

تخریب فیزیکی و ظرفیت جدا شدن ذره از شیار تحت تأثیر شدت و ضربه قطرات باران در خاک مارنی

مجید فرومدی و علی رضا واعظی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۷/۱۹)

چکیده

فرسایش شیار به عنوان آغازین مرحله فرسایش درون آبراهه‌ای در دامنه‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی نقش شدت و ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره در خاک مارنی انجام گرفت. نمونه‌های خاک مارنی در شیارهایی در داخل فلومی به طول ۴ متر و عرض ۰/۹ متر تحت باران‌های شبیه‌سازی شده با شدت متغیر از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت قرار گرفتند. توزیع اندازه ذرات (PSD)، اندازه خاک‌دانه، تخلخل، ضخامت سله و ظرفیت جدا شدن ذره (D_c) تحت تأثیر شدت باران و ضربه قطرات باران مورد بررسی قرار گرفتند. براساس نتایج، PSD، اندازه خاک‌دانه، تخلخل و تشکیل سله به شدت تحت تأثیر شدت باران قرار گرفتند ($P < 0/000$). همچنین شدت باران عاملی مهم در ظرفیت جدا شدن ذره از خاک شیار بود. شدت باران ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به‌عنوان شدت باران آستانه برای انتقال ذرات از خاک شیار و ایجاد فرسایش شیار بود. افزایش شدت باران، از یک‌سو افزایش ضربه قطرات باران و تخریب ساختمان خاک و از سوی دیگر تولید بیشتر جریان متمرکز در شیارها را به دنبال داشت. ضربه قطرات باران مهم‌ترین ویژگی باران از نظر فرسایش شیار و ظرفیت جدا شدن ذره در خاک مارنی است.

واژه‌های کلیدی: جریان متمرکز، شدت باران آستانه، فرسایش شیار، فرسایش قطره باران

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان
*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

مقدمه

فرسایش پذیری شیباری (τ_f , s.m^{-1}) تنش برشی وارده از طرف جریان بر ذرات خاک (Pa) و τ_c تنش برشی آستانه (Pa) است. زمانی که تنش برشی جریان کمتر از تنش برشی آستانه خاک باشد، میزان جدا شدن ذرات برابر با صفر خواهد بود.

اولین پیامد برخورد قطرات باران بر سطح خاک، تخریب خاکدانه‌ها می‌باشد. پایداری خاکدانه که مقاومت ذرات را در برابر جدا شدن نشان می‌دهد، در میزان تخریب ساختمان خاک نقشی مهم دارد (۵). در اثر ضربه قطرات باران، خاکدانه‌ها متلاشی شده و در سطح خاک‌ها اندوده و در نهایت سله تشکیل می‌شود که به دلیل تخلخل کمتر نسبت به خاک زیرین، منجر به کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش تولید رواناب و انتقال رسوب از سطح زمین می‌شود (۳۲). ضربه قطرات باران در کنار رواناب ناشی از باران، عاملی مؤثر در تخریب ساختمان خاک دیواره شیارها و در نتیجه افزایش حساسیت ذرات خاک به انتقال توسط جریان متمرکز آب دارد. با این وجود، در اغلب پژوهش‌های انجام گرفته در مورد فرسایش شیباری و فرسایش پذیری شیباری صرفاً به نقش جریان متمرکز آب و تنش برشی جریان در جدا شدن ذرات از شیار پرداخته شده است. در این راستا زائو و همکاران با بررسی فرآیندهای فرسایش شیباری در فلومی با طول ۱۲ متر و عرض ۳ متر تحت ۵ درجه شیب مختلف (۵، ۱۰، ۱۴، ۱۹ و ۲۴) نشان دادند که با افزایش درجه شیب و شدت جریان بود (۴۷). واعظی و وطنی نشان دادند که فرسایش شیباری به شدت تحت تأثیر بافت خاک قرار دارد به طوری که خاک رسی، بیشترین فرسایش‌پذیری شیباری و خاک شنی، کمترین مقدار را داشت (۹). در مطالعه‌ای هایو و همکاران به بررسی اثرات شدت باران و درجه شیب بر فرآیند فرسایش شیباری در یک فلوم محتوی خاک لسی پرداختند (۳۰). نتایج نشان داد که شدت فرسایش شیباری به صورت قابل توجهی به مقدار فرسایش‌پذیری خاک بستگی دارد. در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران نشان دادند که پوشش گیاهان بوته‌ای مانند Caragana Korshinskii Kom میزان رواناب و رسوب را به ترتیب ۲۰ و ۶۵ درصد نسبت به خاک بدون

فرسایش شیباری عبارت از جداسازی ذرات و انتقال آنها توسط جریان متمرکز آب روی دامنه است که به شکل کانال فرسایش‌پذیر باریک و دراز نمایان می‌شود (۱۴). فرسایش شیباری در کنار فرسایش ورقه‌ای، بیشترین نقش را در فرسایش خاک در دامنه‌ها ایفاء می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که گسترش فرسایش شیباری به شدت بارندگی، سرعت جریان آب، خصوصیات هیدرولیکی جریان، درجه، طول شیب (۳۳) و ویژگی‌های خاک وابسته است. تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش شیباری را می‌توان با شاخصی به نام فرسایش‌پذیری شیباری بیان کرد. فرسایش‌پذیری شیباری بیانگر حساسیت خاک به ایجاد شیار است (۲۸). فرسایش‌پذیری شیباری در مدل‌های مختلف تابعی از تنش برشی جریان، تنش برشی آستانه و ظرفیت جدا شدن رسوب است (۲۷).

در مدل (Wate Erosion Prediction Project) WEPP فرسایش شیباری و بین‌شیاری از یکدیگر جدا شده و از طریق معادله پیوستگی رسوب در حالت پایدار، برآورد می‌گردند. شدت جدا شدن خالص ذرات از شیار در حالتی که تنش برشی جریان بیشتر از تنش برشی آستانه باشد و نیز بار رسوب کمتر از ظرفیت حمل آن توسط جریان باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۲۷):

$$D_f = \left(1 - \frac{q_s}{T_c}\right) \quad [1]$$

که در آن: D_f شدت فرسایش شیباری ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)، D_c ظرفیت جدا شدن ذرات توسط جریان شیباری ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)، q_s بار رسوب ($\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) و T_c ظرفیت حمل رسوب در شیار ($\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) است.

