



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۲ | اردیبهشت ۱۴۰۱ (ص ۲۳۱-۲۱۷)

DOI: <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.335635.669159>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigation of the Relationship between Roughness Coefficient and Detachment and Deposition Rate in Plowed Soil using Rainfall Simulation in Laboratory Flume

ZAHRA GERAMI¹, AHMAD KARIMI^{1*}, MAHMOOD ARABKHEDRI², HOSSEIN ASADI³

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
 2. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
 3. Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- (Received: Dec. 14, 2021- Revised: Feb. 7, 2022- Accepted: Feb. 19, 2022)

ABSTRACT

Soil erosion is a process that is affected by surface roughness (SSR) and soil texture. The aim of this study was to investigate the relationship between roughness coefficient and detachment and deposition rate in plowed soil samples of drylands of Kouheen, Sararud and Gachsaran regions due to their susceptibility to erosion after plowing, by simulation. Two precipitations (R1 and R2) with a distance of 4 hours with an intensity of 111 mm/h were simulated in a 5.8 m² laboratory flume with a slope of 12%. To determine soil loss, runoff was collected with sediment. Also, photographs were taken before and after each rainfall and a digital elevation model with a pixel size of 2 mm was prepared and from it, surface soil roughness was calculated and divided into three classes (rough, medium and soft). The difference of the digital elevation model (DOD) before and after each rainfall (R0, R1 and R2) was calculated to determine the amount of detachment, deposition and sediment delivery ratio (SDR) and their trend was roughly studied. Soil loss in Gachsaran soil sample were measured in 4796 and 3909 g, Kouheen, 3465 and 2464 g and Sararud, 2679 and 2105 g, respectively. The ratio of harvest to sedimentation in the first event was 5.4, 7.3 and 1.8 in Kouheen, Sararud and Gachsaran soils and 3.2, 1.9 and 1.2 in the second event, respectively. The amount of SDR in the second rainfall in Kouheen, Sararud and Gachsaran soils has been 4.4, 6.3 and 2.3 times higher than R1, respectively. The direct regression relationship between soil loss and roughness with a coefficient of determination (R^2) of 0.89 ($P < 0.05$) was obtained. Finally, by preparing the DEM and eliminating its uncertainty, reliable amounts of detachment and deposition can be obtained.

Keywords: Fallow, Dryland, Index Of DEM Of Difference, Photogrammetry, Sediment Delivery Ratio.

* Corresponding Author's Email: karimiahmad1342@sku.ac.ir

بررسی ارتباط بین ضریب زبری با میزان برداشت و رسوب‌گذاری در خاک شخم‌خورده به کمک شبیه‌سازی باران در فلوم آزمایشگاهی

زهرا گرامی^۱، احمد کریمی^{۱*}، محمود عرب‌خردی^۲، حسین اسدی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
 ۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
 ۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰)

چکیده

فرسایش خاک فرایندی است که تحت‌تأثیر زبری سطح (SSR) و بافت خاک، قرار می‌گیرد. این پژوهش با هدف بررسی ارتباط بین ضریب زبری با میزان برداشت و رسوب‌گذاری در نمونه خاک شخم‌خورده دیمزار مناطق کوهین، سرارود و گچساران به علت مستعد فرسایش بودن این خاک‌ها پس از شخم، به کمک شبیه‌سازی انجام شد. دو بارش (R1 و R2) با فاصله ۴ ساعت با شدت ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت در فلوم آزمایشگاهی ۵/۸ مترمربعی با شیب ۱۲ درصد شبیه‌سازی شد. برای تعیین تلفات خاک، رواناب خروجی با رسوب همراه جمع‌آوری شد. همچنین قبل و بعد از هر بارش عکس‌برداری انجام و مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسل دو میلی‌متری تهیه و از آن، زبری سطحی خاک محاسبه و به سه طبقه (زبر، متوسط و نرم) تقسیم شد. تفاوت مدل رقومی ارتفاع (DOD) در قبل و بعد از هر بارش (R2 و R1, R0) برای تعیین مقدار برداشت، رسوب‌گذاری و نسبت تحویل رسوب (SDR) محاسبه شد و روند آن‌ها با زبری بررسی شد. تلفات خاک در نمونه خاک گچساران در دو رویداد به ترتیب ۴۷۹۶ و ۳۹۰۹ گرم، کوهین ۳۴۶۵ و ۲۴۶۴ گرم و سرارود، ۲۶۷۹ و ۲۱۰۵ گرم اندازه‌گیری شد. نسبت مقادیر برداشت به رسوب‌گذاری در رویداد اول در خاک کوهین، سرارود و گچساران به ترتیب ۵/۴، ۷/۳ و ۱/۸ و در رویداد دوم به ترتیب ۳/۲، ۱/۹ و ۱/۲ برابر بوده است. مقدار SDR در بارش دوم در خاک کوهین، سرارود و گچساران به ترتیب ۴/۴، ۶/۳ و ۲/۳ برابر بیشتر از R1 شده است. رابطه رگرسیونی مستقیم بین تلفات خاک و زبری، با ضریب تعیین، $P < 0.05$ / ۰/۸۹ به دست آمد. درنهایت می‌توان با تهیه DEM و رفع عدم قطعیت آن، مقادیر مطمئنی از برداشت و رسوب‌گذاری را به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: آیش، دیمزار، شاخص تفاوت مدل‌های رقومی ارتفاع، فتوگرامتری، نسبت تحویل رسوب.

مقدمه

جنبه‌های مختلف تأثیرات انسانی، در فرایندهای مؤثر دامنه‌ها از طریق عمل خاک‌ورزی و مدیریت زمین که باعث افزودن غیرطبیعی رسوبات به جریان‌های دامنه‌ای شده است (Houben, 2008)، کمتر توجه شده است.

زبری سطحی خاک ناشی از خاک‌ورزی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که بسیاری از فرایندهای سطحی زمین از قبیل نفوذ، فرسایش خاک و تولید رواناب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Bullard et al., 2018; Zhang & Xie, 2019). زبری سطحی خاک حاصل کلوخه‌هایی ناشی از خاک‌ورزی (۱۰۰ میلی-متر و گاهی تا ۲۰۰ میلی‌متر) و بدون جهت‌گیری زبری تصادفی شناخته می‌شوند (Smith, 1986) که در بسیاری از منابع، زبری

فرسایش خاک مشکلی اساسی است که به‌شدت منابع خاک و پایداری کشاورزی در دامنه‌ها را تهدید می‌کند (Govers et al., 2017). فرایند فرسایش شامل جداشدن، برداشت ذرات جداشده از توده خاک و انتقال آن‌ها توسط عوامل فرساینده (رواناب و باد) است و زمانی که دیگر انرژی کافی برای انتقال ذرات در دسترس نباشد، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد (Morgan, 2005). به دلیل تأثیرات قابل‌توجه فرسایش خاک و تولید رسوب بر بهره‌وری خاک زمین‌های کشاورزی و تأثیرات احتمالی مضر خارج از عرصه آن‌ها، تحقیقات بسیاری (Li et al., 2021; Nouwakpo et al., 2020; Sun et al., 2021; Wang et al., 2021; Ventura et al., 2002; He et al., 2016) بر فرایندهای فرسایش خاک در دامنه‌های زراعی انجام شده است. در این مورد متأسفانه به

توپوگرافی با جزئیات بالا در سطح دامنه (Rieke-Zapp and Nearing, 2005) باعث آن شده است که اطلاعات دقیقی در نقش میکرو توپوگرافی در فرسایش خاک وجود نداشته باشد (Zheng et al. 2012). از این رو محققان برای بررسی میکرو توپوگرافی سطحی خاک از شبیه‌سازی در آزمایشگاه استفاده می‌کنند (Xu et al. 2018). زبری سطحی خاک در مقیاس کوچک در اندازه پلات صحرایی یا آزمایشگاهی، با تکنیک‌های تماسی مانند زنجیر غلتکی (Saleh, 1993) یا پین متر (Jester and Klik, 2005) و تکنیک‌های غیرتماسی شامل فتوگرامتری (Hohle, 2009)، انواع اسکنرهای لیزری (Favey et al. 2003) و پروفیل‌مترهای لیزری (Bertuzzi et al. 1990) اندازه‌گیری می‌شوند. برای کمی کردن زبری سطحی نیز از مدل رقومی ارتفاع^۴ و یا پروفیل‌های ارتفاعی به‌دست‌آمده از تکنیک‌های تماسی و غیرتماسی، از شاخص‌هایی استفاده شده است که شاخص انحراف استاندارد ارتفاع^۵ به‌عنوان شاخص دامنه‌ای و به طور پیش‌فرض در مطالعات استفاده می‌شود، زیرا خلاصه‌ای مفید و ساده از بی‌نظمی‌های میکرو توپوگرافی در واحد طول از یک سطح مرجع را نشان می‌دهد (Zhang and Xie, 2019; Zhu, 2020).

