

## کاربرد مقایسه‌ای روش‌های اسکنر نوری، شیارسنج، پارافین در اندازه‌گیری فرسایش شیاری

سید حمیدرضا صادقی<sup>۱\*</sup>، فهیمه میرچولی<sup>۲</sup>، زینب جزبوی<sup>۲</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۴</sup> و محسن خورسند<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۳</sup> دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۴</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس و <sup>۵</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

### چکیده

اندازه‌گیری فرسایش و رسوب معمولاً با استفاده از روش‌های مختلف برای دستیابی به اطلاعات قابل اعتماد از میزان هدررفت خاک ضروری می‌باشد. در این راستا، به‌کارگیری روش‌های نو و دانش روز به سبب تسهیل در اندازه‌گیری‌ها و افزایش دقت مورد نظر از اهمیت زیادی برخوردار است. لکن اطلاعات کافی در زمینه کارایی روش‌های نوین در دسترس نیست. لذا، پژوهش حاضر با هدف به‌کارگیری اسکنر نوری به‌عنوان یکی از روش‌های نوین اندازه‌گیری فرسایش خاک و مقایسه نتایج حاصل از آن با دو روش سنتی شیارسنج و پارافین در زمینه اندازه‌گیری فرسایش شیاری در شرایط آزمایشگاهی صورت پذیرفت. برای انجام پژوهش، ابتدا یک خاک لومی رسی در کرت‌های آزمایشی با ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر و با شیب ۲۰ درصد در معرض باران با شدت ۵۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۲۰ و ۸۰ دقیقه و ایجاد فرسایش سطحی قرار داده شد. سپس، در مرحله بعد، باران با شدت‌های ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب در مدت‌های ۲۰ و ۸۰ دقیقه برای ایجاد فرسایش‌های شیاری با ابعاد مختلف اجرا و در نهایت میزان فرسایش شیاری با سه روش اسکنر نوری، شیارسنج و پارافین اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده از اسکنر نوری با مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی کرت و نیز روش‌های شیارسنج و پارافین مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین میزان جابه‌جایی خاک از روش‌های اسکنر نوری، شیارسنج و پارافین برای شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با مدت ۲۰ دقیقه به ترتیب  $۲۸۳/۳۰ \pm ۷۹/۷۳$ ،  $۳۵/۴۹ \pm ۸/۲۷$  و  $۴۵/۹۳ \pm ۹/۲۲$  گرم و میانگین میزان جابه‌جایی خاک برای شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت با مدت ۸۰ دقیقه در اسکنر نوری، شیارسنج و پارافین به ترتیب  $۳۷۷/۹۴ \pm ۲۷۴/۲۲$ ،  $۴۱/۴۵ \pm ۵/۷۱$  و  $۴۶/۲۰ \pm ۱۱/۴۵$  به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که نتایج حاصل از اسکنر نوری بسیار متفاوت و مقادیر آن بسیار بالاتر از دو روش سنتی مورد مطالعه است.

**واژه‌های کلیدی:** سامانه شبیه‌ساز باران، فرسایش‌پذیری خاک، فناوری‌های نوین، کرت‌های فرسایشی، منابع خاک و آب

### مقدمه

روش‌های مهار و پیش‌بینی فرسایش و تعیین روش‌های مناسب برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در راستای حفاظت منابع خاک و آب ضروری است

اندازه‌گیری فرسایش خاک برای تعیین اثرات محیط زیستی و حفاظت خاک، ارزیابی و نیز توسعه

