش برشی جریان

شیب (درصد)	متوسط هدررفت خاک در شدت‌های مختلف (کیلوگرم)			
	تکرار	۱۰میلی متربرساعت	۵۵ میلی متربرساعت	۱۱۰میلی متربرساعت
۲۲	۱	۰/۱۲	۸/۵	۱۸/۵
۲۲	۲	۰/۱	٦/۸	۲۲/۵
٤٤	۱	۰/۸۵	۸/۹	۳۱/۵
٤٤	۲	۰/۷۲	٦/۷	۲۹/۵

آزمایشها با افزایش شدت بارندگی طول شیب تشکیل شیار (فاصله از بالای فلوم) کاهش یافته، یعنی شیارهای تولیدشده در شدت‌های بالا، در فاصله کوتاهتری نسبت به بالای فلوم تشکیل می‌شوند.

شکل (۵) نشان داد که با افزایش شدت بارندگی، آستانه زمانی تشکیل شیار نیز روندی کاهشی داشته، یعنی با بالا رفتن شدت باران، زمان ایجاد شیار نسبت به ابتدای بارش کاهش می‌یابد، به دیگر سخن در زمان کوتاهتری از شروع بارش، شیارها توسعه و بسمت بالای فلوم پیشروی می‌نمایند. آستانه زمانی شروع روان‌آب نیز همانند آستانه تولید شیار بوده و بیشتر متاثر از تغییرات شدت بارندگی می‌باشد (شکل۵). در صورتی که زمان تشکیل شیار و روان‌آب، با تغییرات شیب، تغییرات نامحسوسی داشته‌اند.

جدول (٤) نشان داد متوسط هدررفت خاک برای شدت‌های ۱۰میلی‌متربرساعت۰/٤۵، شدت‌های۵۵ میلی‌متربرساعت۷/۳ و برای شدت‌های ۱۱۰ میلی‌متربرساعت ۲۵/٦ کیلوگرم می‌باشد. بنابراین با افزایش عامل شدت بارندگی هدررفت خاک افزایش می‌یابد. شیب نیز رابطه مستقیم و معنی‌داری (در سطح ۹۹درصد) بر مقدار

جدول ٦ – آزمون تجزیه واریانس تاثیر شدت بارندگی در شیب‌های مختلف فلوم بر تنش برشی جریان

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
تکرار	۱	۰/۰۰٦۰۸ ns
شیب	۱	۰/۳۳۷۹ **
شدت بارندگی	۲	۰/۹٤۰۸ **
شیب×شدت بارندگی	۲	۰/۰۵۵۳۹۸ **
خطا	۵	۰/۰۰۲۳۷
ضریب تغییرات (C. V.)	٦/۱۱	
اثر متقابل شیب×شدت بارندگی برای تنش برشی جریان		
شیب	درجه آزادی	میانگین مربعات
٪۲۲	۲	۰/۲۷۲۵ **
٪٤٤	۲	۰/۷۲۲۲ **

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ می‌باشند.

هدررفت خاک سازند مارن دارد. در بارش‌های شبیه‌سازی شده با افزایش شیب از ۲۲ درصد به ٤٤ درصد، هدررفت خاک در شدت ۱۰میلی متربرساعت ٦ برابر، شدت ۵۵ میلی متربرساعت ۲ درصد و برای شدت۱۱۰ میلی متربرساعت ٤۷/۷ درصد افزایش داشته است. بنابراین با افزایش شیب در شدت بارندگی‌های ثابت، هدررفت خاک در سطح ۹۹ درصد افزایش خواهد داشت.