در سطح‌های کوچک در مقیاس کرت و فلوام آزمایشگاهی، رسوب خروجی به دلیل بازتوزیع قسمتی از رسوب، احتمالاً کمتر از مجموع ذرات جدا شده و حمل شده خاک به سمت خروجی است (Chaplot and Poesen, 2012). زیرا میزان رسوب و خواص فیزیکی آن در طی فرآیند پیچیده انتقال، رسوب‌گذاری و انتقال مجدد به طرز قابل توجهی تغییر می‌کند که این مفهوم با نسبت تحویل رسوب (SDR^۶) معرفی می‌شود. SDR به‌عنوان رابطه‌ای بین رسوبات تحویل داده شده در خروجی و فرسایش ناخالص مشخص شد که مقدار آن بین صفر تا صد درصد متغیر است (Thomas et al. 2020) و در اغلب مقیاس‌های مکانی معادل صد درصد نیست (Zhang et al. 2015). مقیاس زمانی و مکانی می‌تواند اثر متفاوتی در مقدار SDR کرت داشته باشند به این صورت که با افزایش مساحت کرت امکان بازتوزیع رسوب و رسوب‌گذاری از طریق تله‌اندازی رسوب بیشتر می‌شود اما با گذشت زمان فرصت انتقال ذرات رسوب و رسیدن به خروجی فراهم می‌شود (Khaledi Darvishan et al. 2021).

تلفات خاک اراضی دیم شیب‌دار، بسیار زیاد است (Nielsen, 2011) که پس از شخم و در شرایط آیش به‌شدت مستعد فرسایش می‌شوند و باتوجه‌به این‌که دیمزارها حدود نیمی از اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهند (Ahmadi et al. 2022)،

سطحی^۱ معادل میکرو توپوگرافی و پستی و بلندی‌های کوچک^۲ ذکر می‌شود (Zobeck and Onstad, 1987; Taconet and Ciarletti, 2007; Vermang et al. 2015; Da Rocha Junior et al. 2016; He et al. 2018).

بررسی تولید رواناب و نهشت رسوبات به کمک زبری سطحی خاک انجام می‌شود. به این صورت که رواناب با موانع و مقاومت بیشتری در اثر وجود زبری سطحی برای جاری شدن برخورد کرده و برای عبور از آن‌ها بخش عمده‌ای از انرژی خود را از دست داده و در نتیجه توانایی جابه‌جایی ذرات رسوب را ندارد (Zheng et al. 2012) و موجب تله انداختن رسوبات منتقل شده از برجستگی‌های حاصل از خاک‌ورزی در فرورفتگی‌های آن می‌شود. همچنین زبری بیشتر، می‌تواند باعث نفوذ بیشتر آب در خاک شود و در نتیجه مقدار رواناب و تلفات خاک کاهش یابد اما با ادامه بارندگی به دلیل ایجاد سله سطحی، این اثر کاهش می‌یابد و ممکن است حتی باعث افزایش فرسایش خاک شود (Ding and Huang, 2017). معمولاً بارندگی نیز در طول زمان و به‌ویژه طی وقایع پی‌درپی، موجب کاهش زبری سطحی خاک و تغییر در فراوانی طبقه‌های مختلف زبری (Vermang et al. 2015) و در نتیجه افزایش فرسایش و تلفات خاک می‌شود (Cogo et al. 1984). همچنین (Darboux et al. 2004) در مطالعه‌ای در پلات آزمایشگاهی نشان دادند که زمانی که رواناب به حالت پایدار برسد، با وجود فرورفتگی و برآمدگی‌ها می‌تواند رواناب را زیاد و غلظت رسوب را افزایش یا کاهش دهد.

اختلاف مدل رقومی ارتفاع قبل و بعد از بارش^۳ برای شناسایی مکان‌هایی که در اثر برداشت و نهشت، تغییر ارتفاع داشته‌اند و همچنین کمی کردن حجم خاک فرسایش یافته و یا رسوب‌گذاری شده کاربرد دارد (Bullard et al. 2018; Lu et al. 2019). ویژگی‌هایی خاک از قبیل بافت، سنگ‌داری، ظرفیت نفوذ و پایداری خاکدانه نیز در فرآیندهای رواناب، فرسایش جریان رسوبات دامنه مؤثر هستند و سرعت جریان و تحویل رسوب را کنترل می‌کنند. از این میان، بافت خاک از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که بر میزان نفوذ آب در خاک نیز مؤثر است (Morgan, 2005). بافت خاک نقش اساسی در حساسیت به جدا شدن و انتقال ذرات خاک توسط قطرات باران و رواناب دارد (Jourgholam and Labelle, 2020).

برای کمی کردن فرسایش خاک نیاز به اطلاعات جزئی در رابطه با توپوگرافی سطح خاک، متناسب با مقیاس مطالعه است (Balaguer-Puig et al. 2017). مشکلات اندازه‌گیری مستقیم

4 - Digital Elevation Model
5 - Standard Deviation of Elevation
6 - Sediment Delivery Ratio

1 - Surface Roughness
2 - Microrelief
3 - DOD (DEM of difference)

رطوبت ظرفیت زراعی با استفاده از دستگاه صفحه فشاری و تعیین درصد رطوبت خاک با اعمال مکش ۳۳ کیلوپاسکال (Reynolds et al. 2009) اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه سه نمونه خاک نشان می‌دهد بافت خاک در سرارود، گچساران و کوهین به ترتیب نسبتاً سنگین، متوسط و نسبتاً سبک است و میزان ماده آلی در کوهین بسیار کم و در دو نمونه خاک سرارود و گچساران متوسط و کم است. وجود درصد بالایی از سیلت و شن خیلی ریز به‌عنوان ذرات فرسایش پذیرتر نسبت به باقی ذرات خاک در سه خاک نیز از دیگر ویژگی‌های مهم این خاک‌ها است.

شبیه‌ساز باران مورد استفاده و آماده‌سازی بستر

به‌منظور شبیه‌سازی شخم، از فلوم آزمایشگاهی به طول ۵/۸ متر و عرض یک متر با شیب ۱۲ درصد تحت بارشی با شدت ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت (شکل ۱) در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده گردید (Arabkhedri et al., 2018). آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش در برجی به مساحت ۱۰۴/۵ مترمربع احداث شده است. ارتفاع این برج ۱۱/۸ متر از سطح زمین و ارتفاع نازل‌ها از فلوم ۷/۷۵ متر است. همچنین فلوم آن با ابعاد ۵/۸ متر طول و یک متر عرض قابلیت تغییر شیب تا ۶۰ درصد را دارد. در این شبیه‌ساز باران، امکان ایجاد شدت‌های مختلف بارش تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت وجود دارد (Arabkhedri et al., 2008).

در این پژوهش از شدت متوسط ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت به‌عنوان باران فرساینده (Refahi, 2016) و توانایی در تشکیل سریع‌تر شیار و جابه‌جایی ذرات خاک استفاده شد. علت تجربه‌های تحقیقات مبنی بر جاری نشدن رواناب در رویدادها با شدت ۳۳ و ۶۴ میلی‌متر بر ساعت (Arabkhedri et al. 2020) و ایجاد بیش از ۵۰ درصد تلفات خاک توسط رویدادهای استثنایی مانند بارش‌ها با شدت ۲ تا ۳ میلی‌متر در دقیقه (Arabkhedri, 2015) بود.

زیرسازی فلوم بر اساس روش (Arabkhedri et al. 2018) انجام و برای آماده‌سازی خاک داخل فلوم (روسازی) نیز، ابتدا یک‌لایه ۵ سانتی‌متری از خاک که از سرند ۱۵ میلی‌متری عبور داده شده بود، در سطح فلوم ریخته و تسطیح و کمی رطوبت در حدی که سطح خاک مرطوب شود، داده شد. این کار برای سه‌لایه ۵ سانتی‌متری دیگر از هر خاک تا رسیدن به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از خاک تکرار شد. سپس به خاک در حد اشباع شدن (۵۲، ۴۳ و ۳۸ درصد رطوبت به ترتیب در نمونه خاک‌های سرارود، کوهین و گچساران)، آب برای شکل‌گیری مجدد خاکدانه‌ها اضافه شد. همچنین نمونه جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر، برای

نقش مهمی بر خسارت برجا به‌ویژه کاهش عمق و حاصلخیزی خاک و آلوده کردن آب‌های جاری و رسوب‌گذاری مخازن نیز دارند. باتوجه به این‌که بیش از ۵۰ درصد تلفات خاک و تولید رسوب توسط رویدادهای شدید و استثنایی صورت می‌گیرد (Arabkhedri, 2015). همچنین بارش‌های شدید کوتاه‌مدت با شدت ۲ تا ۳ میلی‌متر در دقیقه در مناطق مختلف ایران گزارش شده است (نظیر ملکوتی و نوروزی به نقل از Arabkhedri, 2015)، ممکن است اراضی دیم شخم‌خورده تحت‌تأثیر این رویدادهای استثنایی، موجب تلفات خاک بسیار قابل‌توجه شوند. همچنین مشاهدات حاکی از شدت تغییر کاربری اراضی منابع طبیعی به‌ویژه مرتع و افزایش سطح دیمزارها است؛ بنابراین تحقیق حاضر ابتدا با هدف کمی کردن مقدار و محل برداشت و نهشت در سه خاک دیمزار با بافت‌های متفاوت با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی بالا انجام گرفت. سپس میکروتوپوگرافی‌های سطحی از طریق شاخص زبری کمی گردید و نهایتاً رابطه زبری با برداشت، نهشت و تلفات خاک، در فلوم آزمایشگاهی بررسی شد. در این تحقیق سعی گردید زبری پس از شخم در زمین تحت آیش در فلوم آزمایشگاهی شبیه‌سازی و ناهمواری‌های غیریکنواخت ایجاد شود. زیرا پژوهش‌های انجام شده در خاک شخم‌خورده اغلب به‌صورت کاملاً مصنوعی زبری-هایی که نشان‌دهنده شخم بوده است در سطح دامنه ایجاد کرده-اند (Da Rocha Junior et al., 2016; He et al., 2018)، اما کاملاً شبیه زمین زراعی در دامنه نبوده‌اند.