ظهور فناوری‌های جدید با قابلیت اندازه‌گیری با سرعت و دقت بالا و نیز در سطح وسیع و گسترده روش‌های متنوع و کارآمدی برای اندازه‌گیری فرسایش خاک ارائه شده است. از جمله روش‌های پیشرفته برای اندازه‌گیری انواع فرسایش می‌توان تصاویر ماهواره‌ای<sup>۵</sup> (Bouziz و همکاران، ۲۰۱۱)، اسکنر لیزری<sup>۶</sup> از نوع زمینی و هوایی (Sass و Bremer، ۲۰۱۲؛ Sadeghi، ۲۰۱۰)، پهبادها<sup>۷</sup> (Eltner و همکاران، ۲۰۱۵) و اسکنر نوری<sup>۸</sup> و عکس‌برداری<sup>۹</sup> (Sadeghi و Gharemahmudli، ۲۰۱۳؛ Guo و همکاران، ۲۰۱۶) را نام برد. به هر تقدیر به سبب نوظهور بودن این نوع از فناوری‌ها و حتی تهیه آن‌ها برای سایر اهداف، مطالعات محدودی در زمینه اندازه‌گیری فرسایش خاک از جمله فرسایش شیاری انجام شده است. در این خصوص، Afana و همکاران (۲۰۱۰) فرسایش خاک منطقه هزاردره منطقه Tabernas واقع در اسپانیا در شرایط صحرایی و با استفاده از اسکنر لیزری زمینی مدل‌های LS-800 و Iris-3D، Scan Station 2 را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که اندازه‌گیری فرسایش با استفاده از اسکنر لیزری در صورت واسنجی دستگاه مناسب بود. هر چند در این مطالعه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تصاویر به دست آمده با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف، مشابه نبود. در ادامه، Barbarella و Fiani (۲۰۱۲) از اسکنر لیزری زمینی مدل‌های Riegl VZ-400 و Optech ILRIS 3D برای پایش لغزش دامنه‌های منطقه Campania در ایتالیا استفاده کردند. آن‌ها مدل رقومی زمین<sup>۱۰</sup> با استفاده از مدل رقومی سطحی<sup>۱۱</sup> را به دست آوردند و مسیر حرکت توده لغزشی با استفاده از مدل نامبرده، تعیین شد. همچنین، Romanescu و همکاران (۲۰۱۲) به اندازه‌گیری فرسایش آبکندی مناطق Moldavian واقع در رومانی و ارزیابی پویایی آن طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ با بهره‌گیری از اسکنر لیزری مدل Leica پرداختند. این پژوهشگران به این نتیجه

(Vinci و همکاران، ۲۰۱۶). فرسایش شیاری<sup>۱</sup> یکی از انواع مهم فرسایش و یک فرایند حد واسط فرسایش سطحی و آبکندی است. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، این نوع از فرسایش مهمترین فرایند تولید رسوب<sup>۲</sup> و در نتیجه هدررفت خاک<sup>۳</sup> گزارش شده است (Sterk و Bewket، ۲۰۰۳؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۵؛ Vinci و همکاران، ۲۰۱۵). شیارهای ایجاد شده در اثر این نوع فرسایش به‌ویژه در مناطق شیب‌دار، منبع مهم هدررفت خاک و انتقال رسوب هستند (Vaezi و همکاران، ۲۰۱۵). زیرا به هنگام ایجاد شیار، جریان سطحی به جریان متمرکز تبدیل شده، خصوصیات هیدرولیکی آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. علاوه بر آن، قدرت آبشویی جریان افزایش یافته، موجب تشدید فرسایش خاک می‌شود (Consuelo و همکاران، ۲۰۰۷؛ Torkashvand و همکاران، ۲۰۱۰؛ Liying و همکاران، ۲۰۱۳).

مطالعات متعددی در زمینه نحوه وقوع فرسایش شیاری، توسعه شبکه شیارها و مطالعه عامل‌های موثر بر آن (Berger و همکاران، ۲۰۱۰؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Hosseini و همکاران، ۲۰۱۲) انجام شده است. با این وجود، کمی‌کردن فرسایش خاک و از جمله فرسایش شیاری یکی از چالش‌های اساسی در بحث مدیریت و حفاظت خاک تا به حال تلقی می‌شود. در این راستا، روش‌های متعددی نیز به‌وسیله متخصصان مختلف در سطح جهان ابداع و توسعه داده شده است. به‌طور کلی روش‌های اندازه‌گیری فرسایش خاک را می‌توان به دو دسته روش‌های سنتی و پیشرفته تقسیم‌بندی کرد. از جمله روش‌های سنتی می‌توان به شیارسنج<sup>۴</sup> (Carollo و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sadeghi، ۲۰۱۰) و پر کردن شیارهای حاصل از فرسایش شیاری با استفاده از مواد مختلف و اندازه‌گیری حجم این مواد (Chen و همکاران، ۲۰۱۶) اشاره کرد. این‌گونه روش‌ها به‌دلیل سهولت اندازه‌گیری و ثبت داده‌های حاصل از آن‌ها نسبتاً متداول و ساده بوده، نیازمند منابع انسانی و هزینه کم برای استفاده هستند (Sadeghi، ۲۰۱۰). اما در سال‌های اخیر با