برای وقوع فرسایش شیباری باید تنش برشی جریان بیش از تنش برشی آستانه باشد. در چنین شرایطی، ظرفیت جدا شدن (D_c) به صورت زیر بیان می‌شود (۲۷):

$$D_c = K_f (\tau_f - \tau_c) \quad [2]$$

که در آن: D_c ظرفیت جدا شدن ذره ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)، K_f

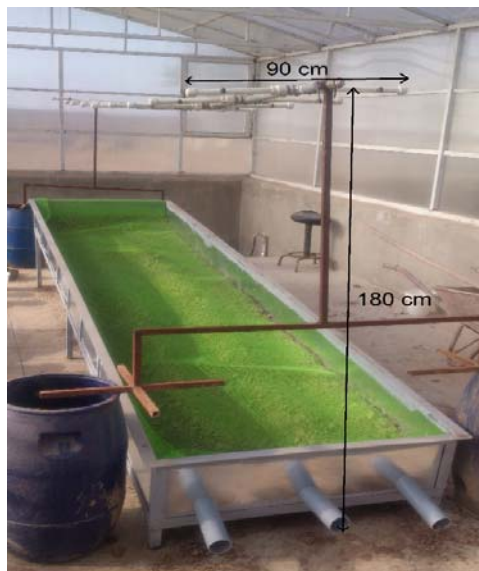
فرسایش آبی و تولید رسوب در عرصه‌های مارنی مطالعاتی توسط پژوهشگران مختلف در سراسر دنیا از جمله بنیتو و همکاران (۱۵) در اسپانیا، انگلند (۲۴) در جنوب داکوتای آمریکا، بوفالو و همکاران (۱۸)، استوس و همکاران (۲۳) در فرانسه سرونیچ و همکاران (۴۱) در اسپانیا، حسن‌زاده نفوتی و همکاران (۴) و واعظی و قره داغلی (۱۰) در ایران صورت گرفته است که نتایج نشانگر حساسیت بسیار شدید مارن‌ها به فرسایش آبی و بروز اشکال مختلف فرسایشی در آنها است. از این رو با توجه به ناپایداری ساختمان خاک مارنی و ضعف پوشش گیاهی، مطالعه عوامل مؤثر بر هدررفت خاک در آنها حائز اهمیت است. با توجه به حساسیت سازندهای مارنی به فرسایش شیار به‌ویژه در زمان‌های وقوع باران‌های شدید، این پژوهش به‌منظور بررسی جداسازی نقش شدت بارندگی و ضربه قطرات باران در تخریب فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره در فرسایش شیار در خاک مارنی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک از بخش غربی حوزه آبخیز زنجان‌رود در شمال غرب استان زنجان با ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه و ۵۶ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه و ۱۸ ثانیه عرض شمالی انجام شد. زنجان‌رود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان زنجان و یکی از زیرحوزه‌های هشت‌گانه سفیدرود است. این رودخانه دائمی که ۱۴۲ کیلومتر طول دارد و ارتفاع سرچشمه آن ۱۷۸۰ متر است، از آبخیزهای جنوب شرقی زنجان سرچشمه گرفته و پس از حرکت به سوی شمال غرب و عبور از عرصه‌های مارنی در آخر به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد. ارتفاع ریزشگاه این رودخانه ۱۱۰۰ متر و شیب متوسط آن ۰/۵ درصد است. میانگین بارندگی سالانه ۳۱۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بر روی رسوبات کوارتزی واقع شده است. سازندهای مارنی، گستره وسیعی از منطقه را در بر گرفته‌اند. مارن پلیوسن بیشترین وسعت را در دو سوی رودخانه زنجان‌رود را فراگرفته است. این واحد به‌صورت رخنمون‌هایی از

پوشش کاهش می‌دهد (۴۹). طی پژوهشی ویلدهابر و همکاران با استفاده از باران شبیه‌سازی شده با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت در کرت‌های با درصدهای مختلف پوشش گیاهی به این نتیجه رسیدند که با افزایش پوشش گیاهی پایداری ساختمان خاک افزایش یافته و تولید رسوب به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد (۴۶). اکبری و واعظی مطالعه‌ای به‌منظور بررسی تخریب خاک‌دانه‌ها تحت تأثیر ضربه قطرات باران و رابطه آن با پایداری خاک‌دانه انجام دادند (۲). نتایج نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین خاک‌های مختلف از نظر میزان تخریب خاک‌دانه‌ها در اثر باران وجود داشت. همچنین تخریب خاک‌دانه‌ها تحت تأثیر پایداری خاک‌دانه‌ها در روش الک‌تر قرار نگرفت با این وجود، تخریب خاک‌دانه‌ها همبستگی منفی معنی‌داری با پایداری خاک‌دانه‌ها در آزمون قطره داشت. ولتا و همکاران در پژوهش خود نشان دادند که با افزایش انرژی جنبشی قطرات باران، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش و به دنبال آن میزان تخریب آنها افزایش می‌یابد (۴۴).

با وجود آن که در تحقیقات پیشین عوامل مؤثر بر فرسایش شیار از جمله بارندگی، پوشش گیاهی، شیب و فرسایش‌پذیری شیار مورد بررسی قرار گرفته است، لیکن نقش ضربه قطرات باران در میزان جدا شدن شیار و فرسایش‌پذیری شیار مورد بررسی قرار نگرفته است. اگر چه نقش باران به‌ویژه شدت بارندگی در تخریب فیزیکی خاک به‌ویژه از نظر تخریب خاک‌دانه، تشکیل اندوده، کاهش نفوذپذیری و افزایش تولید رواناب و رسوب در فرسایش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است (۲) و (۴۴) لیکن چنین موضوعی در فرسایش شیار به‌طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. اهمیت این موضوع در خاک‌های مارنی که دارای ساختمان ناپایدار می‌باشند، دو چندان است. سازندهای مارنی به‌دلیل وجود ذرات تخریبی (سیلت و رس بالا) و مواد شیمیایی (گچ و سایر نمک‌ها) نسبت به سایر سازندها از فرسایش‌پذیری آبی بالاتری برخوردارند (۷). سازندهای مارنی در اکثر نقاط ایران به‌ویژه استان‌های خوزستان، ایلام، لرستان، کرمانشاه و زنجان قابل مشاهده می‌باشند (۷). درباره حساسیت به



شکل ۱. نمایی از فلوم فرسایشی و دستگاه شبیه ساز باران مورد استفاده در پژوهش

کلسیم معادل به روش خنثی سازی با استفاده از اسیدکلریدریک یک نرمال (Gee)، گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) به روش استون (۳۸)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (۲۹) و درصد سدیم تبدیلی (ESP) به روش استات آمونیوم (۲۹) تعیین شدند.

طراحی فلوم آزمایشی

برای بررسی ظرفیت جدا شدن ذرات یک دستگاه فلوم به طول ۴ متر و عرض ۹۴ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر و از جنس آهن طراحی و ساخته شد. این ابعاد منطبق با فلوم های مورد استفاده در پژوهش های لیجوان و همکاران (۳۴) و ژانگ و همکاران (۴۹) بود. در کف فلوم، سوراخ هایی برای زهکشی آسان آب نفوذ یافته ایجاد شد. در قسمت پایین فلوم، ۳ خروجی برای جمع آوری نمونه های رواناب و رسوب تعبیه شده بود و آزمایش مورد نظر در سه تکرار انجام شد. پس از پر کردن فلوم با خاک، سطح خاک به آرامی تسطیح شد و سپس سه شیار با عمق ۷ سانتی متر و فاصله ۳۰ سانتی متر در داخل فلوم مطابق با تحقیقات یان و همکاران (۴۸) ایجاد شد (شکل ۱). برای همسان سازی شرایط خاک داخل فلوم با شرایط خاک منطقه، خاک در چند مرحله مرطوب شد و به

مارن و کنگلومرا به صورت تپه های به هم چسبیده گسترش دارد که از دو بخش میانی شامل مارن، سیلت، کمی به رنگ های قرمز، زرد، صورتی و قهوه ای و حاشیه ای شامل کنگلومرا، ماسه سنگ و مارن تشکیل شده اند (۷). فرسایش خاک توسط آب در غرب و شرق این منطقه بسیار فعال می باشد به طوری که گزارش ها نشان می دهد که گستره ای به مساحت ۵۸۰۰ هکتار تحت تأثیر فرسایش خاک قرار دارد. این منطقه یکی از منابع مهم تولید رسوب در حوزه آبخیز زنجان رود و سفیدرود می باشد و فرسایش شیاری و آبکندی از اشکال بارز فرسایش خاک در این منطقه می باشند (۱۰). خاک مورد بررسی براساس سیستم طبقه بندی خاک در رده تیپیک کلسی زریپت قرار می گیرد (۴۲).