مواد و روش‌ها

منطقه، نمونه‌برداری از خاک و آنالیز نمونه‌ها

این پژوهش به شبیه‌سازی شخم در زمین‌های آیش دیمزارها در فلوم آزمایشگاهی پرداخته است. برای انجام شبیه‌سازی، از خاک سه منطقه دیمزار کوهین در استان قزوین، سرارود در استان کرمانشاه و گچساران در استان کهگیلویه و بویراحمد با بافت متفاوت مطابق جدول ۱ استفاده شد.

خاک‌های مورد آزمایش از لایه سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی-متری) دامنه به میزان ۱۰ تن به آزمایشگاه انتقال داده شد. در محل نمونه‌برداری خاک، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر (Blake and Hartge, 1986) و ساختمان خاک تعیین شد. بخشی از نمونه خاک پس از هوا خشک‌شدن از الک ۲ میلی‌متری برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک عبور داده شد. دانه‌بندی خاک به روش ترکیب سری الک‌ها و هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، ماده آلی به روش والکی-بلاک (Nelson and Sommers, 1996)، رطوبت اشباع به روش وزنی و

تحت دو بارش با شدت ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت با فاصله ۴ ساعت، قرار گرفتند (شکل ۱). در این پژوهش یکنواختی بارش شبیه‌ساز باران از طریق فرمول کریستینسن (Solomon, 1979) ۹۱ معادل درصد محاسبه شد.

اطمینان از رسیدن به شرایط خاک دامنه طبیعی گرفته شد (Arabkhedri et al. 2018). خاک‌ها در رطوبت ظرفیت زراعی ۲۵، ۳۳ و ۲۲ درصد به ترتیب در نمونه خاک‌های سرارود، گچساران و کوهین، با بیل به عمق ۱۵ سانتیمتر شخم زده شد و

جدول ۱- مختصات جغرافیایی مناطق و ویژگی نمونه خاک‌ها

گچساران - کهگیلویه و بویراحمد		کوهین - قزوین		سرارود - کرمانشاه		نمونه خاک ویژگی
عرض	طول	عرض	طول	عرض	طول	موقعیت جغرافیایی
۳۰°۱۷'۹"	۵۵°۵۴'۵۵"	۲۶°۲۲'۳۲"	۴۹°۳۵'۲۱"	۳۴°۱۹'۵۶"	۴۷°۱۷'۳۷"	
لوم	لوم	لوم سنی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی سیلتی	بافت	
۵۷	۵۰	۵۰	۶۱	۶۱	سیلت+ شن خیلی ریز (درصد)	
بدون ساختمان	دانه‌ای ریز	دانه‌ای ریز	دانه‌ای خیلی ریز	دانه‌ای خیلی ریز	ساختمان خاک	
۳۷	۲۲	۲۲	۶۳	۶۳	درصد سنگ‌ریزه (<۲ میلی‌متر)	
۱/۵۹	۰/۸۹	۰/۸۹	۱/۸۹	۱/۸۹	ماده آلی (درصد)	
۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۱	۱/۱	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	
۲۵	۲۲	۲۲	۳۳	۳۳	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد)	
۳۸	۴۳	۴۳	۵۲	۵۲	رطوبت اشباع (درصد)	



شکل ۱- الف: فلوم آزمایشگاهی، ب: شخم زدن فلوم به کمک بیل و پ: ریل عکس‌برداری در فلوم آزمایشگاهی.

در هر شبیه‌سازی بارش، رواناب حاوی رسوب و زهاب به طور مجزا جمع‌آوری شد. سپس حجم رواناب اندازه‌گیری و برای ۲۴ ساعت به حال خود رها گردید. در این مرحله آب زلال رویین تخلیه و رسوب ته‌نشین به طور کامل جمع‌آوری شد. رسوب جمع‌آوری شده بر اساس میزان رطوبت آن، طی چند روز هوا خشک شد. سپس در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و وزن خشک رسوب به‌عنوان تلفات خاک بر حسب گرم اندازه‌گیری گردید.

تهیه DEM

در فلوم آزمایشگاهی قبل و بعد از بارش، از سطح خاک شخم‌خورده به کمک دوربین Canon IXY 10S ۱۴ مگاپیکسلی عکس‌برداری در ارتفاع ۳۰ سانتیمتری از سطح خاک انجام و از حدود ۵۰۰ عدد عکس گرفته‌شده با ۸۰ درصد هم‌پوشانی در هر مرحله، برای تهیه مدل رقومی ارتفاع استفاده شد که در جدول ۲ مشخصات دوربین مورد استفاده در آزمایشگاه آورده شده است.

در اولین و دومین شبیه‌سازی، بارش تا برقراری جریان پیوسته رواناب به معنی مشارکت تمام سطح فلوم در جریان خروجی و ایجاد جریان شیری در کل سطح فلوم تا زمان رسیدن به شرایط پایدار رواناب همراه رسوب ادامه پیدا کرد. در این شبیه‌سازی، به‌جای زمان ثابت برای بارش، زمان ثابت برای جریان پیوسته که باتوجه به پژوهش‌های قبلی دو دقیقه در نظر گرفته شد. به این علت که بر اساس پژوهش قبلی روی این سه خاک (Arabkhedri et al. 2020)، زمان ثابت بارش در یک بارندگی مشابه ممکن است در یک خاک حتی یک قطره رواناب تولید نشود و در خاکی دیگر، رواناب از دقایق ابتدایی جریان باید. از طرفی دیگر رطوبت پیشین در دو بارش متوالی روی هر خاک یکسان نبود. همچنین در فلوم آزمایشگاهی، محدودیت جابه‌جایی ذرات وجود دارد و جریان رواناب انرژی لازم برای جابه‌جایی ذرات را ندارد و ممکن است نهشت رسوبات صورت گیرد (Boix-Fayos et al. 2006).

جدول ۲- ویژگی دوربین مورد استفاده در این آزمایش

مقدار	ویژگی	دوربین
6.16 x 4.62 mm	اندازه سنسور	Canon IXY
4330 x 3256	رزولوشن سنسور	
4 mm	طول فوکوس	

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن: X_i مقدار ارتفاع سلول i ام در پنجره متحرک (میلی متر) و X_m میانگین مقادیر ارتفاع سلول‌های مورد بررسی در پنجره متحرک (میلی متر) و N عدد سلول‌های بررسی شده DEM در پنجره متحرک ۵ در ۵ سلولی به اندازه پیکسل DEM مورد استفاده است. نقشه خروجی شاخص زبری و مدل رقومی ارتفاع به کمک نرم افزار Arc/GIS 10.7.1 تهیه گردید و زبری‌های محاسبه شده در فلوم آزمایشگاهی با نام‌های اختصاری R0 مربوط به قبل از بارش اول، R1 مربوط به بعد از بارش اول و R2 مربوط به بعد از بارش دوم، معرفی شدند.

پس از اندازه‌گیری‌های ذکر شده، برای مقایسه شبیه‌سازی شخم در فلوم با شخم در دامنه، لایه زبری در آزمایشگاه و دامنه با مدل رقومی ارتفاع با اندازه سلول برابر به کمک حداکثر، حداقل، متوسط، میانه و انحراف معیار زبری مقایسه شدند. همچنین برای انتخاب اندازه سلول مناسب برای مدل رقومی ارتفاع برای انجام محاسبات و بررسی‌ها در فلوم آزمایشگاهی اقدام به تولید مدل‌های رقومی ارتفاع در حالت R0 در اندازه‌های ۱، ۲، ۵، ۸ و ۱۲ میلی‌متر شد و برای هر DEM، متوسط ارتفاع و زبری با یکدیگر مقایسه و اندازه پیکسل مناسب انتخاب شد.

میزان تغییرات میانه زبری در حالت‌های R0، R1 و R2 نیز در سه خاک مقایسه شدند. همچنین زبری در فلوم طبقه‌بندی و از سه کلاس نرم^۶ ($1/2 <$ میلی‌متر)، متوسط^۷ ($1/2 - 3/8$ میلی‌متر) و زبر^۸ ($3/8 >$ میلی‌متر) استفاده شد (Wang and Lia, 2018) که کلاس‌ها بر اساس مقدار میانه زبری در حالت R0 در سه خاک مورد بررسی انتخاب شدند و روند تغییرات کلاس‌های زبری در طول رویداد R1 و R2 بررسی شدند.

شاخص تفاوت مدل رقومی ارتفاع (DOD)

در این پژوهش، برای شناسایی و تعیین مقدار مناطق برداشت و رسوب‌گذاری در طی دو بارش، از شاخص DOD که از تفاوت ارتفاع DEM‌های تولیدی از عکس‌های قبل و بعد از بارش حاصل می‌شود، استفاده شد (Balaguer-Puig et al. 2017). شاخص

برای عکس‌برداری، دوربین در راستای طول و عرض فلوم به کمک ریل حرکت و عکس‌برداری صورت گرفت (شکل ۱). همچنین برای مختصات‌دهی به عکس‌ها، از ۱۹ نقطه مرجع با مختصات مشخص که در دو سمت فلوم تعبیه شده بود، استفاده شد. عکس‌های تهیه شده در آزمایشگاه به کمک نرم‌افزار Agisoft phtoscan 1.5.5 به مدل رقومی ارتفاع تبدیل گردیدند.