<sup>5</sup> Satellite images

<sup>6</sup> Laser scanner

<sup>7</sup> Unmanned aerial vehicle

<sup>8</sup> Optic scanner

<sup>9</sup> Photogrammetry

<sup>10</sup> Digital Terrain Models (DTM)

<sup>11</sup> Digital Surface Models (DSM)

<sup>1</sup> Rill erosion

<sup>2</sup> Sediment

<sup>3</sup> Soil loss

<sup>4</sup> Rillmeter

در فرسایش شیاری در سطح کرت‌های آزمایشگاهی در ایستگاه Masse در ایتالیا پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که مساحت و طول شیارها در روش شیارسنج کمتر از اسکنر لیزری برآورد شده است. جمع‌بندی سوابق نشان می‌دهد که تا کنون هیچ گونه پژوهشی در خصوص استفاده از دستگاه اسکنر نوری در زمینه اندازه‌گیری فرسایش شیاری گزارش نشده است. لذا، در پژوهش حاضر به بررسی قابلیت کاربرد اسکنر نوری در اندازه‌گیری هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری برای اولین بار در ایران در مقیاس کرت و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از دو روش سنتی شیارسنج و پارافین در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس پرداخته شد.

### مواد و روش‌ها

برای بررسی قابلیت کاربرد اسکنر نوری در اندازه‌گیری هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری در مقیاس کرت و در مقایسه با نتایج حاصل از دو روش شیارسنج و پارافین، مراحل آماده‌سازی خاک مورد مطالعه و کرت‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی باران، اندازه‌گیری میزان غلظت رسوب خروجی از کرت‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری روش‌های اسکنر نوری، شیارسنج و پارافین در اندازه‌گیری هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری و تجزیه و تحلیل نتایج به شرح زیر انجام شد.

**آماده‌سازی خاک و کرت‌های آزمایشگاهی:** خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه کجور واقع در دامنه‌های شمالی البرز مرکزی برداشت شد. خاک این منطقه دارای بافت لومی رسی و عمق کمتر از یک متر بوده است. خاک منتقل شده از عرصه، در شرایط طبیعی هواخشک شده و سپس از الک سه میلی‌متری برای حفظ ساختمان اصلی خاک و حذف سنگریزه‌ها عبور داده و به‌طور کامل مخلوط شد.

برای انجام پژوهش حاضر، از کرت‌های کوچک آزمایشگاهی موجود با ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متری و با قابلیت اندازه‌گیری در روش‌های مورد نظر استفاده شد. در خصوص آماده‌سازی کرت‌ها و شبیه‌سازی شرایط طبیعی خاک، ابتدا لایه زهکشی از جنس پوکه