تعیین ویژگی های خاک

نمونه برداری خاک از دامنه ای تحت فرسایش شیاری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر در سه نقطه در طول دامنه برداشت و با هم مخلوط و یک نمونه مرکب تهیه شد. در مجموع حدود ۸ تن خاک از کل منطقه برداشت و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۶ میلی متر در آزمایشگاه مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفتند. برای این منظور توزیع نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری (۲۹) و درصد سنگریزه (قطر ۲ تا ۸ میلی متر) به روش وزنی با استفاده از الک های مربوطه تعیین شد. چگالی حقیقی (PD) به روش پیکنومتر و چگالی ظاهری خاک (BD) با استفاده از سیلندر فلزی به قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی متر در صحرا (۱۶) اندازه گیری شد. تخلخل خاک بر مبنای چگالی حقیقی و ظاهری خاک محاسبه شد. پایداری خاکدانه در خاکدانه های با قطر ۶ تا ۸ میلی متر براساس میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار در آب به روش الک تر برای مدت یک دقیقه (۱۰) و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (۳۸) اندازه گیری شد. واکنش خاک (pH) در گل اشباع به وسیله pH سنج، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع به وسیله EC سنج تعیین شدند. همچنین ماده آلی به روش والکی و بلاک (۴۵)، کربنات

چگالی ظاهری خاک اولیه نزدیک گردید.

طراحی شبیه‌ساز باران

برای اعمال باران‌های با شدت متفاوت، یک دستگاه شبیه‌ساز باران با صفحه بارشی به طول ۴/۵ متر و به عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد (شکل ۱). صفحه بارش دستگاه شامل ۲۰ قطعه نازل آبپاش بود که قادر به تولید باران‌های با شدت متفاوت از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بود. در این پژوهش از باران‌هایی با شدت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد. 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 و باران‌های با شدت کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بیش از ۹۷ درصد باران‌های منطقه را شامل می‌شوند. (۳). قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده به روش گلوله آردی تعیین شد (۱۹) و متوسط قطر قطرات در ۱۰ شدت باران برابر با ۱/۸۵ میلی‌متر بود. آب مورد نیاز دستگاه، از منبع آب شهری که دارای $\text{pH} = 7/23$ و $\text{EC} = 0/385 \text{ dS.m}^{-1}$ بود، از طریق لوله‌های پلاستیکی به صفحه بارش منتقل شد. نمونه‌های خاک در دو حالت ضربه مستقیم قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران تحت تأثیر باران‌های شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. بدین ترتیب در مجموع، این پژوهش در ۶۰ واحد آزمایشی انجام گرفت. برای حذف ضربه مستقیم قطرات باران بر سطح خاک از دو لایه توری پلاستیکی با قطر منافذ ۴ میلی‌متر استفاده شد. در حالت حذف ضربه قطرات باران، توری در مجاورت سطح خاک با فاصله ۳ سانتی‌متر قرار داده شد تا مانعی در برابر جریان آب و انتقال رسوب نشود (۳۷).

تعیین ظرفیت جدا شدن ذرات

ظرفیت جدا شدن ذرات تحت باران‌های شبیه‌سازی شده در علوم مورد بررسی قرار گرفت. در فاصله زمانی پنج دقیقه، رواناب و

رسوب حاصل از هر شیار در ظرفی معین جمع‌آوری شد (۹). پس از هم زدن کامل رواناب و رسوب داخل ظرف، نمونه‌ای همگن با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر از آن برداشت گردید. با محاسبه مقدار رسوب برحسب گرم نمونه همگن، غلظت رسوب نمونه و نهایتاً مقدار کل رسوب جمع شده در ظرف پایین هر شیار به دست آمد. برای تعیین ظرفیت جدا شدن ذرات خاک (D_c) از مفهوم آن در مدل WEEP رابطه (۲) استفاده شد که در آن، D_c به‌عنوان ظرفیت جدا شدن ذرات خاک برای آب زلال ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) بیان شده است. مقدار D_c برابر با مقدار رسوب خروجی از هر شیار طی رخداد باران در واحد سطح (m^2) و واحد زمان (s) بود. بر این اساس پس از پایان هر رخداد باران شبیه‌سازی شده، مقدار خاک هدررفته از هر شیار (رسوب) پس از خشک شدن در آون (دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) وزن شد. مقدار D_c براساس نسبت جرم خاک هدررفته از هر شیار در واحد سطح و مدت وقوع جریان محاسبه شد.

تعیین تغییرات ویژگی‌های خاک شیار در اثر باران

برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل توزیع اندازه ذرات، اندازه خاک‌دانه، تخلخل و ضخامت سله در دو حالت باران (تحت ضربه قطرات و بدون ضربه قطرات) در شدت‌های مختلف باران اندازه گرفته شدند. برای بررسی تغییرات اندازه خاک‌دانه از میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD) استفاده شد و تغییرات MWD به‌عنوان شاخصی از تخریب خاک‌دانه‌ها در اثر ضربه قطرات باران بیان شد (۹). همچنین ضخامت تشکیل سله پس از خشک شدن خاک و جداسازی قطعات متمایز سله از سطح به‌وسیله کولیس اندازه‌گیری شد. مقدار تخلخل خاک پس از باران نیز براساس جرم مخصوص حقیقی و جرم مخصوص ظاهری به‌دست آمد و تغییرات آن بر مبنای مقدار اولیه (پیش از باران) محاسبه شد (۹).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مازنی مورد مطالعه

مقدار	ویژگی شیمیایی	مقدار	ویژگی فیزیکی
۷/۴۵	واکنش	۰/۱۷	شن (%)
۶/۳۵	هدایت الکتریکی (dS.m^{-1})	۴۰/۰۱	سیلت (%)
۱۲/۲۲	درصد سدیم تبادل	۵۹/۸۲	رس (%)
۰/۶۳	ماده آلی (%)	۱۸/۰۱	رس قابل انتشار (%)
۲۶/۱۴	آهک (%)	۱/۷۶	سنگریزه (%)
۱۲/۳	گچ (%)	۲/۶۳	جرم مخصوص حقیقی (g.cm^{-3})
		۱/۰۴	جرم مخصوص ظاهری (g.cm^{-3})
		۶۰/۴	تخلخل (%)
		۰/۱۹	میانگین وزنی قطر خاکدانه در روش الک تر (mm)
		۱/۸۱	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h^{-1})

ماهیت شور (۲۱) بود. میزان رس قابل انتشار در خاک بالا (۱۸/۰۱ درصد) بود. درصد سدیم تبادل خاک (ESP) ۱۲/۲۲ بود. افزایش ESP خاک، موجب افزایش نیروهای دافعه بین رس‌های خاک شده و نیروی چسبندگی را در داخل خاک‌دانه‌ها تضعیف کرده و پاشمان و فروپاشی خاک‌دانه‌ها را تشدید می‌کند (۳۵). پایین بودن پایداری خاک‌دانه‌ها (MWD برابر ۰/۱۹ میلی‌متر) بیانگر ناپایداری ساختمان خاک بود و از این رو خاک مقاومت کمتری در برابر عوامل فرساینده از جمله ضربه قطرات باران داشت (۸).