برای تعیین صحت DEM در بعد ارتفاع (عمودی) و افقی در حالت اولیه R0 برای هر خاک، ۱۹ نقطه و خط در محل نقاط کنترل موجود در دیواره فلوم انتخاب شد. در فلوم آزمایشگاهی به کمک کولیس یکی از اضلاع نقاط کنترل اندازه‌گیری شد که این مقادیر مشاهده‌ای در نظر گرفته شد. اندازه همان اضلاع در مدل رقومی ارتفاع (برآوردی) نیز اندازه‌گیری شد. همچنین برای تعیین صحت ارتفاعی مقادیر ارتفاع اندازه‌گیری شده با دوربین نقشه-برداری با مقادیر ارتفاع مدل رقومی ارتفاع در محل نقاط کنترل بررسی شد. از آماره‌های RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)^۱، MAE (میانگین خطای مطلق)^۲، MBE (میانگین خطا)^۳ جهت تعیین خطا و R² (ضریب تعیین)^۴ برای بررسی میزان انطباق مشاهدات با مقادیر برآوردی، استفاده (رابطه‌های ۱ تا ۳) شد.

(رابطه ۱)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 / n}$$

(رابطه ۲)

$$MAE = \sum_{i=1}^n |[P_i - O_i]| / n$$

(رابطه ۳)

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$$

که در آن‌ها: P_i مقدار برآوردی برای سلول i ام، O_i مقدار مشاهده‌ای برای سلول i ام و n تعداد سلول‌ها است.

شاخص زبری تصادفی (RI) و بررسی تغییرات آن

در این پژوهش شاخص زبری تصادفی در فلوم آزمایشگاهی از طریق رابطه ۴ به کمک مدل رقومی زمین به صورت اولیه (اصلی) و متعادل شده^۵ محاسبه شد (Cavali et al. 2013). مدل رقومی ارتفاع متعادل شده، به این معنی است که در DEM اصلی، گودال‌ها پر شده و برآمدگی‌ها حذف شده است.

DOD به کمک رابطه ۵ محاسبه شد.

(رابطه ۵)

$$DOD_i = DEM_{i\text{ post}} - DEM_{i\text{ pre}}$$

که در آن DEM_{post} مدل رقومی ارتفاع بعد از بارش و DEM_{pre} مدل رقومی ارتفاع قبل از بارش هم اندازه مدل رقومی ارتفاع بعد از بارش و DOD_i اختلاف ارتفاع بعد و قبل بارش در سلول i ام (میلی متر) است که DOD برای هر دو بارش به تفکیک محاسبه شد. در نقشه اختلاف ارتفاع به دست آمده (DOD)، اگر ارتفاع پیکسل بعد از بارش نسبت به قبل از بارش کمتر شده باشد، در آن نقطه برداشت رخ داده است و اگر در نقطه ای افزایش ارتفاع مشاهده شود، رسوب گذاری روی داده است که برداشت و رسوب گذاری به ترتیب با مقادیر منفی و مثبت معرفی شده است. خروجی DOD به دست آمده به سه کلاس مقادیر منفی (برداشت)، صفر (بدون تغییر ارتفاع) و مثبت (رسوب گذاری) طبقه بندی و به کمک رابطه ۶، هر طبقه به وزن خاک برداشت و یا رسوب گذاری شده تبدیل شد.

$$M = A * \sum_{i=1}^N DOD_i * \rho_b \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن: M ، وزن خاک برداشت یا رسوب گذاری (گرم)، A ، مساحت هر پیکسل (میلی متر مربع)، DOD_i ، اختلاف ارتفاع بعد و قبل بارش در سلول i ام (میلی متر)، N ، تعداد پیکسل و ρ_b ، جرم مخصوص ظاهری خاک پس از بارش (گرم بر سانتی متر مکعب) است.

باتوجه به این که سطح خاک های موجود در این پژوهش شخم خورده هستند، در ابتدای بارش اول، کاهش حجم خاک و افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شخم خورده صورت می گیرد. برای حذف اثر کاهش حجم خاک شخم خورده بر خروجی نقشه DOD از نسبت جرم مخصوص ظاهری بعد از بارش به قبل از بارش استفاده که این نسبت در ارتفاع اولیه خاک (۲۰ سانتی متر) ضرب و مقدار به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع قبل از بارش اول کسر شد و از مدل رقومی به دست آمده برای محاسبه DOD استفاده شد. همچنین در منابع (Wheaton et al. 2010; Balaguer-Puig et al. 2017; Wang and Lia, 2018) در محاسبه صحیح تر مقادیر برداشت و رسوب گذاری، میزان خطای مدل های رقومی ارتفاع را از اختلاف ارتفاع نهایی (DOD) کسر می کنند (\pm) خطای مدل رقومی ارتفاع) که معادله آن در فرمول ۷ آورده شده است.

$$E_{DOD} = \sqrt{(E_{DEM\text{ post}})^2 + (E_{DEM\text{ pre}})^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن E_{DOD} ، خطای تفاوت مدل های رقومی ارتفاع

(DOD)، $E_{DEM\text{ post}}$ و $E_{DEM\text{ pre}}$ خطای مدل های رقومی ارتفاع قبل و بعد از بارش است.

پس از تعیین میزان خاک برداشت شده، اقدام به محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR) از طریق معادله ۸ شد.

$$SDR = \frac{\text{Soil loss}}{\text{Erosion}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که Soil loss، تلفات خاک (گرم)، و Erosion، میزان فرسایش خاک (گرم) است (Zhang et al. 2015). پس از انجام محاسبات ذکر شده، در یک گراف اقدام به جداسازی سهم برداشت، تلفات خاک و نسبت تحویل رسوب در سطح فلوم شد و بررسی روند میانه زبری در دو رویداد بارشی R1 و R2 در سه خاک مورد پژوهش با تلفات خاک، خاک برداشت و نهشت شده انجام گردید.

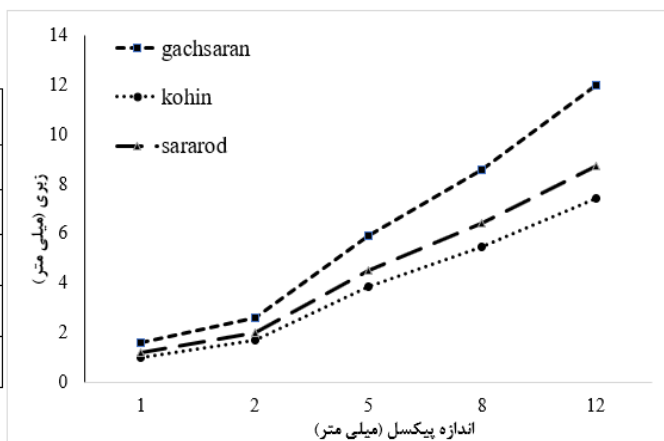
نتایج و بحث

تعیین اندازه پیکسل مناسب و تعیین صحت مدل های رقومی ارتفاع

برای انتخاب اندازه پیکسل مناسب، پنج مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسل های مختلف تهیه و متوسط ارتفاع و زبری آن ها در شکل ۲ برای سه نمونه خاک نشان داده شده است. نمودار نشان می دهد با افزایش اندازه پیکسل از یک به دو میلی متر در سه خاک کوهین، سرارود و گچساران، تغییر متوسط ارتفاع نسبت به دیگر اندازه پیکسل ها در حدود ۸/۴ درصد است. زبری سطحی نیز به ترتیب ۶۵/۹، ۶۶/۹ و ۶۴/۴ درصد افزایش یافته است اما در اندازه پیکسل سایزهای ۵، ۸ و ۱۲ میلی متری، تغییرات ارتفاع و زبری قابل ملاحظه است. در نتیجه اندازه پیکسل ۲ میلی متری انتخاب شد که علاوه بر از دست رفتن اطلاعات، سرعت پردازش نیز افزایش یابد. نتایج تحقیقات مختلف در سطح فلوم، دامنه و حوضه (Balaguer-Puig et al., 2017; Mondal et al. 2017; Lu et al., 2019) نیز نشان از کاهش صحت و افزایش تغییرات ارتفاع DEM در اثر افزایش اندازه پیکسل مدل رقومی ارتفاع دارد. همچنین برای تشریح دقیق توپوگرافی سطح خاک و چگونگی تغییر آن در طی فرآیندهای فرسایش در فلوم ضروری است که در مقیاس میلی متر (Balaguer-Puig et al., 2017) بررسی ها انجام شود. اغلب مطالعات انجام شده در فلوم بسته به هدف بررسی عوارض جزئی، امکانات عکس برداری، صحت نسبی عمودی (ارتفاعی) و افقی (پیکسل سایز) زیر ۲ میلی متر (Balaguer-Puig et al., 2017; Wang and Lia, 2018) را پیشنهاد داده اند.

میانگین ارتفاع در مدل رقومی ارتفاع (میلیمتر)

Pixel size (mm)	Kouheen	Sararud	Gachsaran
1	120.9	523.9	1220.6
2	120.9	523.9	1220.6
5	319.1	916.2	559.2
8	674.7	1150.6	1179.9
12	624.3	790.5	761.2



شکل ۲- مقادیر میانگین ارتفاع (میلی متر) (شکل چپ) و زبری (میلی متر) (شکل راست) در حالت R0 با اندازه پیکسل های مختلف

دوربین دیجیتالی مورداستفاده و در مقایسه با نتایج تحقیقات ذکر شده مقدار خطای DEM های نمونه خاکها قابل قبول است.

