

جریان، سرعت جریان عاملی مهم در تبیین الگوی تغییرات فرسایش پذیری شیاری تحت شدت های باران بود به طوری که رابطه ای قوی بین آن دو مشاهده شد ( $P < 0/001$  و  $R^2 = 0/99$ ). به طور کلی این پژوهش نشان می دهد که شدت بارندگی عاملی مهم در تغییر شاخص های جریان و فرسایش پذیری شیاری در خاک مارنی است.

**کلید واژه ها:** جریان متمرکز، سرعت جریان، شدت باران آستانه، فرسایش شیاری.

#### مقدمه

فرسایش شیاری عبارت از جداسازی ذرات و انتقال آن ها توسط جریان متمرکز آب روی دامنه است که منجر به تشکیل کانال فرسایش پذیر باریک و دراز روی دامنه می شود [۳]. فرسایش شیاری در کنار فرسایش ورقه ای بیشترین نقش را در فرسایش خاک در دامنه ها ایفاء می کند [۳۱]. فرسایش شیاری در نتیجه تمرکز جریان های کم عمق و نازک سطحی رخ می دهد، به طوری که رواناب متمرکز یافته، ذرات خاک را با سرعت بیشتری نسبت به فرسایش بین شیاری جدا می نماید. با تداوم بارش، نیروی جریان و جدا شدن ذرات خاک در اراضی شیب دار، شیاریها را بزرگتر می نماید [۱۷]. گسترش فرسایش شیاری به عواملی مانند شدت بارندگی، شیب [۲۷] و خصوصیات خاک [۳۴] وابسته است. تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش شیاری را می توان در مفهومی به نام فرسایش پذیری شیاری<sup>۳</sup> بیان کرد. فرسایش پذیری شیاری عبارت از قابلیت خاکها در ایجاد شیاری است [۱۴] به عبارت دیگر سهولت جدا شدن ذرات خاک در اثر جریان متمرکز آب روی دامنه و ایجاد کانال در مسیر جریان را فرسایش پذیری شیاری گویند [۴۰]. هرچه مقاومت خاک در برابر جریان متمرکز بیشتر باشد، فرسایش پذیری خاک کمتر شده و ذرات کمتری از خاک کنده می شوند و در نتیجه از گسترش شیاری جلوگیری می شود [۲۳].

خصوصیات جریان از جمله سرعت و تنش برشی نقشی مهم در فرسایش شیاری دارند [۱۸]. میزان وقوع جریان و خصوصیات آن تحت تأثیر شدت بارندگی، خصوصیات سطح زمین و ویژگی های خاک قرار دارد. تنش برشی جریان نقشی اساسی در ظهور و گسترش

## تغییرات شاخص های جریان و فرسایش پذیری شیاری تحت تأثیر شدت باران در خاک مارنی

مجید فرومدی<sup>۱</sup> و علی رضا واعظی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷

#### چکیده

فرسایش شیاری که در نتیجه تمرکز رواناب بر شیب به وجود می آید، یکی از انواع مهم فرسایش خاک در دامنه ها به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک با پوشش گیاهی ضعیف است. به همین دلیل، شناخت عوامل مؤثر بر آن از اولویت بالایی برخوردار است. فرسایش پذیری شیاری بیانگر سهولت جدا شدن ذرات خاک و انتقال آن ها توسط نیروی برشی آب در شیاری است. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر شدت باران بر تنش برشی جریان ( $\tau$ ) و فرسایش پذیری شیاری ( $K_p$ ) در خاک مارنی انجام گرفت. آزمایش در ۱۰ شدت باران از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی متر بر ساعت با مدت ثابت یک ساعت با سه تکرار در شرایط آزمایشگاهی انجام گرفت. نمونه های خاک مارنی از منطقه نیمه خشک غرب زنجان برداشت گردید و در فلومی به طول ۴ متر و عرض ۰/۹ متر ریخته شد. فرسایش شیاری در سه شیاری دست ساز تحت شرایط آزمایشگاهی بر اساس مدل WEPP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرسایش پذیری شیاری در کنار شاخص های جریان شامل سرعت، دبی، غلظت و تنش برشی تحت تأثیر شدت باران قرار دارد ( $P < 0/001$ ). شدت باران ۳۰ میلی متر بر ساعت به عنوان شدت باران آستانه برای شروع تنش برشی ( $2/37 \times 10^{-2} \text{ N.m}^{-2}$ ) و ایجاد فرسایش شیاری ( $\text{kg.N}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) بود. با افزایش شدت بارندگی، فرسایش پذیری شیاری افزایش یافت ( $P < 0/001$  و  $R^2 = 0/92$ ). این نتیجه به دلیل افزایش ضربه قطرات باران و تخریب بیشتر ساختمان خاک بود که تولید بیش تر جریان متمرکز در شیاریها را به دنبال داشت. برخلاف سایر شاخص های جریان، تنش برشی و غلظت جریان از روند ثابتی همگام با افزایش شدت باران پیروی نکردند. از بین شاخص های

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشگاه زنجان.

۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه

زنجان، پست الکترونیک: vaezi.alireza@gmail.com

[۲۶] روش استدلالی فرسایش‌پذیری و تنش برشی بحرانی در یک شیار فرسوده در یک خاک لومی سیلتی را در چین مورد بررسی قرار دادند. بیش‌ترین شدت جداشدگی از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$D_{\max} = qBA \quad (1)$$

که در آن:  $D_{\max}$  پتانسیل شدت جداشدگی ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )،  $q$  شدت جریان در واحد عرض شیار ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )،  $B$  و  $A$  ضرایب ثابت است. در مطالعه‌ای یان و همکاران [۲۴]، در بررسی فرسایش شکاری، شرایط بحرانی برای شروع شیار را در فلوم آزمایشی در چین با بافت سیلتی لوم مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که تنش برشی بحرانی خاک، شاخص‌های هیدرولیکی، نیروی ثقل، شدت باران، شیب و طول شیب در شروع شیار مؤثر بود. طبق نتایج، تنش برشی بحرانی خاک با شیب رابطه عکس داشت و در شیب‌های بیش‌تر، کم‌تر شد. در پژوهش‌های پیشین غالباً به بررسی فرسایش‌پذیری شکاری در یک یا چند نوع خاک تحت شیب معین پرداخته شده است. با این وجود ارتباط بین تأثیر شدت باران که به عنوان یک عامل اصلی در تخریب خاکدانه‌ها می‌باشد، بر روی خصوصیات مختلف جریان (سرعت، دبی، غلظت و تنش برشی جریان) و فرسایش‌پذیری شکاری تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. اهمیت این موضوع در سازندهای مارنی که دارای ساختمان ضعیف و ناپایدار می‌باشند، بسیار بیش‌تر است. وجود ساختمان ضعیف در کنار افزایش حساسیت خاک به فرآیندهای فرسایش آبی، در کاهش گسترش ریشه‌ها در خاک و توسعه پوشش گیاهی مؤثر است [۳۹]. در این مطالعه سعی گردید که تغییرات خصوصیات جریان و تأثیر آن‌ها بر فرسایش‌پذیری شکاری در باران‌های با شدت مختلف مورد اندازه‌گیری قرار گیرد و از آن رابطه خصوصیات جریان و فرسایش‌پذیری شکاری با شدت باران به دست آید. آگاهی از چگونگی تأثیر شدت باران بر خصوصیات جریان می‌تواند در توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی فرسایش‌پذیری شکاری سودمند واقع گردد.

### مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک

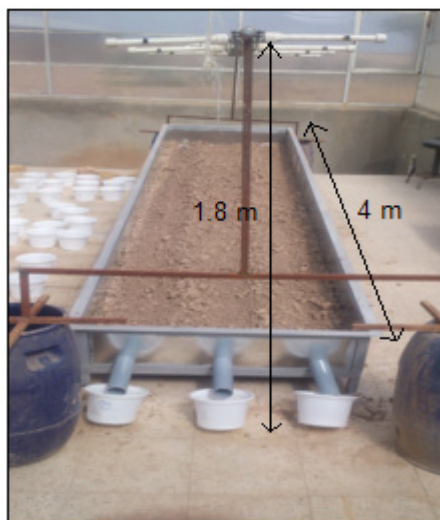
نمونه‌برداری خاک از بخش غربی حوزه آبخیز زنگان رود در شمال غرب استان زنگان با طول و عرض جغرافیایی ( $48^{\circ} 04'$  و  $18^{\circ} E$  و  $36^{\circ} 58' 07'' N$ ) انتخاب شد (شکل ۱). میانگین بارندگی سالانه  $315$  میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بر روی رسوبات کوارتزی واقع شده است. سازندهای مارنی گسترده وسیعی از این منطقه را دربرگرفته‌اند به طوری که حدود  $20$  درصد از سطح استان زنگان را دربرگرفته‌اند. این سازندها به علت داشتن ترکیبات خاص، نسبت به فرسایش حساس هستند، به طوری که بیش‌ترین میزان فرسایش و تولید رسوب حوزه آبخیز سفیدرود را تولید می‌نمایند [۱]. یکی از ویژگی‌های عمده مارن‌های منطقه، ناپایداری ساختمان خاک می‌باشد. مقدار پایین بارش‌های آسمانی و پراکنش نامنظم آن‌ها

شیار در دامنه دارد. با افزایش تنش برشی آب، قدرت آب در کندن خاک بیش‌تر شده و به تدریج شیار در سطح خاک به وجود می‌آید. هر چه تنش برشی آب بیش‌تر باشد، خاک بیش‌تری کنده شده و شیارهای عمیق‌تری ایجاد می‌شود [۷]. شروع حرکت ذرات در نتیجه وارد شدن تنش برشی جریان ناشی از باران به ذرات است [۲۱]. آستانه تشکیل شیار زمانی است که تنش برشی بر مقاومت خاک فزونی یابد و این موضوع متأثر از میزان پوشش سنگریزه‌ای سطح خاک و برخی ویژگی‌های رواناب می‌باشد [۳۷]. بررسی تغییرات تنش برشی و سایر متغیرهای هیدرولیکی جریان جزء اصول اولیه در بررسی زیرفرآیندهای فرسایش آبی و به بیان دیگر فرسایش‌های ورقه‌ای، بین‌شیاری و شکاری است [۲۳].

فرسایش‌پذیری شکاری در مدل‌های مختلف تابعی از تنش برشی جریان، تنش برشی آستانه و ظرفیت جدا شدن ذرات است [۱۳]. در مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP)، پیش‌بینی فرسایش شکاری و بین‌شیاری از یکدیگر جدا شده و از طریق رابطه پیوستگی رسوب در حالت پایدار، برآورد می‌گردند [۱۳]. در مطالعه رومرو و همکاران [۳۴]، به تحقیق درباره فرسایش‌پذیری شکاری و بین‌شیاری در شمال کوهستان‌های آند در جنوب غربی پرو با استفاده از مدل WEPP پرداختند. برای انجام این پژوهش  $17$  مکان در سطح حوزه آبخیز انتخاب و شیارهای دست‌ساز به طول  $3$ ،  $6$  و  $9$  متر در آن ایجاد شد و شیارها تحت باران شبیه‌سازی شده به مدت  $10$  دقیقه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که خاک‌هایی که دارای سیلت بالایی هستند دارای بالاترین فرسایش‌پذیری شکاری و خاک‌هایی که دارای شن بالایی هستند دارای کم‌ترین فرسایش‌پذیری بودند. در مطالعه‌ای هایو و همکاران [۱۹] به بررسی اثرات شدت باران و درجه شیب بر روی فرآیند فرسایش شکاری در یک دامنه لوسی پرداختند. برای این منظور یک تشت خاک به طول  $10$  متر و درجه شیب قابل تنظیم  $30$ – $0$  درجه تحت باران شبیه‌سازی شده قابل تنظیم  $50$ ،  $75$  و  $100$  میلی‌متر بر ساعت قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرسایش شکاری به صورت قابل توجهی به مقدار شدت باران و درجه شیب بستگی دارد ( $P < 0/001$ ). بررسی‌های مختلفی درباره تأثیر ویژگی‌های باران و خاک بر وقوع فرسایش خاک توسط آب انجام گرفته است. در برخی پژوهش‌ها تأثیر انرژی جنبشی باران بر تخریب خاکدانه‌ها، پاشمان ذرات و تراکم خاک بررسی شده است. با افزایش میزان انرژی جنبشی قطرات باران، تخریب خاکدانه‌ها افزایش و در نتیجه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به طور معنی‌دار کاهش می‌یابد [۴۱]. از سوی دیگر قطرات باران با افزایش مقدار رطوبت خاک، میزان تخریب‌پذیری خاک را افزایش می‌دهند [۳۵]. پدیده‌هایی مانند سله و تراکم خاک نیز به شدت تحت تأثیر ضربه قطرات باران قرار می‌گیرند [۳۰] و نقشی مهم در تشکیل جریان و فرسایش خاک ایفاء می‌کنند.

نقش خصوصیات جریان در فرسایش‌پذیری شکاری در برخی مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی لی و همکاران

طراحی فلوم فرسایشی و دستگاه شبیه‌ساز باران برای بررسی تنش برشی و فرسایش‌پذیری شیاری یک دستگاه فلوم به طول ۴ متر و عرض ۹۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و از جنس آهن طراحی و ساخته شد. این ابعاد منطبق با فلوم‌های مورد استفاده در پژوهش‌های لیجوان و همکاران [۳۰] و یان و همکاران [۴۴] بود. در کف فلوم، سوراخ‌هایی برای زهکشی آسان آب نفوذیافته ایجاد شد. در قسمت پایین فلوم، سه قطعه لوله خروجی برای جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب تعبیه شده بود. پس از پر کردن فلوم با خاک، سطح خاک به آرامی تسطیح شد و سپس سه شیار با عمق ۷ سانتی‌متر و فاصله ۳۰ سانتی‌متر شبیه به جویچه‌های کشت گندم [۳۳] در طول فلوم ایجاد شد. فلوم تحت شیب ۱۰ درصد برای بررسی فرسایش شیاری قرار گرفت (شکل ۲).

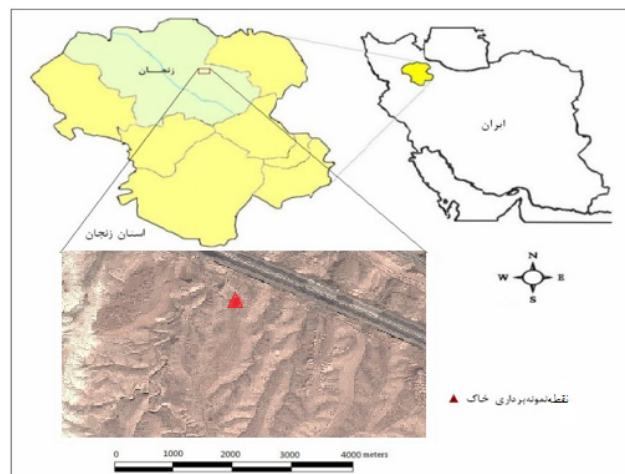


شکل ۲- نمایی از فلوم فرسایشی و دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش

Figure 2. A view of the flume erosion and rain simulator used in the research

برای اعمال باران‌های با شدت متفاوت، یک دستگاه شبیه‌ساز باران با صفحه بارشی به طول ۴/۵ متر و به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد (شکل ۲). صفحه بارش دستگاه شامل ۲۰ قطعه نازل آبپاش بود که قادر به تولید باران‌های با شدت متفاوت در دامنه کم‌تر از ۱۰ تا بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بود (شکل ۳). برای انتخاب شدت و مدت مناسب بارندگی، داده‌های ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه قلتوق در منطقه غرب زنجان طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۰ بررسی شد. بر این اساس شدت بارندگی در منطقه تا ۱۴۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند. با این وجود باران‌های با شدت کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بیش از ۹۷ درصد باران‌های منطقه را شامل می‌شوند [۴]. از آنجا که باران‌های با شدت کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر بر ساعت فرسایش‌زا نبودند [۴] از باران‌های با شدت بالاتر برای بررسی اثر شدت باران بر تنش