تخریب فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره تحت تأثیر

شدت باران

نتایج تجزیه واریانس اثر شدت باران بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره نشان داد که شدت باران اثری قابل توجه بر توزیع اندازه ذرات شن ($P < 0/0001$)، سیلت ($P < 0/0001$)، رس ($P < 0/0001$)، تخریب خاک‌دانه و کاهش اندازه خاک‌دانه ($P < 0/0001$)، تخلخل ($P < 0/0001$)، ضخامت سله ($P < 0/0001$) و ظرفیت جدا شدن ذره ($P < 0/0001$) داشت (جدول ۲). این نتیجه به این دلیل بود که از یک‌سو افزایش شدت باران، افزایش تأمین آب در سطح خاک و در

داده‌ها بر مبنای تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد (۳۱). مقایسه میانگین بین شدت‌های باران از نظر ظرفیت جدا شدن ذرات و ویژگی‌های فیزیکی خاک به روش آزمون دانکن تعیین شد. برای مقایسه تأثیر ضربه قطرات باران بر ظرفیت جدا شدن ذرات و ویژگی‌های فیزیکی خاک از آزمون t نمونه‌های جفتی استفاده گردید. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ بهره گرفته شد. برای رسم نمودارها از محیط Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک مازنی

نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. خاک مورد بررسی دارای ۵۹/۸۲ درصد رس، ۴۰/۰۱ درصد سیلت و ۰/۱۷ درصد شن و بافت آن رسی بود. واکنش خاک در محدوده خنثی بود. خاک از نظر ماده آلی فقیر (کمتر از ۱ درصد) بوده و دارای مقدار نسبتاً زیادی کربنات کلسیم معادل (بیش از ۲۵ درصد) و گچ (۱۲/۳ درصد) بود (۴۳). با توجه به وجود املاح مختلف در خاک از جمله گچ، هدایت الکتریکی بالا ($\text{EC} = 6/35 \text{dS.m}^{-1}$) بود و خاک دارای

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر شدت باران بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره در دو حالت باران (ضربه قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران)

F	مجموع مربعات	میانگین مربعات	درجه آزادی	حالت ضربه قطرات باران	منبع تغییرات
۱۱/۹۳۱۳**	۰/۱۹۳	۰/۰۲۱	۹	ضربه مستقیم قطرات	شن
۲۳/۲۷۸**	۰/۲۱۸	۰/۰۲۴	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۳۹۳/۱۷۰**	۱۶۰۱۰/۵۸۶	۱۷۷۸/۹۵۴	۹	ضربه مستقیم قطرات	سیلت
۱۸۴/۲۱۱**	۱۷۳۰۹/۸۹۴	۱۹۲۳/۳۲۲	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۹۵/۷۳۳**	۸۹۹۲/۴۹۵	۹۹۹/۱۶۶	۹	ضربه مستقیم قطرات	رس
۸۳/۰۶۸**	۷۸۱۷/۶۴۰	۸۶۸/۶۲۷	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۱۳۸۳۸/۱۶۷**	۱۲/۴۵۴	۱/۳۸۴	۹	ضربه مستقیم قطرات	تغییرات اندازه خاک‌دانه
۱۴۰۱۹/۴۸**	۱۴/۳	۱/۵۸۹	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۳۲۶۰۴/۱۶۷**	۲۹/۳۴۴	۳/۲۶	۹	ضربه مستقیم قطرات	تشکیل سله
۴۷۳۰۹/۲۲۲**	۳۸/۳۲۰	۴/۲۵۸	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۱۵۵/۷۸**	۱۶۴/۵۰۹	۲۷۹/۱۸	۹	ضربه مستقیم قطرات	تغییرات تخلخل
۱۳۹/۴۷۲**	۱۷۱/۷۰۳	۱۹/۰۷۸	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	
۲۵۵/۸۸۸**	۲×۱۰ ^{-۴}	۱/۱×۱۰ ^{-۸}	۹	ضربه مستقیم قطرات	ظرفیت جدا شدن ذره
۶۵۷/۸۱۷**	۲/۰۴×۱۰ ^{-۶}	۱/۰۱×۱۰ ^{-۱۰}	۹	بدون ضربه مستقیم قطرات	