نتایج شبیه سازی باران و فرسایش

نتایج تلفات خاک طی دو بارش انجام شده بر روی نمونه خاکهای مورد آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است. نتیجه شبیه سازی باران در نمونه خاک کوهین نشان داد دو دقیقه پس از مشاهده جریان پیوسته که در بارش اول پس از ۲۹ دقیقه و در بارش دوم پس از ۱۴ دقیقه رخ داد، بارش متوقف شد. طی این مدت، میزان تلفات خاک دو رویداد به ترتیب ۳۴۶۵ و ۲۴۶۴ گرم و غلظت متوسط جریان ۴۵ و ۲۴ گرم در لیتر به دست آمد. درحالی که نمونه خاک سرارود در دقیقه ۴۷ در بارش اول و دقیقه ۲۰ در بارش دوم، جریان پیوسته مشاهده شد و میزان تلفات خاک در R1 و R2 به ترتیب ۲۶۷۹ و ۲۱۰۵ گرم اندازه گیری شد. علت طولانی شدن مشاهده جریان پیوسته در خاک سرارود به دلیل ساختمان دانه ای و ماده آلی زیاد (۱/۸۹ درصد) در این خاک است که موجب افزایش پایداری ساختمان و نفوذپذیری آب در خاک شده است. نمونه خاک گچساران نیز از نظر مشاهده جریان پیوسته رفتاری نزدیک به خاک کوهین داشت اما میزان تلفات خاک نسبت به هر دو خاک کوهین و سرارود بیشتر، و در دو رویداد به ترتیب ۴۷۹۶ و ۳۹۰۹ گرم تعیین شد. علت می تواند عدم وجود ساختمان و مقدار ۵۷ درصد مجموع سیلت و شن خیلی ریز باشد. در این راستا Arabkhedri et al. (2020) نیز با پژوهش بر روی سه خاک مطالعه شده در این تحقیق بیان کردند که خاک گچساران نسبت به دیگر خاکها بسیار فرسایش پذیر بوده است و مقدار تلفات خاک در رویداد استثنایی با شدت ۱۱۰ میلی متر بر ساعت به ترتیب ۲/۴ و ۱/۸ برابر خاکهای کوهین و سرارود بوده است.

در بارش اول با وجود مدت زمان طولانی تری از بارش، حجم رواناب در سه خاک مورد بررسی کمتر از بارش دوم است که علت

جدول ۳- تعیین خطای DEM ۲ میلی متری در حالت R0 برای ۱۹ نقطه و خط

منطقه	آماره	ارتفاعی	عرضی
کوهین	RMSE (mm)	۴/۱	۱/۱
	MAE (mm)	۰/۰۲	۱/۲۶
	R ²	۰/۹۷	۰/۶۶
سرارود	RMSE (mm)	۳/۷	۰/۶
	MAE (mm)	۰/۰۱	۳/۷
	R ²	۰/۹۸	۰/۷۸
گچساران	RMSE (mm)	۵/۲	۰/۶
	MAE (mm)	۰/۰۳	۴/۰۳
	R ²	۰/۹۵	۰/۷۶

تعیین صحت مدل رقومی ارتفاع در سه خاک، در حالت R0 برای ۱۹ نقطه و خط بر روی نقاط کنترل موجود در دیواره های فلوم (جدول ۳) محاسبه شد. نتایج نشان می دهد در بعد ارتفاع، خطای RMSE برای DEM نمونه خاک کوهین، سرارود و گچساران به ترتیب ۴/۱، ۳/۷ و ۵/۲ میلی متر و در بعد افقی ۱/۱، ۰/۶ و ۰/۶ میلی متر است. حداکثر و حداقل آماره MAE در بعد ارتفاع در نمونه خاک گچساران (۰/۰۳ میلی متر) و سرارود (۰/۰۱ میلی متر) و در بعد افقی در نمونه خاک گچساران یا مقدار ۴/۰۳ و کوهین ۱/۲۶ میلی متر بوده است. همچنین ضریب تعیین (R²) بین مقادیر مشاهده ای و برآوردی در نمونه خاک سرارود در بعد ارتفاع و افقی بالاترین مقدار و به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۷۸ است. آماره های RMSE و MAE هر چه به صفر و R² به یک نزدیک تر باشند، نشان دهنده کمترین اختلاف با DEM با اندازه های واقعی است. Lu et al. (2019) در تعیین خطای DEM تولیدی به کمک لیزر اسکنر در دامنه، RMSE ۳/۵۱ میلی متر و Rieke-Zapp and Nearing (2005) در مطالعه آزمایشگاهی فرسایش خاک با دوربین دیجیتالی، RMSE ۱ میلی متر را گزارش کرده اند. مقدار خطای DEM تولیدی بسته به ابزار مورداستفاده، صحت مورد نیاز و مقیاس مورد بررسی متفاوت است. در این پژوهش باتوجه به

قبل از بارش اول در حد رطوبت زراعی و قبل از بارش دوم رطوبت خاک نزدیک به اشباع بوده است.

می تواند تشکیل سله و رطوبت اولیه بالاتر خاک در آزمایش دوم باشد. مقدار رطوبت خاک اندازه گیری شده در سه نمونه خاک،

جدول ۴- نتایج محاسبه تلفات خاک در طی بارش اول و دوم در نمونه خاک های مورد آزمایش

گچساران		سرارود		کوهین		ویژگی
R2	R1	R2	R1	R2	R1	
۱۰۰۰۵	۲۰۰۰۰	۲۰:۳۰	۴۷:۰۵	۱۴:۲۵	۲۸:۵۱	مدت زمان بارش (ثانیه: دقیقه)
۱۰۶	۲۱۰/۹	۲۱۴/۱	۴۹۶/۱	۱۵۰/۳	۳۰۰/۶	حجم بارش (لیتر)
۳۹۰۹	۴۷۹۶	۲۱۰۵	۲۶۷۹	۲۴۶۴	۳۴۶۵	تلفات خاک (گرم)
۴۰/۹	۲۶/۳	۶۱/۵	۲۶/۶	۱۰۳/۷	۷۷/۵	حجم رواناب (لیتر)
۹۶	۱۸۲	۳۴	۱۰۱	۲۴	۴۵	غلظت متوسط (گرم در لیتر)
۳۸/۷	۴۸/۶	۷۷/۳	۱۹۳/۳	۳۹/۲	۱۸/۹	حجم زهاب (لیتر)
۲۶/۴	۱۳۶	۷۵/۳	۲۷۶/۲	۷/۴	۲۰۴/۲	حجم نگهداشت آب در خاک (لیتر)

طبقه بندی زبری تصادفی در فلوم در سه نمونه خاک کوهین، سرارود و گچساران (جدول ۵) نیز نشان می دهد که طبقه زبری نرم (Smooth) و زبر (Rough) در سه حالت R0، R1 و R2 بیشترین و کمترین فراوانی را دارند. طی دو رویداد درصد فراوانی طبقه نرم افزایش و طبقه متوسط (Medium) و زبر (Rough) کاهش یافته است که این روند در سه خاک یکسان است. این نتایج با اندازه پیکسل ۲ میلی متری است که در صورت افزایش اندازه پیکسل، به علت افزایش اختلاف ارتفاع درصد فراوانی کلاس (Smooth) و (Medium) کاهش و درصد فراوانی کلاس (Rough) افزایش می یابد. در مجموع تغییرات درصد سهم طبقات نشان از تبدیل انواع کلاس های زبری به زبری نرم (Smooth) است که در اثر مجموع فرایندهای نهشت و برداشت است. نتایج تحقیقات Vermang et al. (2015) نشان داد زبری در چهار طبقه مورد بررسی کاهش یافته است. طبقه زبری بسیار زبر و زبر بیشترین فراوانی را داشته اند و بیشترین کاهش زبری مربوط به طبقه نرم بوده است که با یافته های این تحقیق همخوان نیست. یکی از دلایل یکسان نبودن محدوده های طبقات و یکسان نبودن زبری سطحی قبل از بارش و یکسان نبودن اندازه پیکسل بوده است.

بررسی تغییرات زبری در فلوم و طبقه بندی آن

میان زبری تصادفی در کل فلوم در سه حالت R0، R1 و R2 در سه خاک در جدول ۵ آورده شده است. به علت نرمال نبودن توزیع زبری در فلوم آزمایشگاهی در حالت بعد از شخم، میان که مشخصه مورد اعتمادتری برای مقایسه ویژگی های غیر نرمال است، آورده شد. مقادیر زبری در سه خاک نشان می دهد که میان زبری سطحی خاک پس از بارش اول و دوم نسبت به حالت اولیه R0 در خاک کوهین، سرارود و گچساران به طور متوسط به ترتیب حدود ۴۴، ۴۶ و ۲۷ درصد کاهش یافته است. با مقایسه زبری در حالت R1 و R2، تغییرات میان زبری در این دو حالت دیده می شود اما درصد کاهش آن در مقایسه با R0 کمتر و سطح به ثبات نسبی رسیده است. علت کاهش زبری در سه نمونه خاک، فروپاشی کلوخه ها و خاکدانه های خاک به خاکدانه های کوچک تر و حتی ذرات اولیه خاک تحت تأثیر قطرات باران و رواناب است. با ادامه بارش، جریان متمرکز ایجاد شده و موجب جابه جایی ذرات جدا شده می شود. در این راستا Da Rocha Junior et al. (2016) و Cogo et al. (1984) نیز کاهش زبری در اثر بارش را گزارش کرده اند.