(اغلب از نیمه پاییز تا نیمه بهار) عامل مهم محدودکننده رشد گیاهان در منطقه است. از این رو تنها گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی از جمله گون به طور پراکنده در آن‌ها قابل مشاهده است. به طور کلی این عرصه‌ها فاقد پوشش گیاهی مناسب (کمتر از ۱۰ درصد) و دائمی می‌باشند و استقرار پوشش گیاهی در آن‌ها با دشواری‌هایی روبه‌رو است [۳۹]. فرآیند فرسایش در سازندهای مارنی بسیار فعال است و مشاهدات نشان می‌دهد که فرسایش شیاری در کنار سایر اشکال فرسایش (سطحی و خندقی) از عمده‌ترین اشکال فرسایش آبی در این سازندها است.



شکل ۱- منطقه تحت مطالعه و نمونه‌برداری خاک

Figure 1. Location of the study area and soil sampling site

#### تعیین ویژگی‌های خاک

نمونه‌برداری خاک از دامنه‌ای تحت فرسایش شیاری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر از سه نقطه (بالادست، بخش میانی و پایین‌دست) در طول دامنه برداشت و با هم مخلوط و در نهایت یک نمونه مرکب تهیه شد. در مجموع حدود ۸ تن خاک برداشت و پس از هواخشک شدن و عبور از الک ۶ میلی‌متر در آزمایشگاه مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفتند. برای این منظور توزیع نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری [۱۵]، چگالی ظاهری خاک (BD) با استفاده از سیلندر فلزی به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر در صحرا [۵]، درصد سنگریزه (قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر) به روش وزنی، پایداری خاکدانه در خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) در آب به روش الک تر [۲] برای مدت یک دقیقه [۳۹]، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت [۳۲]، واکنش خاک (pH) در گل اشباع به وسیله pH سنج، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع به وسیله EC سنج، ماده آلی به روش واکلی و بلاک [۴۲]، درصد سدیم تبادلی (ESP) به روش استات آمونیوم [۲۲]، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خشتی‌سازی با استفاده از اسیدکلریدریک یک نرمال [۳۲] و مقدار گچ (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) در خاک به روش استون [۳۲] تعیین شدند.

مقدار تنش برشی جریان (t) بر حسب  $N.m^{-2}$  بر اساس رابطه زیر محاسبه شد [۱۱]:

$$\tau = \gamma_{sh} = \gamma_s \frac{Q}{wv} \quad (3)$$

که در آن: g وزن مخصوص سیال ( $N.m^{-3}$ )، s شیب مسیر جریان است که برابر با  $\sin(\alpha)$  و  $\alpha$  نیز بر حسب درجه می‌باشد، h عمق جریان (m)، u میانگین سرعت ( $m.s^{-1}$ )، w عرض جریان (m) و Q دبی جریان ( $m^3.s^{-1}$ ) می‌باشد. مقدار Q بر مبنای حجم جریان تولید شده در شیار به زمان وقوع جریان به دست آمد [۴۰] و سرعت جریان (u) به روش ماده رنگی (پرمنگنات پتاسیم) اندازه‌گیری شد [۱۶]. مقدار تنش برشی بحرانی ( $t_c$ ) ( $N.m^{-2}$ ) بر اساس عرض از مبدأ رابطه بین  $D_c$  و t قابل محاسبه می‌باشد. تنش برشی بحرانی ( $t_c$ ) کم‌ترین مقدار تنشی است که باعث شروع رواناب و رسوب در خاک می‌شود که مقدار آن برابر با  $10^{-4}$  نیوتن بر متر مربع بود. مقدار  $t_c$  با استفاده از رابطه بین تنش برشی (t) و ظرفیت جداسازی رسوب برای آب زلال ( $D_c$ ) محاسبه گردید.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها بر مبنای تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد [۲۴]. مقایسه میانگین بین شدت‌های باران از نظر تنش برشی و فرسایش‌پذیری شیار جریان به روش آزمون دانکن تعیین شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ بهره گرفته شد. رابطه تنش برشی جریان و فرسایش‌پذیری شیار با شدت باران بر اساس توابع مختلف ریاضی به دست آمد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

### نتایج

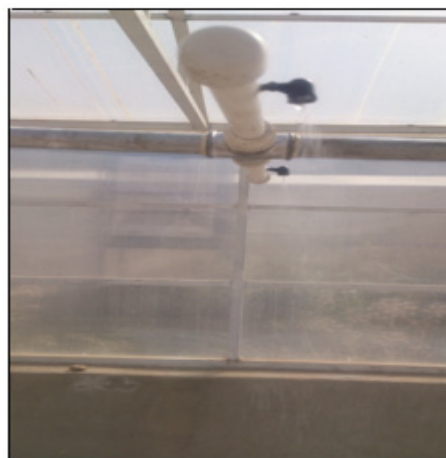
#### ویژگی‌های خاک مارنی

نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به توزیع اندازه ذرات خاک (شن، سیلت و رس) خاک مورد بررسی دارای بافت رسی بود. وجود رس، آهک و گچ بالا و در عین حال ماده آلی بسیار پایین مشخصه اصلی خاک مارنی بود که به نوبه خود در کاهش تشکیل خاکدانه‌های پایدار مؤثر می‌باشد. از سوی دیگر نفوذپذیری پایین خاک عاملی دیگر برای افزایش حساسیت خاک به فرآیندهای فرسایش آبی می‌باشد.

شاخص‌های جریان و فرسایش‌پذیری شیار تحت تأثیر شدت باران

نتایج تجزیه واریانس تغییرات سرعت جریان، دبی جریان، غلظت رسوب، تنش برشی جریان (t) و فرسایش‌پذیری شیار ( $K_p$ ) در شدت‌های مختلف باران نشان داد که شدت باران اثری قابل توجه بر سرعت جریان ( $P < 0.000$ )، دبی جریان ( $P < 0.000$ )، غلظت رواناب

برشی جریان و فرسایش‌پذیری شیار استفاده شد. بر این اساس آزمایش در ۱۰ شدت باران (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) با مدت ثابت یک ساعت با سه تکرار انجام گرفت. بدین ترتیب در مجموع، این پژوهش در ۳۰ واحد آزمایشی (۱۰ شدت باران و در ۳ تکرار شیار) انجام گرفت.



شکل ۳- نمایی از نازل مورد استفاده در شبیه‌ساز باران

Figure 3. A view of the nozzle used in the rainfall simulator

قطر قطرات باران به روش گلوله آردی تعیین شد [۶] بر این اساس متوسط قطر قطرات باران  $1/85$  میلی‌متر بود. آب مورد نیاز دستگاه، از منبع آب شهری که دارای  $pH = 7/23$  و  $dS.m^{-1} = 0/385$   $EC =$  بود، از طریق لوله‌های پلاستیکی به صفحه بارش منتقل شد. نمونه‌های خاک تحت تأثیر باران‌های شبیه‌سازی شده قرار گرفتند.