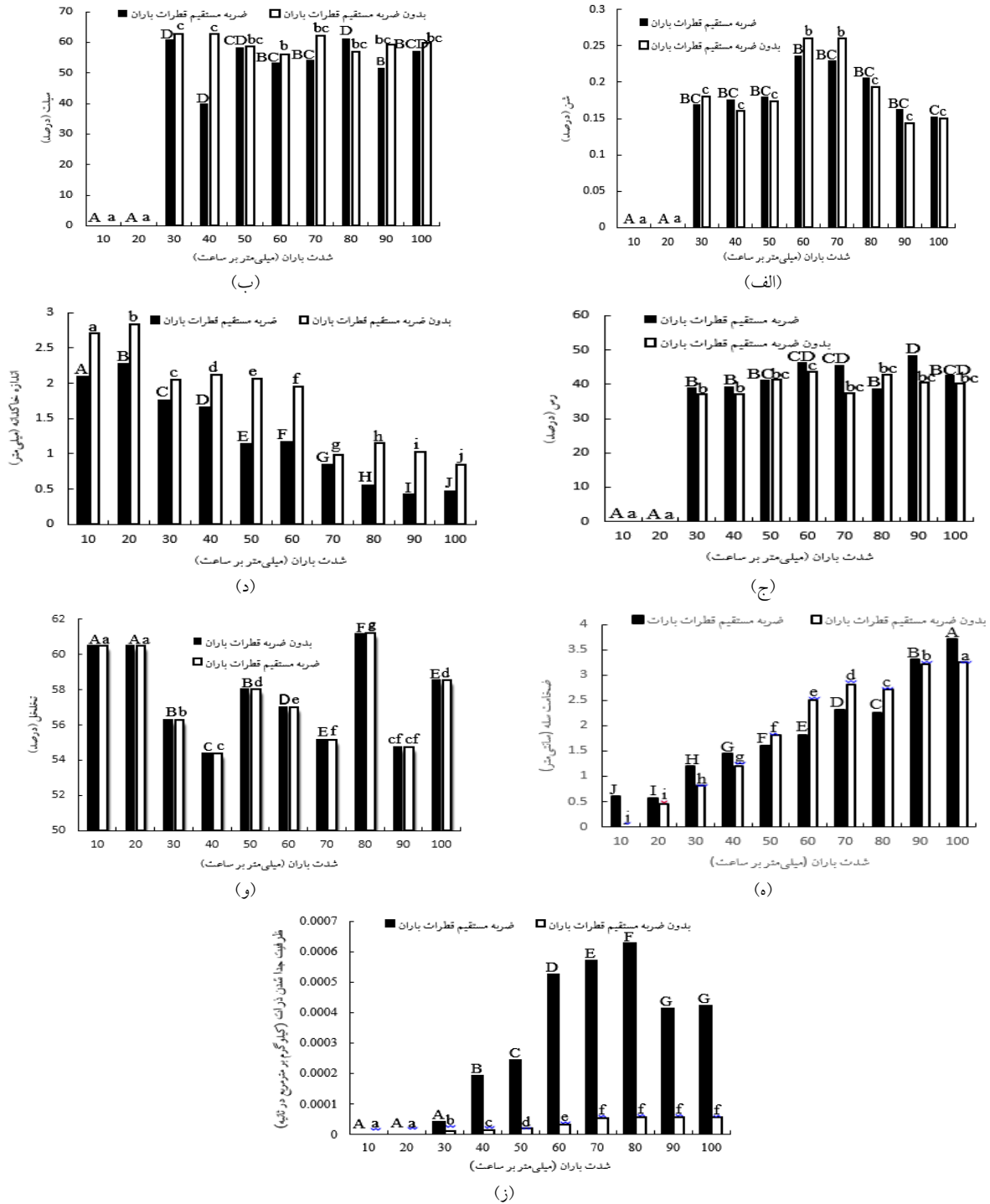
** معنی‌دار در سطح ۹۹/۹۹ درصد

توزیع اندازه ذرات در خاک شیار (شن، سیلت و رس) بود. این موضوع بیانگر نقش مهم شدت باران در افزایش تأمین آب در سطح خاک و در نتیجه تولید رواناب بیشتر در شیارها و در نتیجه تغییر توزیع اندازه ذرات خاک شیار بود. در مطالعه‌ای آنگولو و همکاران نشان دادند که میزان جدا شدن ذره به ویژگی‌های باران مثل انرژی جنبشی، شدت و مدت بارندگی و ویژگی‌های خاک بستگی دارد (۱۲). در پژوهشی والتسا و همکاران اعلام داشتند عواملی مانند شدت بارندگی، مقدار رطوبت پیشین خاک، خصوصیات هیدرولیکی خاک، شیب زمین و روش‌های مدیریتی بر تخریب خاک‌دانه‌ها اثر می‌گذارند (۴۴).

ضخامت سله در هر دو حالت (ضربه مستقیم قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران) تحت تأثیر شدت باران قرار گرفت ($P < 0/000$) به طوری که با افزایش شدت باران، ضخامت سله در هر دو حالت افزایش یافت. علت این امر از یک سو می‌تواند به دلیل ناپایداری ساختمان خاک مارنی و

نتیجه تولید رواناب بیشتر را به دنبال داشت و از سوی دیگر ضربه قطرات باران عامل مهم فرساینده است که با انرژی جنبشی خود باعث فروپاشی خاک‌دانه‌ها و در نتیجه کاهش تخلخل و نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش‌پذیری خاک شد. این نتایج با مطالعات پیشین در مورد نقش شدت باران در فرسایش شیار مطابقت دارد. در این راستا ناواز (۳۶)، چنگ و همکاران (۲۰)، و ظریف و همکاران (۶) نیز در بررسی خود نشان دادند که بین شدت باران با فرسایش شیار در اکثر موارد رابطه‌ای معنی‌دار وجود دارد به طوری که با افزایش شدت باران مقادیر رسوب افزایش پیدا می‌کند.

مقایسه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذرات در هر یک از شدت‌های باران بین دو حالت باران (ضربه قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران) نشان داد که میزان تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره در دو حالت باران مشابه نیست (شکل ۲). در هر دو حالت باران، شدت باران عاملی مهم در قابلیت انتقال ذرات و تغییر



شکل ۲. مقایسه میانگین توزیع، الف، ب و ج) اندازه ذرات، د) اندازه خاکدانه، ه) ضخامت سله، و) تخلخل، و ز) ظرفیت جدا شدن ذرات، در دو حالت ضربه قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران (حرف‌های لاتین روی ستون‌ها، نتایج مقایسات میانگین براساس آزمون دانکن می‌باشد و حرف‌های غیرمشترک نشانگر تفاوت معنی‌دار بین شدت‌های باران می‌باشد)

بر ساعت)، کاهش قطر قطرات باران در دستگاه شبیه‌ساز باران و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی کل باران بود. اریپول و کانگا نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت باران، مقدار فرسایش به دلیل افزایش ضربه مکانیکی قطرات باعث تخریب خاک‌دانه‌ها و متلاشی شدن آنها می‌شوند (۲۵). در پژوهشی توسط فرناندز و همکاران رابطه بین انرژی جنبشی قطرات باران و فرسایش شیار در شمال پرتقال بررسی شد (۲۶). نتایج نشان داد که با افزایش انرژی جنبشی قطرات باران و افزایش قطر متوسط قطرات باران، فرسایش شیار به صورت خطی افزایش یافت. همچنین یافته‌های دانجادی و کیناراسری نشان داد که با افزایش شدت بارش از ۵۵ به ۱۱۴ میلی‌متر بر ساعت میزان رواناب به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند (۲۲). در حالت حذف ضربه قطرات، مقدار D_c تا شدت باران ۷۰ میلی‌متر بر ساعت به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و سپس به مقدار ثابت رسید (شکل ۲). با توجه به این که در حالت بدون ضربه قطرات باران، انرژی جنبشی باران نقشی در تخریب ساختمان خاک و D_c نداشت، تأمین با آب بیشتر در سطح و در نتیجه قابلیت تولید جریان در شیارها، عاملی مهم برای افزایش مقدار D_c تا شدت باران مذکور بود. چنین به نظر می‌رسد که شدت باران ۷۰ میلی‌متر بر ساعت توان کافی برای ایجاد جریانی برای انتقال تمام ذرات حساس به انتقال را دارا می‌باشد و در شدت‌های باران بالاتر از آن، اگر چه تولید جریان متمرکز افزایش می‌یابد لیکن مقدار مواد قابل انتقال در شیارها تغییر نیافته و عملاً غلظت رسوب در جریان شیار پایین‌تر می‌شود.

تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره تحت تأثیر ضربه قطرات باران