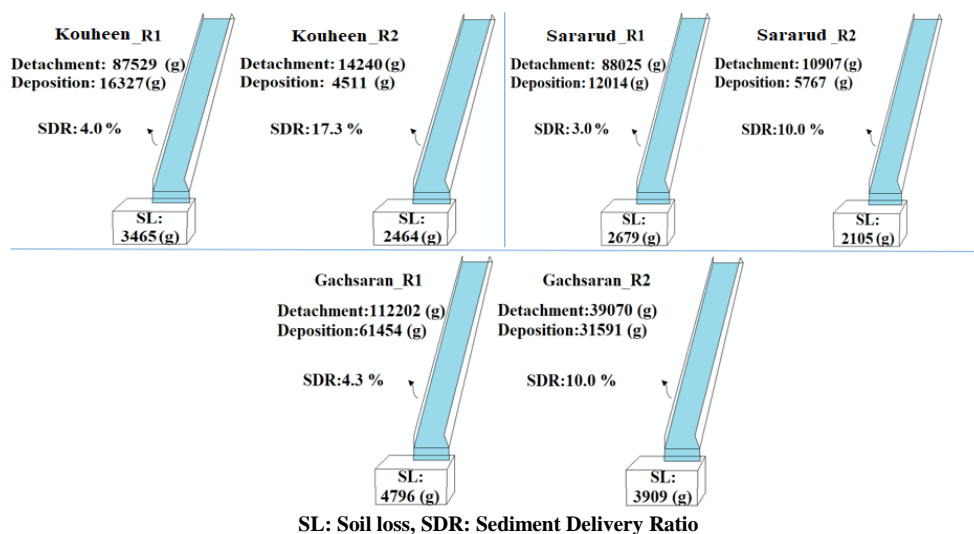
جدول ۵- میان اندازه زبری (میلی متر) و تغییرات درصد سهم هر کلاس زبری در سه حالت R0، R1 و R2

منطقه	میان (میلی متر)			کلاس (میلی متر)	درصد		
	R0	R1	R2		R0	R1	R2
کوهین	۱/۳	۰/۷۵	۰/۷۱	Smooth	۵۱/۰	۷۸/۰	۷۹/۰
				Medium	۴۲/۰	۲۰/۳	۱۹/۲
				Rough	۷/۰	۱/۷	۱/۸
سرارود	۱/۲	۰/۶۷	۰/۶۳	Smooth	۴۴/۰	۷۳/۵	۷۵/۱
				Medium	۴۷/۲	۲۴/۳	۲۲/۸
				Rough	۸/۸	۲/۲	۲/۱
گچساران	۱/۲	۰/۸۸	۰/۸۷	Smooth	۴۹/۰	۶۳/۵	۶۴/۴
				Medium	۳۶/۶	۲۹/۴	۲۸/۹
				Rough	۱۴/۴	۷/۲	۶/۷

۵۷۶۷ گرم است که باتوجه به طولانی تر بودن زمان آزمایش، میزان برداشت و رسوب گذاری در دو رویداد به مقادیر کوهین نزدیک است. اما در خاک گچساران با وجود کوتاه بودن زمان بارش در دو رویداد نسبت به دو خاک دیگر، میزان برداشت و رسوب گذاری بسیار بیشتر و در بارش اول به ترتیب ۱۱۲۰۲ و ۶۱۴۵۴ گرم و در بارش دوم ۳۹۰۷۰ و ۳۱۵۹۱ گرم بوده است که علت عدم وجود ساختمان و وجود مقادیر زیادی از ذرات فرسایش پذیر سیلت و شن خیلی ریز است.

نتایج تعیین سهم برداشت، رسوب گذاری و نسبت تحویل رسوب در سطح فلوم

نتایج بررسی نقشه های DOD (تفاوت DEM بعد و قبل بارش) سه نمونه خاک و تعیین سهم برداشت و رسوب گذاری در سطح فلوم برای هر خاک و دو رویداد در شکل ۳ آمده است. در خاک کوهین میزان برداشت و رسوب گذاری در بارش اول به ترتیب ۸۷۵۲۹ و ۱۶۳۲۷ گرم و در بارش دوم ۱۴۲۴۰ و ۴۵۱۱ گرم است. در خاک سرارود نیز میزان برداشت و رسوب گذاری به ترتیب در بارش اول ۸۸۰۲۵ و ۱۲۰۱۴ گرم و در بارش دوم ۱۰۹۰۷ و



شکل ۳- سهم برداشت، رسوب گذاری، باز توزیع رسوب و SDR در دو رویداد R1 و R2 در سه نمونه خاک

یا ذرات درشت تر به انتقال مقاومت نشان داده و در پشت بلندی های کوچک و یا حتی در مسیر آبراهه نهشت داشته اند. نهشت در بارش اول و دوم در نقاطی رخ داده است که حجم زیادی از رسوبات در قسمتی جمع شده و برآمدگی ایجاد کرده است. همچنین در بارش دوم نیز می توان به نقش اندوده سطحی^۱ نیز اشاره کرد که طی بارش اول با ایجاد لایه ای نفوذناپذیر اما با ضخامت کم، علاوه بر افزایش حجم رواناب، مقاومتی در جداسدن ذرات طی بارش دوم داشته اند. در مجموع باتوجه به شکل ۳ حاصل از طبقه بندی نقشه های DOD در سه خاک کوهین، سرارود و گچساران، در بارش اول و دوم سهم برداشت بسیار بیشتر از نهشت است که همه این نتایج نشان از تغییر زبری حاصل از بارش های پی در پی دارد و عامل باران موجب برداشت و جابه جایی ذرات شده است. (Balaguer-Puig et al. (2017) بیان کردند که در ۵ دقیقه بارش با شدت ۳۰ میلی متر بر ساعت در خاک بدون شخم در یک پلات ۰/۵ مترمربعی، میزان برداشت و نهشت به ترتیب ۱۰۱۵ و

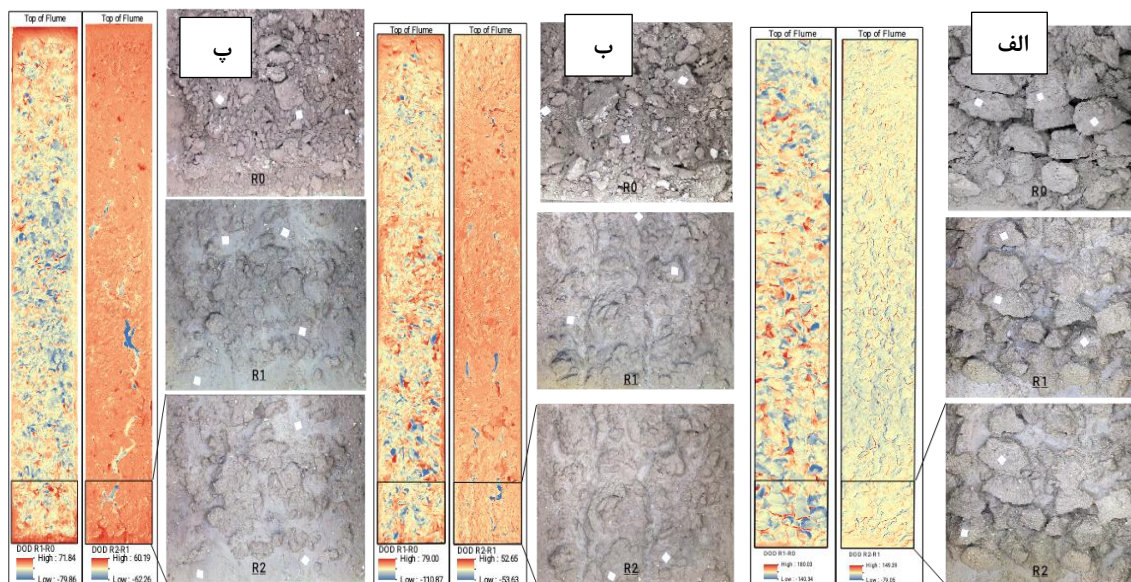
مقایسه مقادیر برداشت در سه خاک و دو رویداد نشان می دهد، این مقادیر نسبت به رسوب گذاری در رویداد اول بسیار بیشتر از رویداد دوم است. علت می تواند طولانی تر بودن زمان آزمایش اول و برخورد قطرات باران به کلوخه های ایجاد شده حاصل از شخم باشد. همچنین فراهم شدن ذرات قابل انتقال برای جابه جایی توسط قطرات باران و رواناب را نیز می توان ذکر کرد. کلوخه های حاصل از شخم نیز در اثر برخورد قطرات باران از هم پاشیده و باعث پر شدن فرورفتگی ها و فرونشست برآمدگی ها در سطح فلوم شد. در مجموع سطح فلوم در بارش اول به سمت مسطح شدن پیش رفته و جابه جایی صورت گرفته است. بارش دوم نیز با افزایش حجم رواناب، همچنان حجم برداشت نسبت به رسوب گذاری بیشتر است و باز هم زبری سطحی موجود در فلوم باعث در دسترس قرار دادن ذرات برای برداشت و انتقال ذرات فرسایش یافته شده است. اما مقدار برداشت بارش دوم نسبت به بارش اول کمتر است زیرا ذرات آماده برای انتقال وجود نداشته و

جرم مخصوص ظاهری خاک شخم‌خورده صورت می‌گیرد. این مقدار از DEM قبل از بارش اول کاسته شد اما مقادیر برداشت، نهشت و SDR در بارش اول و دوم نشان می‌دهد ابهامی در این رابطه هنوز وجود دارد.