تعیین فرسایش‌پذیری شیار

فرسایش‌پذیری شیار تحت باران‌های شبیه‌سازی شده در فلوم مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی شدت‌های باران شبیه‌سازی شده، در فاصله زمانی پنج دقیقه، به مدت یک ساعت رواناب و رسوب حاصل از هر شیار در ظروفی معین جمع‌آوری شد [۴۰]. زمان آغاز رواناب با افزایش شدت باران کاهش یافت. با محاسبه مقدار رسوب بر حسب گرم در حجم مشخصی از نمونه همگن، مقدار رسوب نمونه و نهایتاً مقدار کل رسوب جمع شده در ظرف پایین هر شیار برای هر شدت باران مورد بررسی به دست آمد [۲۵]. مقدار رسوب هر نمونه به کل مخلوط رواناب و رسوب تولید شده در هر شدت تعمیم داده شد. از تقسیم مقدار رسوب بر حجم مخلوط، غلظت رواناب ( $\gamma$ ) بر حسب نیوتن بر متر مکعب به دست آمد. برای تعیین فرسایش‌پذیری شیار ( $K_p$ ) از رابطه زیر استفاده شد [۱۱]:

$$D_c = K_p (\tau - \tau_c) \quad (2)$$

که در آن:  $D_c$  ظرفیت فرسایش شیار برای آب زلال ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )،  $K_p$  فرسایش‌پذیری شیار ( $kg.N^{-1}.s^{-1}$ )،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی ( $N.m^{-2}$ ) و  $\tau$  تنش برشی جریان آب ( $N.m^{-2}$ ) می‌باشد. مقدار  $D_c$  برابر با مقدار رسوب خروجی از هر شیار طی هر شدت باران در واحد سطح شیار ( $m^{-2}$ ) و در واحد زمان (s) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مارنی

Table 1. Physicochemical properties of the marl soil

میانگین Mean	ویژگی شیمیایی Chemical property	میانگین Mean	ویژگی فیزیکی Physical property
7.45	pH	0.017	شن (%)
6.35	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	40.01	سیلت (%)
12.22	ESP	59.82	رس (%)
0.63	OM (%)	18.01	رس قابل انتشار (%)
26.14	CaCO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O (%)	1.76	سنگریزه (%)
12.30	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O (%)	1.04	جرم مخصوص ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )
		0.19	میانگین وزنی قطر خاکدانه در روش الک تر (mm)
		1.81	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h <sup>-1</sup> )
			هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h <sup>-1</sup> )

جدول ۲- تحلیل واریانس یک‌طرفه تأثیر شدت باران بر شاخص‌های جریان و فرسایش پذیری شیاری در شدت‌های باران

Table 2. Analysis of variance using the One-Way ANOVA for comparing flow characteristics and rill erodibility among the rainfall intensities

معنی‌داری Significance	F	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Variation resource
0.000	118.93	0.79	0.08	9	سرعت جریان Flow velocity
0.000	333.26	1.4×10 <sup>-6</sup>	2.1×10 <sup>-9</sup>	9	دبی جریان Flow discharge
0.000	144.83	29311621.56	325735.72	9	غلظت جریان Flow concentration
0.000	263.10	0.002	10 <sup>-4</sup> ×4.1	9	تنش برشی Shear stress
0.000	103.75	0.053	0.006	9	فرسایش‌پذیری شیاری Rill erodibility

پژوهش خود نشان دادند که با افزایش شدت باران و ضربه قطرات باران میزان هدررفت خاک حاصل از فرسایش بارانی افزایش می‌یابد. بررسی تغییرات سرعت جریان در هر یک از شدت‌های باران نشان داد که با افزایش شدت باران، سرعت جریان به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت (شکل ۵-الف). علت این موضوع کاهش شدید نفوذپذیری خاک در شدت‌های بالای باران بود [۴۱]، به طوری که در کنار افزایش رطوبت خاک، تخریب ساختمان خاک و تشکیل اندوده، عاملی مهم در تسریع تولید جریان در باران‌های شدید بود. بررسی تغییرات دبی جریان در شدت‌های مختلف باران نشان داد که با افزایش شدت باران، دبی جریان افزایش یافت (شکل ۵-

۰/۰۰۰)، تنش برشی جریان ( $P < ۰/۰۰۰$ ) و فرسایش‌پذیری شیاری ( $P < ۰/۰۰۰$ ) داشت (جدول ۲). این نتیجه به این دلیل می‌تواند باشد که از یکسو افزایش شدت باران، افزایش تأمین آب در سطح خاک و در نتیجه تولید رواناب بیش‌تر را به دنبال دارد و از سوی دیگر با افزایش شدت باران و در نتیجه افزایش تعداد ضربات قطرات باران، فروپاشی خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع سبب کاهش تخلخل درشت خاک و محدود شدن نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش‌پذیری شیاری می‌شوند. مطابق با این نتیجه، کینل [۲۱] به این نتیجه رسید که بین هدررفت خاک و ضربه قطرات باران رابطه‌ی نمایی وجود دارد. کیانی هرچگانی و همکاران [۲۰] در

داشت (شکل ۵-د). این موضوع به این دلیل بود که با افزایش شدت باران (از ۳۰ تا ۶۰ میلی متر بر ساعت) به دلیل تأمین آب بیش تر و وجود زبری خاک به دلیل ممانعت از حرکت آب، تنش بیشتری بر خاک اعمال شد و رسوب بیشتری نیز منتقل شد. در شدت باران های بیش تر از ۶۰ میلی متر بر ساعت، سرعت حرکت جریان به دلیل کاهش اصطکاک در مرز بین خاک و جریان آب بسیار افزایش پیدا می کند و در مقابل میزان افزایش دبی کم تر از میزان افزایش سرعت جریان در شیار بود و از طرف دیگر غلظت جریان نیز از شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت به بالا به دلیل تراکم و چسبندگی ذرات رس در شدت های بالا کاهش یافت و در نتیجه تنش برشی کاهش یافت [۹].

بررسی تغییرات فرسایش پذیری شیار در هر یک از شدت های باران نشان داد که با افزایش شدت باران فرسایش پذیری شیار ( $K_p$ ) افزایش یافت (شکل ۵-ه). در باران های با شدت ۱۰ و ۲۰ میلی متر بر ساعت هدررفت خاک در شیارها اتفاق نیفتاد. شدت باران ۳۰ میلی متر بر ساعت به عنوان آستانه وقوع فرسایش شیار در جویچه ها بود. افزایش مقدار  $K_p$  را می توان در کنار افزایش تأمین آب بیش تر در سطح خاک، به افزایش انرژی کل باران مرتبط دانست. انرژی کل باران در باران های شدید به دلیل افزایش تعداد ضربات قطرات باران و قطر قطرات باران افزایش می یابد [۲۹]. در پژوهشی توسط فرناندز و همکاران [۱۲] رابطه بین انرژی جنبشی قطرات باران و فرسایش شیار در شمال پرتغال بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش انرژی جنبشی قطرات باران و افزایش

این موضوع به دلیل افزایش حجم آب باران دریافتی خاک و همچنین کاهش بیش تر نفوذپذیری خاک در اثر تخریب ساختمان خاک سطحی در شدت های بالای باران بود. مقدار دبی جریان از شدت ۷۰ میلی متر بر ساعت به بالا تقریباً ثابت شد که علت این موضوع را می توان به دلیل به اوج رسیدن تخریب ساختمان خاک و تثبیت نفوذپذیری خاک و همچنین تغییر شکل مقطع شیار دانست (شکل ۴-ب).

بررسی تغییرات غلظت جریان در هر یک از شدت های باران نشان داد که با افزایش شدت باران، غلظت جریان تا شدت باران ۶۰ میلی متر بر ساعت افزایش یافت (شکل ۵-ج) و پس از آن غلظت رسوب به دلیل افزایش قابل توجه رواناب (شکل ۵-ب)، کاهش پیدا کرد و همین امر باعث کاهش غلظت جریان شد. در پژوهشی ویلیامز و همکاران [۴۳] در خاک های منطقه تگزاس آمریکا گزارش نمودند که طی رخدادهای باران با افزایش مقدار رواناب تولید رسوب نیز افزایش یافت ( $R^2 = 0.96$ ). کاهش غلظت جریان در باران های با شدت بالاتر (بیش تر از ۶۰ میلی متر بر ساعت)، از عواملی بود که موجب افزایش فزاینده سرعت جریان در شیارها گردید.