رسیدند که سرعت پیشروی فرسایش آبکندی در طی سال‌های مطالعاتی بالا و در حدود ۶/۲۵ متر در سال بوده است. در ادامه پژوهش‌های پیشین، شناسایی و پایش فرسایش آبکندی در منطقه کشاورزی-صنعتی در اثر کاربری اراضی نامتناسب و نیز توسعه روش‌های مهار آن در حوضه Souss واقع در مراکش با استفاده از پهباد به‌وسیله D'Oleire-Oltmanns و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که داده‌های حاصل از این روش، امکان اندازه‌گیری دقیق مساحت منطقه فرسایش و نیز نقشه‌برداری شرایط محلی از جمله پوشش گیاهی، شخم و فرسایش شیاری را فراهم کرد. همچنین، Nadal-Romero و همکاران (۲۰۱۵) از روش‌های غیرتماسی اسکنر لیزری و عکس‌برداری برای اندازه‌گیری فرسایش آبکندی در منطقه Araguás واقع در اسپانیا استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که علاوه بر مناسب بودن هر دو روش برای اندازه‌گیری فرسایش خاک، اسکنر لیزری نسبت به عکس‌برداری دقت بیشتری در اندازه‌گیری فرسایش آبکندی داشته، اما سرعت عملکرد روش عکس‌برداری نسبت به اسکنر لیزری بالاتر بوده و در ارتفاع کم نیز دقت خوبی داشت. به‌طور مشخص، در خصوص اندازه‌گیری فرسایش شیاری، Carollo و همکاران (۲۰۱۵)، از روش‌های شیارسنج و پهباد برای اندازه‌گیری فرسایش شیاری مناطق Sparacia واقع در ایتالیا در مقیاس کرت آزمایشگاهی استفاده کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که استفاده از شیارسنج زمان‌بر بوده، همچنین، سطح خاک در اثر کاربرد آن تغییر کرده، موجب اختلال در اندازه‌گیری و دقت نتایج به‌دست آمده می‌شود. این در حالی است که روش غیر تماسی پهباد برای اندازه‌گیری فرسایش شیاری مناسب‌تر ارزیابی شد. در روش غیر تماسی، پهباد اندازه شبکه<sup>۱</sup> در مدل رقومی ارتفاع حاصل از پژوهش آن‌ها یک سانتی‌متر بوده، عمق شیار را کمتر و عرض آن را بیشتر از مقدار شیارسنج برآورد کرد. Vinci و همکاران (۲۰۱۶) نیز به استفاده از اسکنر لیزری و نیز روش شیارسنج برای اندازه‌گیری خصوصیات شیارها

<sup>۱</sup> Mesh

معنی داری برای ادامه روند مطالعه و دستیابی به هدف اصلی پژوهش نداشته، صرفاً برای تسریع در ایجاد یک شیار انجام شده است.

**شبیه‌سازی باران:** در این پژوهش، از شبیه‌ساز باران قابل حمل با یک نازل تحت فشار برای شبیه‌سازی شدت باران مورد نظر با ارتفاع ریزش ۲/۵ متر و مناسب برای دسترسی نسبی به سرعت حد قطرات، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، واسنجی‌های لازم به‌منظور رسیدن به بیشینه تشابه ویژگی‌های فیزیکی باران شبیه‌سازی شده شامل دانه‌بندی و قطر قطرات با باران طبیعی، صورت گرفت. به‌نحوی که برای رسیدن به شدت مورد نظر، ابتدا با استفاده از ظروف کوچک پلاستیکی حجم بارندگی در نقاط مختلف سطح کرت، اندازه‌گیری و سپس ارتفاع رواناب از تقسیم میانگین حجم رواناب ظروف بر مساحت آن‌ها محاسبه شده، در نهایت شدت بارندگی از تقسیم ارتفاع رواناب بر زمان به‌دست آمد. به‌منظور تسهیل شرایط مناسب برای ایجاد فرسایش شیاری ابتدا، کرت‌های آزمایشگاهی در معرض فرسایش سطحی قرار گرفته و سپس شرایط بارندگی مناسب و متفاوت برای فرسایش شیاری به شرح مندرج در جدول ۱ و در دامنه بارندگی‌های گزارش شده در ایستگاه هواشناسی کجور در نظر گرفته شد.