نتایج جدول (۵)، نشان می‌دهد که متوسط تنش برشی جریان در بارش‌های تولید شده از ۰/۲۱ تا ۱/٤۷ پاسکال متغیر است. به گونه‌ای که متوسط تنش برشی برای شدت‌های۱۰میلی متربرساعت ۰/۲٤، شدت‌های ۵۵ میلی‌متربرساعت۱/۰۱ و برای شدت‌های ۱۱۰میلی‌متربرساعت ۱/۱۵ پاسکال برآورد گردید. بنابراین با افزایش شدت بارندگی تنش برشی افزایش می‌یابد. بطور کلی افزایشی تنش برشی در شدت بارندگی ۱۰میلی‌متربرساعت، کندتر از دیگر شدت بارندگی‌ها است و در دیگر شدت بارندگی‌ها روندی افزایشی با شیب تندتری دارد. همچنین شیب تاثیر مستقیم و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد، بر مقدار تنش برشی جریان دارد (جدول ٦). در مطالعه حاضر در بارش‌های شبیه‌سازی شده با افزایش شیب از ۲۲ درصد به ٤٤ درصد، تنش برشی در شدت ۱۰میلی متربرساعت ۳۲/۵ درصد، شدت ۵۵ میلی‌متربرساعت ۵۸/۷ درصد و برای شدت۱۱۰ میلی‌متربرساعت ۵٤/۸ درصد افزایش داشته است. نتایج آزمون تجزیه واریانس، نشان داد که تاثیر عامل شیب و شدت بارندگی بر مقدار تنش برشی جریان در سطح اعتماد یالا معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل هر دو عامل در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار گردید، که این امر ناشی از مقادیر متفاوت تنش برشی جریان برای سطوح مختلف شدت بارندگی در هر دو شیب فلوم بوده است (جدول٦). بیشترین مقدار تنش برشی جریان به طور متوسط ۱/۳۸۸ نیوتن برمترمربع، برای میزان شدت بارندگی ۱۱۰ میلی‌متربرساعت در شیب ٤٤٪ مشاهده گردید. این مقدار با میزان تنش برشی جریان برای همین شیب در شدت ۵۵ بارندگی میلی‌متربرساعت (۱/۲۲۸نیوتن برمترمربع) اختلاف معنی‌داری نداشت.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید با افزایش شدت بارندگی، متوسط فاصله نقطه تشکیل شیار تا بالای فلوم کاهش می‌یابد، این روند گرچه در مورد شیب نامحسوس بوده ولی با افزایش شدت بارندگی تغییرات شدیدی نشان داد، به دیگر سخن در این مورد شدت باران موثرتر است. همچنین از نظر زمانی با افزایش شیب و شدت بارندگی، هم تولید روان‌آب و هم تشکیل رخساره شیاری در زمان زودتری شکل می‌گیرد و روندی معکوس و توانی[1] را در خاک سازند مارن نشان داد. نتایج حاصله با نتایج یائو و همکاران [۱۳] مطابقت دارد. در این مطالعه مشخص گردیدکه خاک‌های تخریب شده مارنی در شدت‌های پایین (۱۰mm/hr) و همچنین شیب‌های کمتراز ۲۲٪ در تشکیل و تولید شیار تاثیری ندارند، به دیگر سخن بارانهای با دوره بازگشت دوساله در ایجاد رخساره شیاری در دامنه ٦ متری موثر نیستند. متوسط تنش برشی جریان در این آزمایش از ۰/۲۱ پاسکال برای محدوده‌های شدت و شیب پایین تا حدود ۱/۳۸ پاسکال برای محدوده شدت و شیب بالا