بررسی داده های ظرفیت جدا شدن ذرات ( $D_c$ ) و تنش برشی جریان ( $\tau$ ) نشان داد که مقدار تنش برشی بحرانی جریان ( $\tau_c$ ) در خاک مارنی  $10^{-4}$  نیوتن بر مربع بود. بررسی تغییرات تنش برشی جریان ( $t$ ) در شدت های باران نشان داد که تنش برشی جریان تا شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت افزایش یافت و سپس روند کاهشی



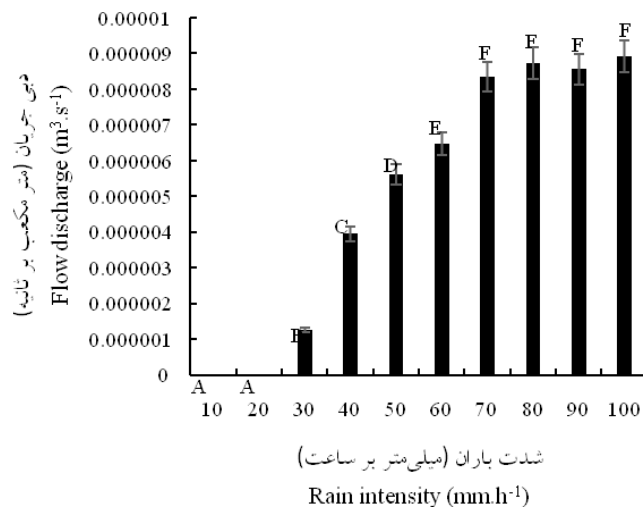
(ب)



(الف)

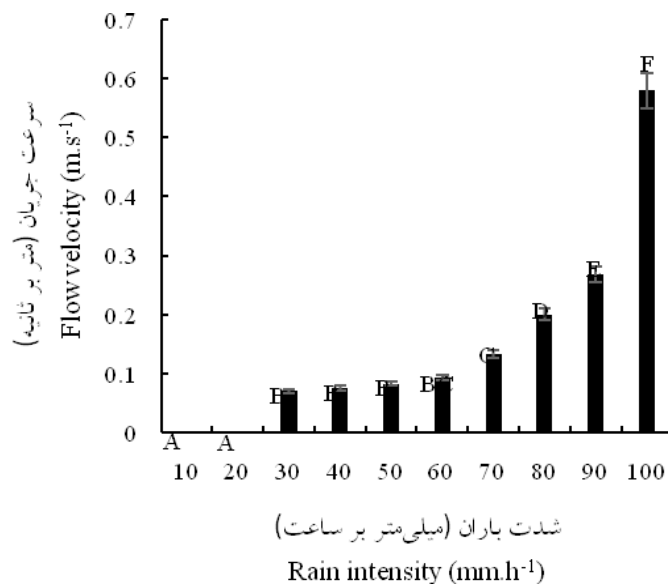
شکل ۴- نمایی از شکل شیار پیش از بارندگی (الف) و تغییر شکل شیارها در اثر انتقال رسوب در اثر بارندگی (ب)

Figure 4. A view of the rills before exposing the rainfall (a) and the change of rills shape through sediment transportation under rainfall (b)



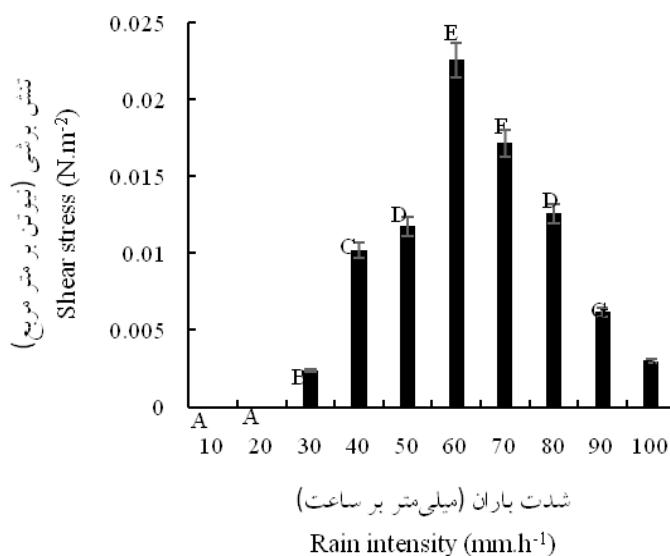
شدهت باران (میلی متر بر ساعت)  
Rain intensity (mm.h<sup>-1</sup>)

(ب)



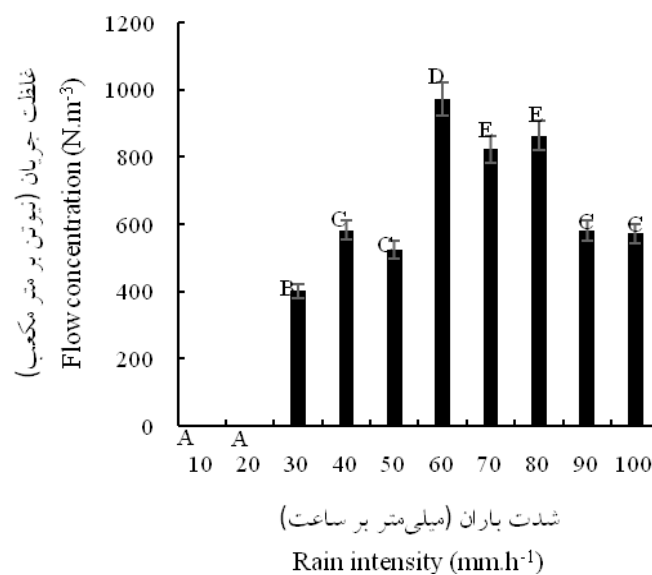
شدهت باران (میلی متر بر ساعت)  
Rain intensity (mm.h<sup>-1</sup>)

(ف)



شدهت باران (میلی متر بر ساعت)  
Rain intensity (mm.h<sup>-1</sup>)

(د)



شدهت باران (میلی متر بر ساعت)  
Rain intensity (mm.h<sup>-1</sup>)

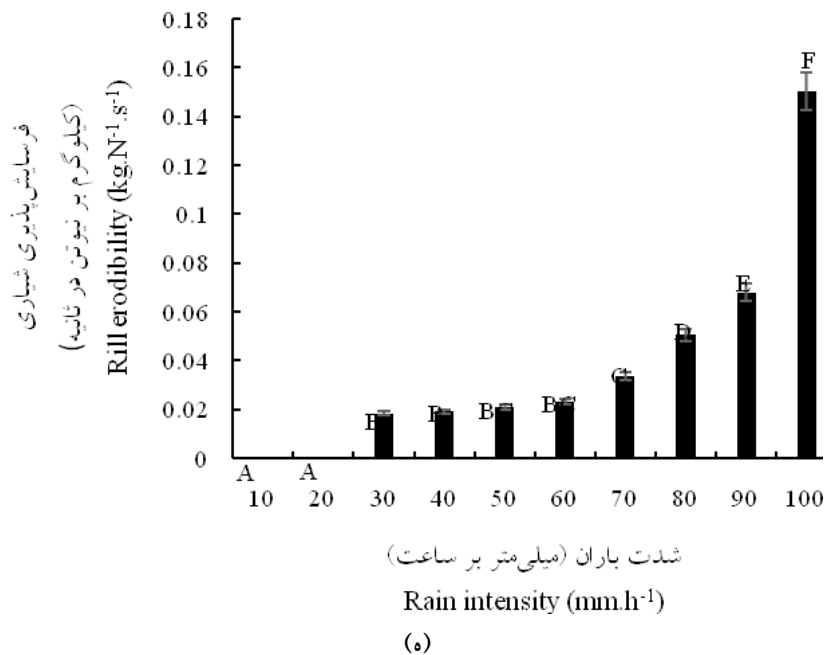
(ج)

شکل ۵- مقایسه میانگین سرعت جریان (الف)، دبی جریان (ب)، غلظت جریان (ج)، تنش برشی جریان (د) و فرسایش پذیری شیاری (ه) در شدت های باران در خاک مارنی

Figure 5. Mean comparing of flow velocity (a), flow discharge (b), flow concentration (c), flow shear stress (d) and rill erodibility (e) among the rainfall intensities in the marl soil

به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می کند.