شکل ۴ نقشه DOD فلوم آزمایشگاهی برای بارش اول و دوم به همراه تصویر اوتوموزائیک از انتهای فلوم را در سه حالت R0، R1 و R2 در خاک‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مذکور مشخص شد که در انتهای فلوم کانال‌هایی از جریان متمرکز نیز ایجاد شده‌اند و زبری به سمت نرم شدن پیش رفته است. در تصاویر اورتوموزائیک خاک گچساران نیز مشاهده می‌شود که سطح کمتر مسطح شده که به علت زیاد بودن زبری اولیه است. نتایج میانه زبری نمونه خاک گچساران نشان داد که زبری در بارش اول و دوم نسبت به دو خاک دیگر کمتر کاهش یافته است که می‌توان به وجود مقدار بالای سنگ و سنگ‌ریزه در خاک اشاره کرد. (Morgan 2005) نیز بیان کرد در مقیاس پلات، قطعات سنگ در صورتی که که بین آن‌ها اندوده سطحی تشکیل شده باشد، می‌تواند نرخ فرسایش را در مقایسه با زمین بدون پوشش افزایش دهد.

۲۹۲ سانتیمتر مکعب بوده است و نهشت اغلب در انتهای پلات و برداشت در بالادست پلات رخ داده است.

همچنین مقدار SDR محاسبه شده در دو رویداد R1 و R2 در سه نمونه خاک نشان می‌دهد، مقدار SDR در خاک کوهین، سرارود و گچساران در R2 به ترتیب ۴/۴، ۶/۳ و ۲/۳ برابر بیشتر از R1 شده است. در بارش اول به علت بازتوزیع رسوب و با وجود زبری حاصل از شخم، بخش کمی از برداشت به انتهای فلوم رسیده و به صورت تلفات خاک به دست آمد و در نتیجه مقدار SDR کم است. در بارش دوم باتوجه به مسطح شدن سطح خاک بخش بیشتری از خاک فرسایش یافته به انتهای فلوم رسیده و میزان SDR افزایش یافته است. Khaledi Darvishan et al. (2021) نیز بیان کردند که نسبت تحویل رسوب در مقیاس کرت (۶ مترمربع) به علت تله‌اندازی رسوب قبل از رسیدن به خروجی، کوچک و در شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت معادل ۱۵/۶ درصد است و نسبت بازتوزیع رسوب در کرت با افزایش شدت بارندگی کاهش یافته است. در این پژوهش زبری حاصل از شخم باعث تله انداختن رسوب شده است اما در تحقیق Khaledi Darvishan et al. (2021) سطح خاک صاف و تقریباً بدون زبری بوده است. در این پژوهش در ابتدای بارش اول، کاهش حجم خاک و افزایش



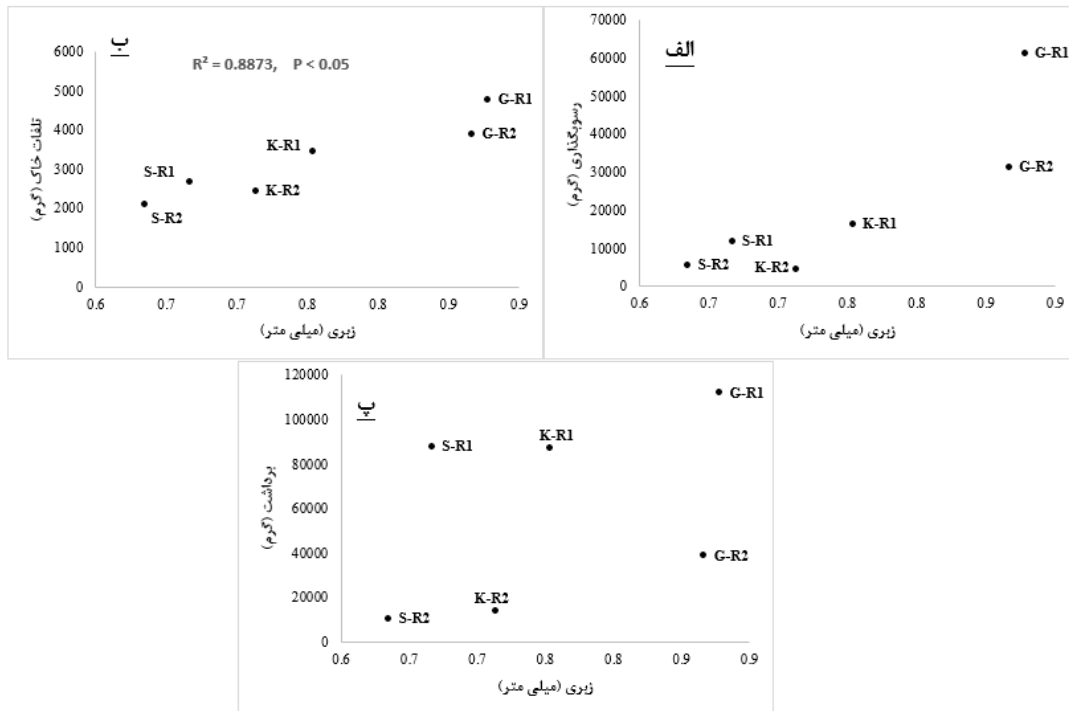
شکل ۴- نقشه DOD فلوم آزمایشگاهی برای بارش اول (R1-R0) و دوم (R2-R1) به همراه تصویر اوتوموزائیک از انتهای فلوم در سه حالت R0، R1 و R2 در سرارود (الف)، خاک کوهین (ب) و گچساران (پ)

نهشت و میانه زبری روندی مشاهده می‌شود اما رابطه قوی بین برداشت با زبری مشاهده نمی‌شود. (Ding and Huang 2017) بیان کردند که زبری بیشتر، می‌تواند باعث نفوذ بیشتر آب در خاک شود و در نتیجه مقدار رواناب و تلفات خاک کاهش یابد اما با ادامه بارندگی به دلیل ایجاد سله سطحی، این اثر کاهش می‌یابد و ممکن است حتی باعث افزایش فرسایش خاک شود. همچنین

نتایج بررسی روند زبری با تلفات خاک، برداشت و رسوب‌گذاری بررسی روند میانه زبری و تلفات خاک، برداشت و رسوب‌گذاری در دو رویداد R1 و R2 در سه خاک مورد بررسی (شکل ۵) نشان می‌دهد تنها بین تلفات خاک با زبری سطح خاک رابطه معنی‌دار در سطح ۵ درصد و قابل‌قبولی وجود دارد. همچنین بین داده‌های

زبری بیشتر، تلفات خاک نیز افزایش یافته است. از سوی دیگر زبری تنها یکی از عوامل اثرگذار بر میزان تلفات خاک است. عامل مهم دیگر فرسایش پذیری ذاتی خاکها است که خود تابع ویژگی هایی از توزیع اندازه ذرات، پایداری خاکدانه و میزان آلی است.

(2004) Darboux et al. در مطالعاتی در پلات آزمایشگاهی نشان دادند که زمانی که رواناب به حالت پایدار برسد، با وجود فرورفتگی و برآمدگی ها می تواند رواناب را زیاد و غلظت رسوب را افزایش یا کاهش دهد. در این پژوهش نیز می توان این اثر را مشاهده کرد. به گونه ای که در شکل ۵-ب مشاهده می شود، با وجود مقادیر



شکل ۵- بررسی روند زبری و رسوب گذاری (الف)، تلفات خاک (ب) و برداشت (پ) در دو رویداد R1 و R2 در سه خاک مورد بررسی

ظاهری خاک افزایش می یابد. این مقدار کاهش حجم در DEM قبل از بارش اول لحاظ شد اما مقادیر برداشت، نهشت و SDR در دو بارش نشان می دهد، هنوز ابهامی در این رابطه وجود دارد. همچنین نتایج نشان می دهد بین تلفات خاک با زبری سطح خاک رابطه معنی دار و مستقیم در سطح ۵ درصد وجود دارد. باتوجه به نتایج به دست آمده می توان با تهیه DEM قبل و بعد از بارش و رفع عدم قطعیت ها، مقادیر مطمئن از برداشت، نهشت و SDR را به دست آورد. همچنین با داشتن مقدار زبری سطحی خاک می توان به میزان تلفات خاک پی برد. بدین ترتیب با داشتن DEM از دامنه ها در قبل و بعد رویدادها در مناطق با تغییرات بالای ناشی از فعالیت های انسانی مانند شخم اراضی دیم نیز می توان به مقادیر برداشت و نهشت و تلفات خاک نیز دست یافت. یکی از محدودیت های این پژوهش وجود عدم قطعیت در DEM که از خاک شخم خورده به دست می آید، است که با تعیین میزان عدم قطعیت می توان به نتایج مطمئن تری دست یافت. پیشنهاد می شود در سطح دامنه شخم خورده بدون پوشش و تحت بارش طبیعی ارزیابی مقادیر برداشت، نهشت، SDR و انجام و رابطه

نتیجه گیری

در این پژوهش ارتباط بین ضریب زبری با میزان برداشت و رسوب گذاری در خاک شخم خورده با شبیه سازی باران در فلوم آزمایشگاهی بررسی شد. از میان سه نمونه خاک شبیه سازی شده (مناطق کوهین، سرارود و گچساران)، حداکثر و حداقل تلفات خاک به ترتیب در نمونه های خاک گچساران و سرارود مشاهده شد. بررسی نتایج درصد طبقه های زبری تصادفی در کل فلوم نیز نشان از تبدیل انواع کلاس های زبری به زبری نرم (Smooth) است که ناشی از اثر مجموع فرایندهای نهشت و برداشت است. مقایسه مقادیر برداشت در سه خاک و دو رویداد نشان می دهد، این مقادیر نسبت به رسوب گذاری در رویداد اول بسیار بیشتر از رویداد دوم است. همچنین در هر بارش بخش کمی از برداشت به انتهای فلوم رسیده و به صورت تلفات خاک خارج می شود و در نتیجه مقدار SDR محاسبه شده کم است. در بارش دوم باتوجه به مسطح شدن سطح خاک بخش بیشتری از خاک فرسایش یافته به انتهای فلوم رسیده و میزان SDR افزایش یافته است. در این پژوهش در ابتدای بارش اول، حجم خاک شخم خورده کاهش و جرم مخصوص