1- Exponent

برآورد گردید. لازم به ذکر است که مقدار تنش برشی جریان در زمانهای مختلف در هر آزمایش دارای روندی ثابت و تقریبا یکسان می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که عامل تنش برشی تحت تاثیر زمان نمی‌باشد و در زمان‌های مختلف تغییرات یکسانی نشان می‌دهد. با افزایش شیب از ۲۲ درصد به ٤٤ درصد، هدررفت خاک در شدت ۱۰میلی‌متربرساعت ٦ برابر، شدت ۵۵ میلی‌متربرساعت ۲ درصد و برای شدت۱۱۰ میلی‌متربرساعت ٤۷/۷ درصد افزایش داشته است در صورتیکه مقدار هدررفت در یک شیب ثابت با افزایش شدت باران، افزایش شدیدتری داشت. بنابراین شدت بارندگی دارای اهمیت نسبی بیشتری نسبت به شیب در هدررفت خاک دارد. این نتیجه با نتایج یائو و همکاران [۱۳] مطابقت ندارد. علت این امر را می‌توان در عدم استفاده از محدوده بزرگتری از شیب دامنه‌ای در این مطالعه دانست. اثر عامل شیب و شدت بارندگی و همچنین اثر متقابل هر دو عامل بر مقدار تنش برشی و هدررفت جریان معنی‌داری بالایی (**P<۰/۰۱**) نشان داد. بنابراین هر دو عامل به طور مجزا و توام بر مقادیر تنش برشی و در نهایت هدررفت خاک دامنه تاثیر متقابلی دارند. نتایج حاصله با نتایج یائو و و همکاران [۱۳] و شریدان و همکاران[۱۰] مطابقت دارد. متوسط هدررفت خاک برای شدت‌های ۱۰میلی‌متربرساعت۰/٤۵، شدت‌های ۵۵میلی‌متربرساعت ۷/۳ و برای شدت‌های ۱۱۰میلی‌متر بر ساعت ۲۵/٦ کیلوگرم برآورد گردید. بنابراین با افزایش شدت بارندگی هدررفت خاک با روندی توانی افزایش می‌یابد.

منابع

1- Ahmadi, H., 2006. The Applied Geomorphology: Water Erosion vol.1, eighth ed. Tehran University, Tehran. (In Persian)

2- Arabkhedri, M., 2008. Study on Rain Characteristics and Calibration of Rainfall Simulator of Soil Conservation and Watershed Management Research Center. Final Report on 83013-0000-01-040000-003-2 Project. Institute of Soil Conservation and Watershed Management Research, Tehran.(In Persian)

3- Allen, P.M., Arnold, J., Jakubowski, E., 1999. Prediction of stream channel erosion potential. Environmental and Engineering Geo-science 5 (3), 339 –351.

4- Cao, L., Zhang, K., Zhang, W., 2009. Detachment of road surface soil by flowing water. Catena, 76 (2009), 155 – 162.

5- Giménez, R., 2003. The interaction between rill hydraulics, rill geometry and sediment detachment: an experimental approach. Ph.D. Thesis, Department of Geography-Geology, Catholic University of Leuven, Belgium.

6- Govers, G., Giménez, R., Oost, W.K., 2007. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments modelling and field observations, Earth-Science Reviews, 84 (2007), 87 – 102.

7- Knapen, A. J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels,J.Nachtergaele.,2007.Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review, Journal of Earth-Science Reviews 80,75– 109.

8- Kinnell, P.I.A., 2008 a. Raindrop-impact-indused erosion processes and prediction: A review. Hydro Process. Vol. 19. pp. 2815-2844.

9- Nachtergaele, J., Poesen, J., 2002. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. European Journal of Soil Science 53, 449 –463.

10- Sheridan, G.J., So, H.B., Loch, R.J., Pocknee, C., Walker, C.M., 2000a. U se of laboratory-scale rill and interrill erodibility measurements for the prediction of hillslope-scale erosion on rehabilitated coal mine soils and overburdens. Australian Journal of Soil Research 38, 285–297.

11- Romero, C., Stroosnijder, L., Baigorria, G.A., 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. Catena 70, 105–113.

12- Toy, T. J., Foster, G. R., Renard, K. G., 2002. Soil erosion processes, prediction, measurement under simulated rainfall. Soil Sci., Vol. 150, pp. 787-798.

13- Yao, C., Lei, T., Elliot, W.j., McCool, D.K., Zhao, J., chen, S., 2008. Critical Condition for Rill Initiation. Transactions of the ASABE. Vol. 51(1): 107-114.