متوسط قطرات باران، فرسایش شیاری به صورت خطی افزایش یافت. هم چنین یافته های دانشجویی و کیناراسری [۱۰] نشان داد که با افزایش شدت بارش از ۵۵ به ۱۱۴ میلی متر بر ساعت میزان رواناب

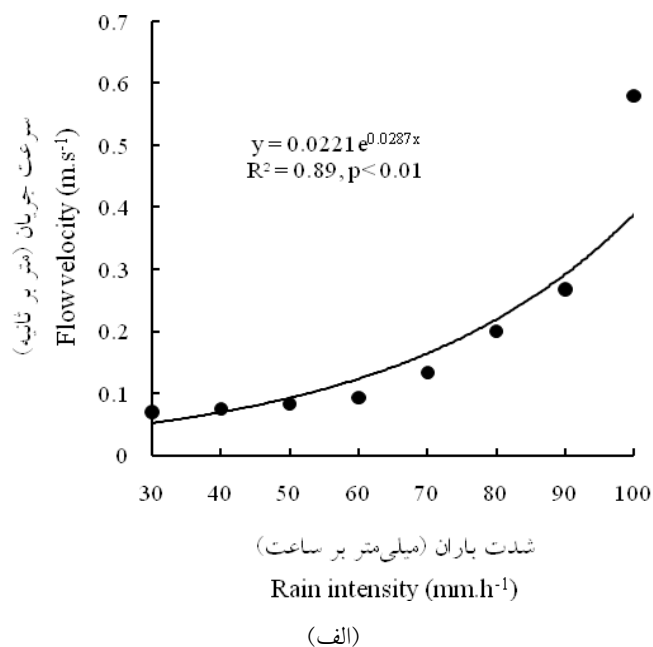
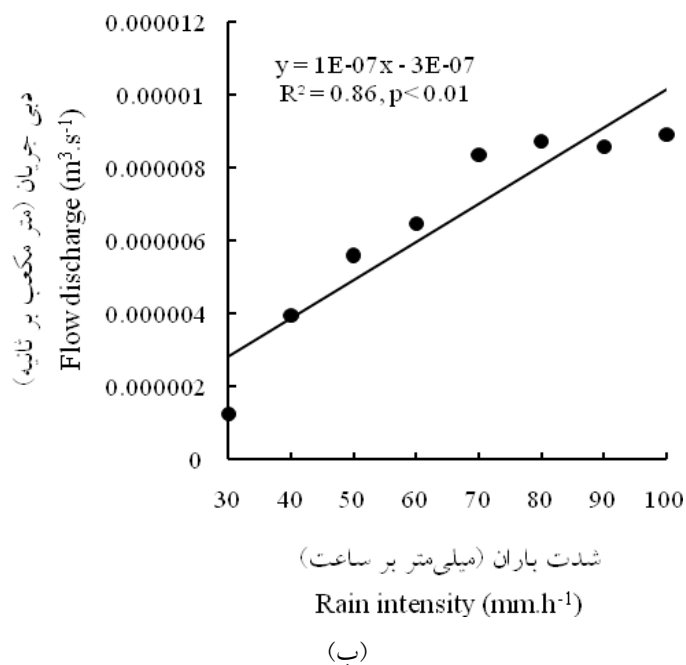


ادامه شکل ۵-

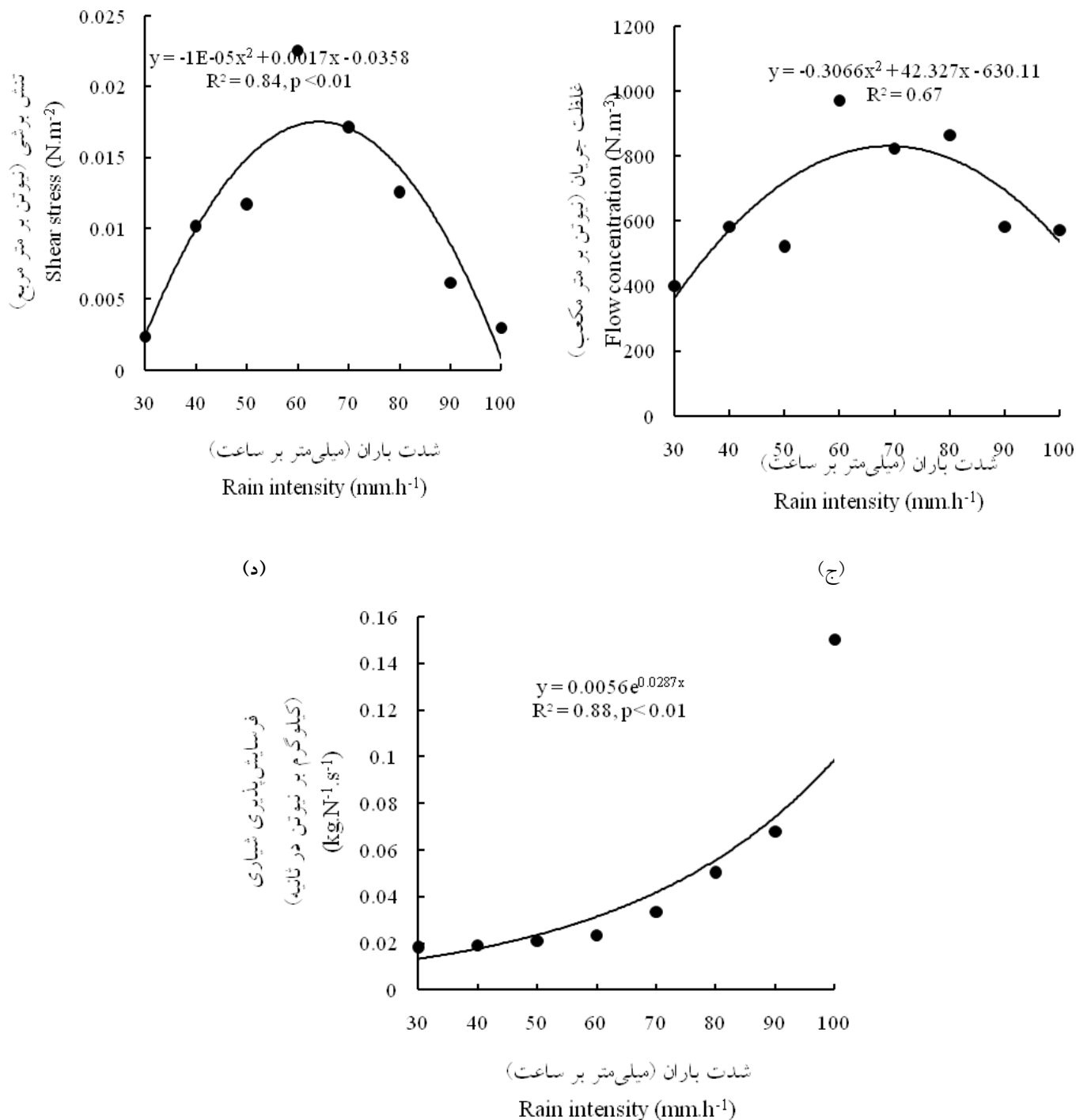
Figure 5. Continued

رابطه شاخص‌های جریان و فرسایش‌پذیری شیاری با شدت باران از آنجا که باران‌های با شدت کم‌تر از ۳۰ میلی‌متر بر ساعت فرسایش‌زا نبودند، از داده‌های باران با شدت ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت برای تعیین رابطه بین شدت باران و متغیرهای مورد بررسی استفاده شد. نتایج نشان داد که بین سرعت جریان آب در شیار و شدت باران رابطه‌ای معنی‌دار وجود دارد ( $R^2 = 0.92$  و  $P < 0.01$ ) (شکل ۶-الف) و با افزایش شدت باران مقدار سرعت جریان افزایش می‌یابد. هم‌چنین رابطه بین شدت باران و دبی جریان معنی‌دار بود ( $R^2 = 0.98$  و  $P < 0.01$ ) (شکل ۶-ب) به طوری که با افزایش شدت باران مقدار دبی جریان افزایش می‌یابد. رابطه معنی‌داری بین غلظت جریان و شدت باران مشاهده نگردید (شکل ۶-ج). هم‌چنین رابطه معنی‌دار بین تنش برشی و شدت باران برقرار بود ( $P < 0.01$  و  $0.84$ ) (شکل ۶-د). بررسی رابطه بین فرسایش‌پذیری شیاری و شدت باران نیز نشان داد که فرسایش‌پذیری شیاری مانند سرعت جریان دارای رابطه مثبت قوی با شدت باران بود ( $P < 0.01$  و  $0.92$ ) (شکل ۶-ه).