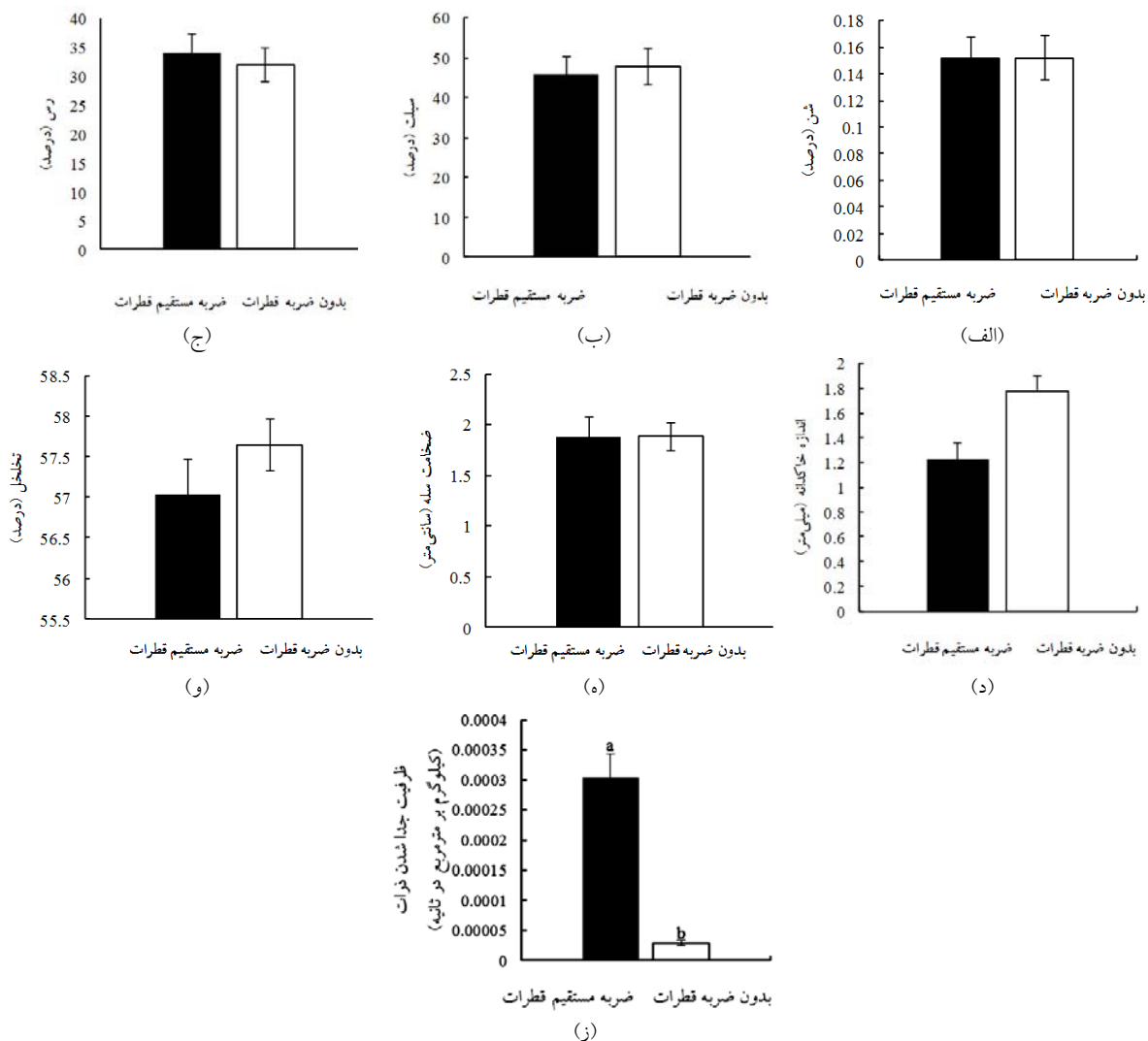
مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره بین دو حالت باران (ضربه قطرات و بدون ضربه قطرات) نشان داد (جدول ۳) که در دو حالت باران تفاوتی معنی‌دار از نظر ویژگی‌های فیزیکی خاک (توزیع اندازه ذرات، اندازه خاک‌دانه و تخلخل) وجود نداشت (شکل ۳). این نتایج بیانگر

تخریب شدید آن به دلیل جذب بیشتر آب در باران‌های شدید باشد و از سوی دیگر ضربه قطرات باران عاملی مهم در انهدام ساختمان خاک سطحی و تشکیل توده‌های بدون ساختمان در سطح خاک می‌باشد. در پژوهشی توسط بوفین و مونیر رابطه بین انرژی جنبشی قطرات باران و فرآیندهای فرسایش بارانی و عوامل مؤثر بر تشکیل سله سطحی در آلمان بررسی شد (۱۷). نتایج نشان داد که قطرات باران به‌وسیله جداسازی ذرات خاک (خاک‌دانه یا ذرات اولیه خاک)، انتقال ذرات جدا شده به‌وسیله پاشمان توسط قطرات باران و در نهایت تراکم خاک سطحی، باعث تخریب ساختمان خاک و تشکیل سله در سطح خاک شدند. آنها بیان کردند که با افزایش میزان رطوبت اولیه خاک‌دانه‌ها و افزایش قطر آنها، میزان تخریب خاک‌دانه‌ها افزایش و به دنبال آن سرعت تشکیل سله در سطح خاک نیز افزایش یافت. اسدی و همکاران با بررسی‌های ریخت‌شناسی و مطالعات هیدرولیکی نشان دادند که تغییرات فیزیکی ایجاد شده در اثر اندوده سطحی می‌تواند زبری سطح خاک، تخلخل لایه سطحی و نفوذپذیری را کاهش داده و سرعت جریان سطحی را افزایش دهد (۱). آسولاین و بنهور نیز مشاهده کرده‌اند که سرعت نفوذ در شیب‌های مختلف و شدت‌های متفاوت بارندگی تحت تأثیر اندوده سطحی می‌باشد و با افزایش شدت بارندگی ضخامت اندوده سطحی افزایش می‌یابد (۱۳). نتایج پژوهش ساینت جین نشان داد که برخورد قطرات باران با انرژی بالا بر روی خاک سبب پرتاب ذرات خاک همراه با آب به هوا می‌شود که این امر باعث تراکم خاک و کاهش تخلخل می‌شود (۴۰).

ظرفیت جدا شدن ذره (D_c) با افزایش شدت باران در حالت ضربه مستقیم تا شدت ۸۰ میلی‌متر بر ساعت افزایش پیدا کرد و سپس کاهش یافت. افزایش مقدار D_c تا شدت باران ۸۰ میلی‌متر بر ساعت را می‌توان در کنار افزایش تأمین آب بیشتر در سطح خاک، به افزایش تعداد و قطر قطرات باران و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی کل باران مرتبط دانست. یکی از دلایل اصلی کاهش D_c در شدت‌های بسیار بالا (بیشتر از ۸۰ میلی‌متر

جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره بین دو حالت باران (ضربه قطرات باران و حذف ضربه قطرات باران)

منبع تغییرات	درجه آزادی	اختلاف میانگین	t	معنی‌داری
شن	۵۸	-۰/۰۰۰۳۷	-۰/۰۱۶	۰/۹۸۷
سیلت	۵۸	-۲/۰۶	-۰/۳۳۲	۱/۷۴۱
رس	۵۸	۲/۰۷	۰/۴۶۴	۰/۶۴۴
تخریب خاک‌دانه	۵۸	-۰/۱۶۶	-۱/۷۰۴	۰/۰۹۴
ضخامت سله	۵۸	۰/۰۰۶	۰/۰۲۲	۰/۹۸۳
کاهش تخلخل خاک	۵۸	-۰/۶۱۳	-۰/۹۸	۰/۳۳۲
ظرفیت جدا شدن ذره	۵۸	۰/۰۰۰۲۷	۶/۴۱	۰/۰۰۰



شکل ۳. نقش ضربه قطرات باران بر درصد، الف) ذرات شن، ب) سیلت، ج) رس در رسوب، د) اندازه خاک‌دانه، ه) ضخامت سله، و) تخلخل و ز) ظرفیت جدا شدن ذرات خاک

ذرات در خاک لوم نیز به یک اندازه نیست (۱۱).

نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که شدت باران عاملی مهم در تخریب ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره از شیار می‌باشد. با افزایش شدت بارندگی، تخریب خاک‌دانه‌ها افزایش یافت و به دلیل کاهش تخلخل خاک و تشکیل اندوده سطحی و در نتیجه افزایش امکان تولید جریان متمرکز در شیار، ظرفیت جدا شدن ذره در شیار افزایش یافت. افزایش شدت باران از یک سو به دلیل افزایش تأمین آب در سطح خاک و در نتیجه تولید بیشتر جریان متمرکز در شیار بود و از سوی دیگر افزایش تعداد برخورد قطرات باران بر سطح خاک را به دنبال داشت. ظرفیت جدا شدن ذره تحت تأثیر ضربه قطرات باران قرار گرفت به طوری که مقدار ظرفیت جدا شدن ذره تحت تأثیر ضربه قطرات باران به طور قابل توجهی بیشتر از حالت بدون ضربه قطرات بود. اگر چه ضربه قطرات باران می‌تواند عاملی مهم در تخریب ساختمان خاک و تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک (دانه‌بندی ذرات، تخلخل و تشکیل سله) باشد اما ناپایداری ساختمان خاک مارنی عاملی بود که موجب شد حتی در حالت بدون ضربه قطرات نیز تخریب ویژگی‌های فیزیکی خاک بالا باشد. چنین به نظر می‌رسد که در خاک مارنی حساس به فرسایش که دارای ساختمان ناپایدار می‌باشد، نقش افزایش شدت باران در افزایش تخریب فیزیکی خاک و در نتیجه انتقال ذرات بیشتر از خاک شیار، بیشتر به واسطه افزایش تأمین آب در خاک باشد. با افزایش شدت باران و تأمین آب بیشتر در سطح خاک و در نتیجه تولید جریان متمرکز بیشتر در شیارها، ظرفیت جدا شدن ذرات به طور قابل توجهی افزایش یافت. به طور کلی این پژوهش نشان می‌دهد که ضربه قطرات باران می‌تواند به عنوان عاملی مهم در کنار شدت باران برای بیان فرساینده‌گی باران و ارائه مدل‌های دقیق‌تر مورد توجه قرار گیرد. اهمیت این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک دو چندان است چرا که این مناطق اغلب دارای عرصه‌هایی با پوشش گیاهی ضعیف هستند و بارندگی‌های شدید اغلب هنگامی که خاک بدون

آن است که در خاک مارنی مورد بررسی، ضربه قطرات باران عاملی مهم در تخریب فیزیکی خاک نمی‌باشد. علت اصلی تخریب فیزیکی خاک مارنی، وجود آب می‌باشد. به طور کلی خاک مارنی دارای ساختمان بسیار ضعیف و ناپایدار است و وجود رس زیاد عامل اصلی جذب بیشتر آب در آن است. با جذب آب بیشتر در زمان بارندگی‌های زیاد (باران یا برف)، ساختمان خاک به شدت فروریخته و خاک تبدیل به گل می‌شود. این نتیجه برخلاف یافته‌های والتا و همکاران در خاک کشاورزی با ساختمان مناسب بود (۴۴). آنها نشان دادند که قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک به دلیل ضربه مکانیکی خود باعث تخریب خاک‌دانه، ایجاد سله، کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش خاک می‌شود. نقش رطوبت خاک در افزایش حساسیت خاک به فرسایش در مطالعات روز-سینوگا و رومز-دیز با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران نیز به اثبات رسیده است (۳۹). آنها نشان دادند که با افزایش مقدار رطوبت خاک، حساسیت خاک‌دانه‌ها به تخریب توسط قطرات باران افزایش پیدا می‌کند. همچنین یافته‌های دانجادی و کیناراسری نشان دادند که با افزایش شدت بارندگی، به دلیل افزایش تعداد و قطر قطرات باران، انرژی جنبشی باران و در نتیجه فرسایش پاشمانی افزایش می‌یابد (۲۲). پژوهش حاضر نشان داد که ضربه قطرات باران اثری قابل توجه بر ظرفیت جدا شدن ذره ($P < 0/000$) داشت به طوری که در حالت ضربه قطرات باران مقدار D_c به اندازه ۷ برابر مقدار آن در حالت بدون ضربه بود. از آنجا که بین دو حالت باران، تفاوتی قابل ملاحظه در تخریب فیزیکی خاک وجود نداشت، افزایش ظرفیت جدا شدن ذره در حالت ضربه قطرات باران می‌تواند به دلیل نقش قطرات باران در ایجاد فرسایش پاشمانی و کمک به انتقال ذرات باشد. با این وجود اندازه خاک‌دانه، توزیع اندازه ذرات، تخلخل و ضخامت سله تحت تأثیر ضربه قطرات باران قرار نگرفتند (جدول ۳) (شکل ۳). در پژوهشی دوره نشان داد از آنجا که در شدت‌های مختلف باران، قطر قطرات یکسان می‌باشد، میزان جدا شدن

پوشش مناسب می‌باشد، رخ می‌دهند.

منابع مورد استفاده

۱. اسدی، ح. ق. رفاهی، ح. روحی پور و ح. و. قدیری. ۱۳۸۵. بررسی فرسایش بین‌شیاری و ارزیابی چند معادله در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از شبیه‌سازی باران، علوم کشاورزی ایران ۳۷(۵): ۷۷۵-۷۸۴.
۲. اکبری، س. و ع. ر. واعظی. ۱۳۹۳. بررسی پایداری خاک‌دانه‌ها در برابر ضربه قطرات باران در برخی خاک‌های ناحیه نیمه‌خشک در شمال غرب زنجان، دانش آب و خاک ۲۵(۲): ۶۵-۷۷.
۳. بشارت، ف. و ع. ر. واعظی. ۱۳۹۴. تأثیر الگوی زمانی بارندگی طی بر رواناب و هدررفت خاک تحت باران‌های شبیه‌سازی شده، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران ۹(۲۹): ۱۸-۹.
۴. حسن‌زاده نفوتی، م. س. فیض‌نیا، ح. احمدی، ح. پیروان و ج. غیومیان. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مارنها بر میزان رسوب‌دهی با استفاده از مدل فیزیکی باران ساز. نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران ۱۱(۱): ۳۵-۴۸.
۵. رفاهی، ح. ق. ۱۳۹۳. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ پنجم، فصل سوم، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۴۳۵.
۶. ظریف، م. س. س. ح. ر. صادقی و س. خ. میرنیا. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات رواناب و رسوب در دو شیب مختلف در حوزه آبخیز جنگلی کجور، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. گرگان. ۲ تا ۳ اردیبهشت، صفحه ۲۱۲.
۷. عبدی، پ. ۱۳۷۹. بررسی خصوصیات زمین‌شناختی نهشته‌های کوارتزی دشت زنجان به منظور تعیین محل‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
۸. واعظی، ع. ر. س. اکبری و م. ح. محمدی. ۱۳۹۲. بررسی فرآیندهای فرسایش بارانی در خاک‌دانه‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی در خاک‌های آهکی شمال غرب زنجان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران ۴۵: ۸۷-۹۴.
۹. واعظی، ع. ر. و ا. وطنی. ۱۳۹۳. تعیین فرسایش‌پذیری شیاری در برخی خاک‌های استان زنجان تحت باران شبیه‌سازی شده. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۷۱: ۶۷-۵۹.
۱۰. واعظی، ع. ر. و ح. قره‌داغلی. ۱۳۹۲. کمی‌سازی گسترش فرسایش شیاری در خاک‌های مارنی در حوزه آبخیز زنجان‌رود در شمال غرب زنجان، نشریه آب و خاک ۲۷: ۸۸۱-۸۷۲.
11. AL-Durrah, M. and J. Bradford. 1982. Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact, Soil Sci. Soc. Am. J. 46(4):836-840.
12. Angulo, S., A. Begueria, J. Navas and L. Machin. 2012. Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology* 38: 44. 175-176.
13. Assouline, S. and 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.
14. Bagnold, R. A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey Paper 422, Washington.
15. Benito, G. M., M. Gutierrez and C. Sancho. 1991. Erosion pattern in rill and interrill areas in badland zones of the middle Ebro Basin (NE-Spain). *Soil Erosion Studies in Spain*. 5: 41-54.
16. Blake, G. R. and K. Hartge. 1986. Bulk density, PP: 363-375. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd ed. Agronomy Monograph, 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
17. Boiffin, J. and G. Monnier. 1986. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In *Symposium. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation*. 19-85, Ghent, BEL.
18. Bufalo, M. and D. Nahon. 1992. Erosional process and Mediterranean badlands: A new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion, *Geoderma* 52:133-147.
19. Carter- Cade, E., D. Greer, J. Braud and M. Floy. 1974. Raindrop characteristics in southcentral United States. *Trans ASAE*. 17: 1033-1037.