زبری سطحی با تلفات خاک تعیین شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R. Hatami, F. Mohammadnia Afrozi, S. Esfandiyaripour, E. and Abas Taghani, R. (2022). Agricultural statistics. Vol. 1: Crops. Information and Communication Technology Center of the Ministry of Agriculture-Jahad.
- Arabkhedri, M. (2015). The possibility of estimation of long-term average annual erosion based on measurements of erosion from a few rainfall events. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 7-15. (In Farsi)
- Arabkhedri, M., Gerami, Z. Shadfar, S. Bayat, R. Parvizi, Y. and Nabipay Lashkarian, S. (2020). Comparing the performance of several erodibility indices' equations of USLE model at laboratory condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7), 1725-1736 15. (In Farsi)
- Arabkhedri, M., Mahmoodabadi, M. Rouhipour, H. Heydariyan, A. Lotf-Allahzade, D. Rahimzade, H. and Amiri, N. (2008). Study on rain characteristics and calibration of rainfall simulator of Soil Conservation and Watershed Management Research Center. *Final Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. (In Farsi)
- Arabkhedri, M., Mahmoodabadi, M. Taghizadeh, Sh. and Zoratipour, A. (2018). Causes of severe erosion in a clayey soil under rainfall and inflow simulation. *ECOPERSIA*, 6(4), 225-233.
- Balaguer-Puig, M., Marqués-Mateu, A. LuisLerma, J. and Ibáñez-Asensio, S. (2017). Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with structure from motion photogrammetry. *Geomorphology*, 295, 285-296.
- Bertuzzi, P., Rauws, G. and Courault, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 17, 87-99.
- Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986). *Bulk density*. p. 363-382. In A., Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods, 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M. Arnau-Rosalén, E. Calvo-Cases, A. Castillo, V. and Albaladejo, J. (2006). Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 78, 267-285.
- Bullard, J. E., Ockelford, A. Strong, C. L. and Aubault, H. (2018). Impact of multi-day rainfall events on surface roughness and physical crusting of very fine soils. *Geoderma*, 313, 181-192.
- Cago, N. P., Moldenhauer, W. C. and Foster, G. R. (1984). Soil loss reductions from conservation tillage practices I. *Soil Science Society of America Journal*, 48(2), 368.
- Cavalli, M., Trevisani, S. Comiti, F. and Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41.
- Chaplot, V. and Poesen, J. (2012). Sediment, soil organic carbon and runoff delivery at various spatial scales. *CATENA*, 88(1), 46-56.
- Da Rocha Junior, P. R., Bhattarai, R. Alves Fernandes, R. B. Kalita, P. K. and Vaz Andrade, F. (2016). Soil surface roughness under tillage practices and its consequences for water and sediment losses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(4), 1065-1074.
- Darboux, F., Reichert, J. M. and Huang, C. (2004). Soil roughness effects on runoff and sediment production. *13th International Soil Conservation Organisation Conference*, Brisbane, July.
- Ding, W. and Huang, C. (2017). Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. *Geomorphology*, 295, 801-810.
- Favey, E., Geiger, A. Gudmundsson, G. H. and Wehr, A. (2003). Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 81(4), 555-561.
- Gee G. W. and Bauder, J. W. (1986). *Particle size analysis hydrometer methods*. In: D.L. Sparks et al. (Eds). *Method of Soil Analysis*. part 1. pp: 383-411. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison. WI. USA.
- Govers, G., Merckx, R. Wesemael, B. and Oost, K. V. (2017). Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL*, 3, 45-59.
- Hadi Pour, S., Khairi Abd Wahab, A. and Shahid, Sh. 2020. Spatiotemporal changes in aridity and the shift of drylands in Iran. *Atmospheric Research*, 233.
- Hamed, Y., Albergel, J. Pepin, Y. Asseline, J. Nasri, S. Zante, P. Berndtsson, R. Niazzy, M. and Balah, M. (2002). Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena*, 50:1-160.
- He, S., Qin, F. Zheng, Z. and Li, T. (2018). Changes of soil microrelief and its effect on soil erosion under different rainfall patterns in a laboratory experiment. *CATENA*, 162, 203-215.
- Hohle, J. (2009). DEM generation using a digital large format frame camera. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(1), 87-93.
- Houben, P. (2008). Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany. *Geomorphology*, 101, 172-191.



- Jester, W. and Klik, A. (2005). Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation. *Catena*, 64(2-3), 174–192.
- Jourgholami, M. and Labelle, E. R. (2020). Effects of plot length and soil texture on runoff and sediment yield occurring on machine-trafficked soils in a mixed deciduous forest. *Annals of Forest Science*, 77, 19.
- Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S. H. R. Homaei, M. and Arabkhedri, M. (2021). Sediment Budgeting in Laboratory Plots under Rainfall Simulation. *Watershed Management Research*, 34(2), 15-3115 (In Farsi).
- Li, P., Hao, M. Hu, J. Gao, C. Zhao, G. Chan, F. K. S. Gao, J. Dang, T. and Mu, X. (2021). Spatiotemporal Patterns of Hillslope Erosion Investigated Based on Field Scouring Experiments and Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*, 13, 1674.
- Li, Y., Jiang, Z. Yu, Y. Shan, Z. Lan, F. Yue, X. Liu, P. Gyasi-Agyei, Y and Rodrigo-Comino, J. (2020). Evaluation of soil erosion and sediment deposition rates by the ¹³⁷Cs fingerprinting technique at different hillslope positions on a catchment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 717.
- Lu, X., Li, Y., Washington-Allen, R. A. and Li, Y. (2019). Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope. *Science of the Total Environment*, 655, 1479–1494.
- Mondal, A., Khare, D. Kundu, S. Mukherjee, S. Mukhopadhyay, A. and Mondal, S. (2017). Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs. *Geoscience Frontiers*, 8, 425-436.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Third edition. Blackwell Publishing.
- Nelson D. W. and Sommers, L. E. (1996). *Total organic carbon and organic matter*. In: D.L. Sparks et al. (Eds). *Method of Soil Analysis*. Part 3. 3rd Ed. pp. 961-1010. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI. USA.
- Nielsen, D. C. and Calderon, F. J. (2011). *Fallow effects on soil*. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1391.
- Nouwakpo, S., Huang, C. Bowling, L. Owens, P and Wertz, M. (2021). Inferring sediment transport capacity from soil microtopography changes on a laboratory hillslope. *Water*, 13, 929.
- Refahi, H. G. H. 2016. *Water erosion and its control* (Sixth ed.). Tehran: University of Tehran Press 15 (In Farsi).
- Reynolds, W. D., Drury, C. F. Tan, C. S. Fox, C. A. and Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252-263.
- Rieke-Zapp, D. H. and Nearing, M. A. (2005). Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*, 20(109), 69–87.
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529.
- Smith, M. W. (2014). Roughness in the earth sciences. *Earth Science Reviews*, 136, 202-225.
- Solomon, K. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1078-1086.
- Sun, L., Zhou, J. L. Cai, Q. Liu, S. and Xiao, J. (2021). Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events. *International Soil and Water Conservation Research*, In Press.
- Taconet, O. and Ciarletti, V. (2007). Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 64–76.
- Thomas, K., Chen, W. Lin, B.-S. and Seeboonruang, U. (2020). Evaluation of the sediment delivery distributed (SEDD) model in the Shihmen Reservoir Watershed. *Sustainability*, 12(15), 6221.
- Ventura, E., Nearing, M.A. Amore, E. and Norton, L. D. (2002). The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. *Catena*, 48, 149-161.
- Vermang, J., Norton, L. D. Huang, C. Cornelis, W. M. da Silva, A. M. and Gabriels, D. (2015). Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 79(3), 903-916.
- Wang, L., Zheng, F. Liu, G. Zhang, X. J. Wilson, G. V. Shi, H. and Liu, X. (2021). Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region. *International Soil and Water Conservation Research*, 9, 394-404.
- Wang, Y. C. and Lia, C. C. (2018). Evaluating the erosion process from a single-stripe laser-scanned topography: a laboratory case study. *Water*, 10, 956.
- Wheaton, J. M., Brasington, J. Darby, S. E. and Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136–156.
- Wirtz, S., Seeger, M. and Ries, J. B. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*. 91, 21-34.
- Xu, X., Zheng, F. Wilson, G. V. He, Ch. Lu, J. and Bian, F. (2018). Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 177, 1–11.
- Zhang, G. H. and Xie, Z. f. (2019). Soil surface roughness decay under different topographic conditions. *Soil & tillage Research*, 187, 92-101.
- Zhang, X., Wu, S. Cao, W. Guan, J. and Wang, Z. (2015). Dependence of the sediment delivery ratio

on scale and its fractal characteristics. *International Journal of Sediment Research*, 30(4), 338-343.

Zheng, Z. C., He, S. Q. and Wu, F. Q. (2012). Relationship between soil surface roughness and hydraulic roughness coefficient on sloping farmland. *Water Science and Engineering*, 5(2), 191-201.

Zhu, P., Zhang, G. Zhang, B. and Wang, H. (2020). Variation in soil surface roughness under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Catena*, 188, 104465.

Zobeck, T. M. and Onstad, C. A. (1987). Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil Tillage Research*, 9:1-20.