معدنی با ضخامت سه سانتی‌متر در کف کرت‌ها تعبیه شد. پس از انتقال خاک به داخل کرت، برای رسیدن به جرم مخصوص مورد نظر (۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) از لوله‌های پی‌وی‌سی پر شده با مخلوط ماسه و سیمان، به‌عنوان غلطک استفاده شد. پس از پر کردن کرت‌های آزمایشگاهی از خاک، طبق اصول ارائه شده در این زمینه (Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۳ و Sadeghi؛ ۲۰۱۶ و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۶؛ a, b, c و d؛ Kheirfam و همکاران، ۲۰۱۷ و Zoratipour و ArabKhedri، ۲۰۱۵)، برای تامین رطوبت پیشین متناسب با شرایط رطوبت طبیعی حاکم بر منطقه مادری، کرت‌های فرسایشی به‌مدت سه ساعت در آب و بعد از آن به‌مدت ۱۴ ساعت قبل از شروع آزمایش مربوط به شبیه‌سازی باران، خارج از آب قرار گرفتند. با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش، مقایسه کاربرد سه روش اندازه‌گیری فرسایش شیاری است و از آن‌جا که احتمال تشکیل شیار به هنگام بارندگی با توجه به محدود بودن طول کرت، پایین بود، یک هدکت کوچک در سطح کرت ایجاد شد. ایجاد هدکت مصنوعی نیز در تمام موارد به‌صورت مشابه و با اعمال یک ابزار نوک تیز مثل ته خودکار و در یک محل مشابه در بخش میانی کرت‌ها ایجاد شده و یقیناً تأثیر

جدول ۱- تیمارهای بارندگی اعمال شده در پژوهش حاضر

تیمارهای بارندگی	فرسایش سطحی		فرسایش شیاری	
	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	مدت بارندگی (دقیقه)	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	مدت بارندگی (دقیقه)
۱	۵۰	۲۰	۹۰	۲۰
۲	۵۰	۶۰	۱۰۰	۸۰

برای تعیین سهم پاشمان، ذرات پاشمان شده به بیرون از کرت و نیز دیواره داخلی کرت نیز جمع‌آوری شدند.

#### روش‌های اندازه‌گیری فرسایش شیاری

**الف) روش اسکنر نوری:** دستگاه اسکنر نوری مورد استفاده در پژوهش، از دو بخش دوربین و پرتوافکن تشکیل شده است. دوربین نقش اصلی برداشت اطلاعات را برعهده دارد، دامنه دید بر اساس ابعاد سطح مورد برداشت تعیین و با تغییر لنز دوربین و

برای اندازه‌گیری دقیق میزان هدررفت خاک، به‌منظور جمع‌آوری تمامی آب خروجی از کرت حاوی رسوب، محفظه‌ای در خروجی کرت مطابق شکل ۱ قرار داده شد و غلظت رسوب در هر نمونه با استفاده از روش تخلیه و برجاگذاری به‌دست آمد (Kavian و همکاران، ۲۰۱۲؛ Khaledi Darvishan و همکاران، ۲۰۱۴ و Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Khaledi Darvishan و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین،

دستگاه اسکنر نوری، خروجی دستگاه به‌صورت تراکم پوششی نقاط بوده که این نقاط دارای مختصات سه بعدی (طول، عرض و ارتفاع) می‌باشند و از سطح خاک استخراج می‌شوند. هرچه تراکم این نقاط بیشتر باشد، سطح بهتر و جزئیات بیشتری را نشان خواهد داد. در فرایند تشکیل تراکم پوششی نقاط، از هر سه نقطه مجاور یکدیگر یک مثلث گذرانده می‌شود و با پیوند دادن این مثلث‌ها سطحی را حاصل می‌نماید که اصطلاحاً شبکه نامیده می‌شود. شکل ۲، نمایی از دستگاه اسکنر نوری استفاده شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

پرتوافکن تغییر می‌کند. بر این اساس، دامنه‌های دید مختلفی برای این دستگاه تعبیه شده که در دامنه‌های کمتر، جزئیات بیشتری را برداشت کرده، ولی به همان نسبت سرعت ابعادبرداری در سطوح بزرگ افزایش می‌یابد. امروزه از پرتوافکن نور آبی در دستگاه اسکنر نوری مورد استفاده در پژوهش حاضر استفاده می‌شود. زیرا نور آبی تک‌رنگ بوده و محدودیت‌های نور سفید را به‌دلیل برخورداری آن از طیف گسترده‌ای از رنگ‌ها و ایجاد خطا ندارد. در پژوهش حاضر، دستگاه اسکنر نوری برای پایش سطح خاک در سه بعد به‌صورت غیر تماسی استفاده شد. بر اساس گزارش ارائه شده به‌وسیله Hekmat (۲۰۱۲) در خصوص نحوه کاربرد