20. Cheng, Q., W. Ma and 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 J.* 71(2-3):117-125.
21. Dahnke, W. and D. Whitney. 1988. Measurement of soil salinity. Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. *North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull.* pp. 32-34 .
22. Donjadee, S. and C. Chinnarasri. 2012. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation. *Inter. J. Sediment Res.* 27(2): 168-177.
23. Eesteaves, M. 2005. Soil hydraulic properties in a marly gully catchment (Draix France), *Catena.* 63: 282-298.
24. Engelend, G. B. 1971. Runoff processes and slope development in badlands national monument. *South Dakota, J. Hydrol.* 18: 55-79.
25. Erpul, G. and Canga, M. R. 1999. Effect of subsequent simulated rainfalls on runoff and erosion. *Turkish J. Agri. Forest.* 23: 659-666 .
26. Fernández-Raga, M., R. Fraile, J. Keizer, M. Teijeiro, V. A. Castro, C. Palencia and C. Marques. 2010. The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: an application to splash erosion. *Atmospheric Res.* 96(2): 225-240 .
27. Foster, G. R., C. Flanagan, A. Nearing, J. Lane, M. Risse and C. Finkner. 1995. Hillslope erosion component. PP. 1-11. *In: Flanagan DC and Nearing MA (Edts), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation.* NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
28. Foster, G. R., D. Meyer and A. Onstad. 1997. An erosion equation derived from basic principles. *Trans. ASAE.* 20(4): 678-682.
29. Gee, G. and W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part1. 2nd ed.. Agron. Monoger. American Society Agronomy. Madison. WI.*
30. Haiou, S., Z. Fenly, W. Leilei, H. Yong and H. Wei. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope, *Soil Till. Res.* 155: 429-436.
31. Kravchenko, A. and G. Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agron. J.* (91): 393-400.
32. Le bissonnaise, Y., A. Bruan and M. Jamagne. 1989. Laboratory experimental study of soil crusting, *Catena.* 16(4): 377-392.
33. Li, M., L. Zhan-bin, L. Dingd and W. Yaon. 2006. Using rare earth element tracers and neutron activation analysis to study rill erosion process. *Appl. Radiat. Isot.* 64: 402-408.
34. Lijuan, Y., L. Tingwu, Z. Jing and Z. Qingwen. 2015. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on acurved slope, *Catena* 3: 28-41.
35. Mamedov, A., I. J. Levy, G. Shainberg, and J. Letey. 2001. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. *Soil Res.* 3: 1293-1305 .
36. Navas, A. 1993. Soil loses under simulator rainfall in semi-arid shrublands of the Ebro Valley. *J. Soil Water Conserv.* 42: 211-215.
37. Neave, M. and S. Rayburg. 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.
38. Page A. L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties, *Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA.*
39. Ruiz-Sinoga, J. D. and A. Romero Diaz. 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in southern Spain. *Geomorphology* 118(3): 359-368.
40. Saint-Jean, S., M. Chelle and L. Huber. 2004. Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. *Agri. Forest Meteo.* 121:183-196.
41. Sirventij, D. G., S. Guticres and G. Benito. 1996. Erosion in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro basin, NW- Spain). *Geomorphology* 5: 503.
42. Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Marking and Interpreting Soil Survey.* U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 436, Washington D.C.
43. Tan, K. H. 2005. *Soil sampling, preparation, and analysis.* CRC press.
44. Valettea, G., S. Prevosta and L. Lucasa. 2006. A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Comput. Graph.* 30: 494-506.
45. Walkley, A. and A. Black. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Sci.* 63: 251-264.
46. Wildhaber, Y., S. D. Bänninger, K. Burri and C. Alewell. 2012. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland. *Catena* 91: 56-62.
47. Chen, X. Y., YZhao, B. Mo and H. X. Mi. 2014. An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *PLoS ONE* 9: 148-150.

48. Yan, L., T. Lei, J. Zhang, Q. Zhang and L. Qu. 2015. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on a curved slope. *Catena* 3: 28-41.
49. Zhang, W. T., S. Yu, Z. Shi, Z. Tan and S. Liu. 2010. Variation of sediment concentration and its drivers under different soil management systems. *Pedosphere* 20(5): 578-585.

Physical Degradation and Particle Detachment Capacity of Rill in Relation to Rainfall Intensity and Raindrop Impact in a Marl Soil

M. Foroumadi and A. Vaezi^{1*}

(Received: March 02-2016 ; Accepted: Oct. 10-2016)

Abstract

Rill erosion is the first step in soil erosion process in the hillslopes, particularly in arid and semiarid regions. This study was conducted to investigate the role of rainfall intensity and raindrop impact on the physical properties of soils and particle detachment capacity (Dc) in a marl soil. Marl soil samples were filled into the flumes with 4 m long and 0.9 m wide and exposed to simulated rainfalls with different intensity varying from 10 mm h⁻¹ to 100 mm h⁻¹. Particle Size Distribution (PSD), aggregate size, porosity, crust thickness, and Dc were determined in each rainfall simulation. The results found that the physical soil properties i.e. PSD, aggregate size, porosity and crust thickness ($P < 0.000$) were significantly influenced by different rainfall intensities. Also, the rainfall intensity was also an important factor in controlling Dc in the soil. Rainfall intensity of 30 mm.h⁻¹ was recognized as the threshold rainfall intensity for transporting soil particles in the marl soil and rill erosion. An increase in the rainfall intensity was attributed to the increases in the raindrop impacts and in consequence aggregate breakdown, and higher production of concentrated flows in the rills. Raindrop impact is the most important characteristics of the rainfall in the rill erosion and Dc in the marl soil.

Keywords: Concentrated flow, Threshold rainfall intensity, Rill erosion, Raindrop erosivity.

1. Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com