رابطه شاخص‌های جریان و فرسایش‌پذیری شیاری با شدت باران از آنجا که باران‌های با شدت کم‌تر از ۳۰ میلی‌متر بر ساعت فرسایش‌زا نبودند، از داده‌های باران با شدت ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت برای تعیین رابطه بین شدت باران و متغیرهای مورد بررسی استفاده شد. نتایج نشان داد که بین سرعت جریان آب در شیار و شدت باران رابطه‌ای معنی‌دار وجود دارد ( $R^2 = 0.92$  و  $P < 0.01$ ) (شکل ۶-الف) و با افزایش شدت باران مقدار سرعت جریان افزایش می‌یابد. هم‌چنین رابطه بین شدت باران و دبی جریان معنی‌دار بود







شکل ۶- رابطه بین شدت باران و سرعت جریان (الف)، دبی جریان (ب)، غلظت جریان (ج)، تنش برشی جریان (د) و فرسایش پذیری شیاری (ه) در خاک مارنی

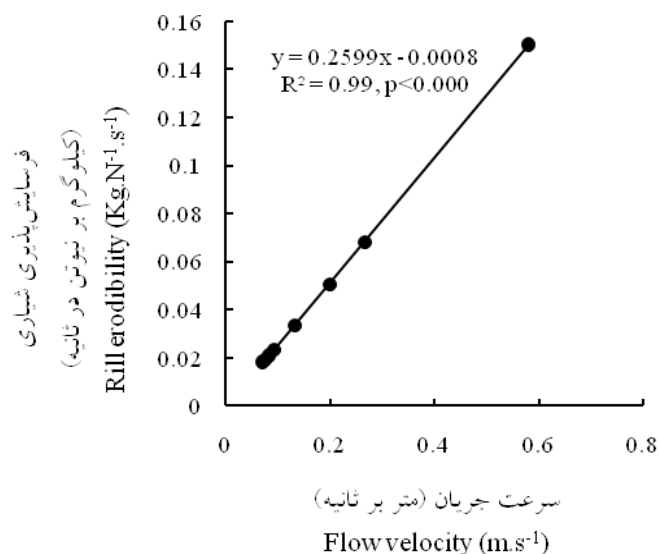
Figure 6. The relationship between rainfall intensity and flow velocity (a), flow discharge (b), flow concentration (c), flow shear stress (d) and rill erodibility (e) in the marl soil

۷. چنین به نظر می‌رسد که سرعت جریان در شیار، مشخصه مهم هیدرولیکی برای توصیف فرسایش پذیری شیاری تحت بارندگی باشد [۲۳].

به طور کلی مقایسه روند تغییرات فرسایش پذیری شیاری با شاخص‌های جریان نشان داد که تغییرات فرسایش پذیری شیاری با افزایش شدت بارندگی، بسیار شبیه به الگوی تغییرات سرعت جریان بود (شکل ۵ الف و ه). رابطه خطی قوی بین فرسایش پذیری شیاری و سرعت جریان ( $R^2 = 0.99$  و  $P < 0.000$ ) مشاهده گردید (شکل

منابع

1. Abdinezhad, P. Feiznia, S. and Peirovan, H. 2013. Compare marl soil erodibility in Zanjan province using simulators rain. Journal of Soil Research. 28(2): 408-419. (In Persian).
2. Angers, D.A. and Mehuys, R. 1993. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (Ed.), Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton. pp: 651-657.
3. Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey Paper. 422, Washington.
4. Besharat, F. and Vaezi, A.R. 2015. Soil loss under simulated rainfalls rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. Iranian Watershed Management Science and Engineering. 9(29): 9-18. (In Persian).
5. Blake, G.R. and Hartge, K. 1986. Bulk density, In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd ed. Agronomy Monograph, 9. American Society of Agronomy, Madison. WI. 363-375.
6. Carter- Cade, E.D. Greer, J. Braud, D. and Floy, M. 1974. Raindrop characteristics in southcentral United States. Trans ASAE. 17: 1033-1037.
7. Chanson, H. 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow. An Introduction. John Wiley and Sons Inc, New York, USA. 495 p.
8. Dahnke, W. and Whitney D. 1988. Measurement of soil salinity. Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull. pp, 32-34. Elliot. W. J., A. M. 22.
9. Darboux, F. Davy, P. Gascuel-Oudou, C. and Huang, C. 2001. Evolution of Soil Surface Roughness and Flowpath Connectivity in Overland Flow Experiments. Catena. 46:125-139.
10. Donjatee, S. and Chinnarasri, C. 2012. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation. International Journal of Sediment Research. 27(2): 168-177.
11. Elliot, W.J. Liebenow, A.J. Laflen, J.M. and Kohl, K.D. 1989. A compendium of soil erodibility data from WEEP cropland soil field erodibility experiments 1987



شکل ۷- رابطه بین سرعت جریان و فرسایش پذیری شیاری  
Figure 7. The relationship between flow velocity and rill erodibility

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که شدت باران عاملی مهم در تغییرات شاخص های جریان از جمله سرعت، دبی و تنش برشی جریان در خاک مارنی می باشد. شدت باران ۳۰ میلی متر بر ساعت به عنوان آستانه وقوع فرسایش شیاری بود. با افزایش شدت بارندگی (از ۳۰ تا ۱۰۰ میلی متر بر ساعت) مقدار فرسایش پذیری شیاری به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافت. رابطه ای معنی دار بین فرسایش پذیری شیاری و شدت باران به دست آمد ( $R^2 = 0.99$  و  $P < 0.001$ ). افزایش تعداد ضربه قطرات باران و اندازه قطرات همگام با افزایش شدت باران، علت مهم افزایش فرسایش پذیری شیاری بود که موجب گردید ساختمان خاک به شدت دچار تخریب شده و نفوذپذیری خاک محدود گردد. هم چنین با افزایش شدت بارندگی، مقدار تنش برشی جریان تا شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت بیش تر شد و سپس کاهش یافت. افزایش شدت باران تا ۶۰ میلی متر بر ساعت به دلیل تأمین آب بیش تر در سطح خاک و در نتیجه تولید بیش تر جریان متمرکز در شیاری باعث افزایش تنش برشی جریان می شود. از شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت به بالا به دلیل این که سرعت جریان آب بسیار افزایش پیدا کرد و در مقابل میزان افزایش دبی جریان کم تر از میزان افزایش سرعت جریان بود و هم چنین به دلیل آن که غلظت جریان نیز کاهش پیدا کرد، تنش برشی جریان کاهش پیدا کرد. به طور کلی این مطالعه نشان می دهد که شدت باران عاملی مهم در تغییرات سرعت جریان آب در شیاریها است و سرعت جریان آب به عنوان شاخص مهم جریان برای توصیف تغییرات فرسایش پذیری شیاری تحت بارندگی می باشد. این مشخصه جریان می تواند به عنوان یکی از اجزای مهم برای کمی سازی فرسایش شیاری مورد توجه قرار گرفته و در ارائه مدل های بهتر برای پیش بینی فرسایش شیاری مورد استفاده قرار گیرد.

Water Research. 46(4):631-640. (In Persian).

21. Kinnel, P.I.A. 2003. Event erosivity factor and errors in erosion predictions by some empirical models. Australian Journal of Soil Research. 211:991-1003.

22. Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

23. Knapen, A. Poesen, J. Govers, G. Gyssels, G. and Nachtergaele, J. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth-Science Reviews. 80(1), pp.75-109.

24. Kravchenko, A. and Bullock, G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. Agronomy Journal. (91): 393-400.

25. Lal, R. 1998. Soil Quality and food security: The global Perspective. In: Lal, R (ed). Soil quality and soil erosion.

26. Lei, T.W. Zhang, Q.W. Yan, L.J. Zhao, J. and Pan, Y.H. 2008. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. Gendarme. 244 (4): 628-633.

27. Li, M. Zhan-bin, L. Dingd, W.L and Yaoa, W. 2006. Using rare earth element tracers and neutron activation analysis to study rill erosion process. Appl. Rad. Isot. 64: 402-408.

28. Lijuan, Y.L. Tingwu, Z. Jing, Z. Qingwen, J. 2015. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on a curved slope. Catena. 3: 28-41.

29. Mamedov, A.I. Levy, J. Shainberg, G. and Letey, J. 2001. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. Soil Research. 3: 1293-1305.

30. Neave, M. and Rayburg, S. 2007. A field investigation in to the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. Geomorphology. 87(4): 378-390.

31. Opsomer, J.D. Botts, C. and Kim, J.Y. 2003. Small area estimation in a watershed erosion assessment survey. Journal of agricultural, biological, and environmental statistics. 8(2), pp.139-152.

and 88. NSERL Report, Vol. 3. Agriculture Research Service, U.S. Department of Agriculture, National Soil Erosion Research Lab., West Lafayette. Indiana. 316p.

12. Fernández-Raga, M.R. Fraile, J. Keizer, M. Teijeiro, V.A. Castro, C. Palencia, C. and Marques, C. 2010. The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: an application to splash erosion. Atmospheric Research. 96(2): 225-240.

13. Foster, G.R. Flanagan, M.A. Nearing, L.J. Lane, L.M. Risse, M. and Finkner, C. 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.

14. Foster, G.R. Meyer, L.D. and Onstad, C.A. 1977. An erosion equation derived from basic principles. Transactions of the ASAE. 20(4): 678-682.

15. Gee, G.W. and Bauder, W. 1986. Particle size analysis. In: Methods of soil analysis. Part1. 2nd ed. Klute, A. (Ed). Agron. Monoger. 9. American Society Agronomy. Madison. WI. pp: 383-411.

16. Gilley, J.E. Elliot, W.J. Laflen, J.M. and Simanton, J.R. 1993. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. Journal of Hydrology. 142: 251-271.

17. Gimenez, 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.

18. Govers, G. Gimenez, R. Oost, W.K. 2007. Rill erosion: Wxploring the relationship between experiments modelling and field observation. Earth-Science Reviews. 84: 87-102.

19. Haiou, S. Fenly, Z. Leilei, W. Yong, H. and Wei, H. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. Soil and Tillage Research. 155: 429-436.

20. Kianiharhegani, M. Sadeghi, H.R. and Asadi, H. 2015. Comparative analysis of the intensity of the rain and the slope of the experimental plan on components erosion caused by rain drops (RIIE). Iran Soil and

39. Vaezi, A.R. and Gharehdaghlil, H. 2013. Quantification of rill erosion development in Marl soils of Zanjanroud watershed in North West of Zanjan, Iran. *Journal of Water and Soil*. 27(5):872-881. (In Persian).
40. Vaezi, A.R. and Vatani. A. 2014. Determination of rill erodibility in some Zanjan soils under rain simulated. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 71: 59-67. (In Persian).
41. Valettea, S. Prevosta Laurent, L. and Lucasa, J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Gilles Computers and Graphics*. 30: 494-506.
42. Walkley, A. and Black, A. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*. 63: 251-264.
43. Williams, B.M. Martinez-Menaa, S. and Deeksb, L. 2004. Exponential distribution theory and aggregate erosion. *Soil Science Society of America Journal*. 6: 382-391.
44. Yan, L.J. Yu, X.X. Lei, T.W. Zhang, Q.W. and Qu, L.Q. 2008. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: A model study using the finite element method. *Geoderma*. 146: 114-120.
32. Page A.L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA.
33. Pan, Z. Hongwu, T. Wenyi, Y. Nan, Z. and Xizhil, V. 2015. Experimental investigation of morphology characteristics of rill evolution on loess slope. *Catena*. 137: 536-544.
34. Romero, C.C. Stroosnijder, L. and Guillermo, A. B. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*. 70: 105-113.
35. Ruiz-Sinoga, J.D. and Romero Diaz, A. 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology*. 118: 359-368.
36. Saint-Jean, S. Chelle, M. and Huber, L. 2004. Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 183-196.
37. Tailong, G. Quanjiu, W.D. and Li, J.Z. 2010. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid region of northwestern China. *Soils Sediment*. 10: 1200-1208.
38. Tan, K.H. 2005. Soil sampling, preparation, and analysis. CRC press.

*Abstract*

## Flow Characteristics and Rill Erodibility in Relation to the Rainfall Intensity in a Marl Soil

M. Foroumadi<sup>1</sup> and A.R. Vaezi<sup>2</sup>

Received:2016/05/17 Accepted : 2016/10/18

Rill erosion which occurs as a result of runoff concentration on a hillslope is one of the major soil erosion types in arid and semi-arid regions, especially where plant cover is poor. For this reason, understanding the factors affecting them is a high priority. Rill erodibility indicates the ease of soil particles detachment and transport by water shear force in a rill. The study was conducted to investigate the effect of rainfall intensity on the flow characteristics and rill erodibility ( $K_r$ ) in a marl soil. A laboratory experiment was carried out in ten rainfall intensities from 10 to 100 mm.h<sup>-1</sup> at three replications. Soil samples were taken from a semi-arid region in west of Zanjan and placed into a flume with 0.4 m × 9 m in dimensions. Rill erodibility ( $K_r$ ) was determined using the WEPP model at three artificial rills. The results showed that flow characteristics (velocity, discharge and shear stress) and rill erodibility were affected significantly by rainfall intensity ( $P < 0.000$ ). Threshold rainfall intensity was recognized to be 30 mm.h<sup>-1</sup> for producing an erosive flow with  $2.37 \times 10^{-3}$  N.m<sup>-2</sup> in shear stress and 0.018 kg.N<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> in rill erodibility ( $R^2 = 0.92$ ,  $P < 0.01$ ). Rill erodibility increased strongly with increasing rainfall intensity. This result was associated with higher disruption of soil aggregates and higher production of concentrated flow in the rills. Shear stress and flow concentration contrary to other flow characteristics increased strongly for rainfalls from 30 mm.h<sup>-1</sup> to 60 mm.h<sup>-1</sup> intensity and then significantly decreased due to larger increase in flow velocity and greater decrease in flow concentration. Out of the flow characteristics, flow velocity was the most important factor to explain the variation pattern of rill erodibility under the rainfall intensities, so that there was significant relationship between the two variables ( $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.001$ ). This study indicated that the rainfall intensity is a major factor controlling the flow characteristics and rill erodibility of furrows in the marl soil.

**Keywords:** Concentrated flow, Flow velocity, Rainfall intensity threshold, Rill erosion

---

1. M.Sc. Student of Soil Science in Agriculture Faculty, University of Zanjan.

2. Associate Professor of Soil Science in Agriculture Faculty, University of Zanjan, Corresponding Author E-mail vaezi.alireza@gmail.com.