شکل ۱- الف) نمایی از کورت مورد استفاده در پژوهش، شرایط آزمایشگاهی و اندازه‌گیری رواناب و رسوب، ب) نمونه‌ای از شیاریهای ایجاد شده در بخش مرکزی و نیمه پایینی سطح کورت، ج) نمایی از ذرات پاشمان چسبیده به جداره داخلی کورت

بعد از اعمال بارندگی مصنوعی به‌وسیله دستگاه اسکنر نوری، اسکن (چاروب) شده و تصاویر حاصل به نرم‌افزار Geomagic Studio منتقل شد. این نرم‌افزار با در نظر گرفتن یک صفحه فرضی در فاصله مشخص از سطح اسکن‌شده، حجم مورد نظر را ارائه می‌دهد. با توجه به هدررفت خاک بعد از بارندگی، سطح خاک پایین‌تر می‌رود. در این حالت بدیهی است، حجم به‌دست آمده به‌وسیله نرم‌افزار بیشتر است. حجم حاصل از تفاوت سطوح اسکن‌شده قبل و بعد از بارندگی، به‌عنوان

دستگاه مورد استفاده در پژوهش حاضر، دستگاه اسکنر نوری مدل DS و از نوع غیر تماسی بوده که دارای دقت ۰/۰۵-۰/۱۵ میلی‌متر است. منبع نوری دستگاه از نوع نور آبی است. زمان لازم برای هر اسکن کمتر از چهار ثانیه و برای اسکن کل سطح مورد بررسی، بسته به بزرگی سطح و نیز تعداد اسکن‌های مورد نیاز متفاوت می‌باشد. نوع سامانه رایانه‌ای مورد نیاز برای اتصال به دستگاه از نوع ۶۴ بیتی و با سامانه عامل ویندوز است. در این روش، سطح خاک قبل و

کرت ضروری است. به همین منظور، در این مطالعه، تعداد بهینه اسکن برای برداشت سطح خاک تعیین و برابر با ۱۸ تا ۲۰ بار برآورد شد. به طور کلی، کرت‌های آزمایشگاهی در قبل و بعد از اجرای تیمارهای بارندگی در جهت‌های مختلف و با تکرار مناسب به وسیله دستگاه اسکن شدند. لازم به ذکر است که در خصوص روش اسکن نوری، سطح خاک قبل و بعد از اعمال باران با شدت‌های ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت در دو مدت ۲۰ و ۸۰ دقیقه به وسیله اسکن نوری اسکن شده و تفاوت این دو سطح به عنوان میزان هدررفت خاک حاصل از فرسایش شیاری در نظر گرفته شد.

فرسایش حاصل از بارش در نظر گرفته شد. در نهایت، با در نظر گرفتن جرم مخصوص خاک مورد نظر برابر با  $1/3$  گرم بر سانتی‌متر مکعب، مقدار هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری بر حسب گرم به دست آمد.

از آنجا که اجرای اسکن از جهت‌های متفاوت برای به دست آوردن تمام اطلاعات سطح لازم است، تعداد بهینه اسکن‌ها بایستی با توجه به سطح خاک تعیین شود. زیرا که سطح خاک از نظر وضعیت شیاریها ممکن است، به گونه‌ای باشد که در اسکن‌ها نقاطی از سطح خاک به وسیله دوربین برداشت نشود. بنابراین، تعیین تعداد بهینه اسکن به لحاظ پوشش کل سطح



شکل ۲- نمایی از دستگاه اسکنر نوری مدل Opticscan-DS مورد استفاده در پژوهش حاضر

شیارسنج برای اندازه‌گیری فرسایش شیاری، از دستگاه شیارسنج موجود در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشگاه تربیت مدرس به صورت ارائه شده در شکل ۴، استفاده شد.

در این روش دو تخته موجود در کنار شیارسنج موجب قرار گرفتن آن در بالای سطح خاک می‌شود. در این وسیله، میخ‌ها از سوراخ‌های تعبیه شده در شیارسنج عبور داده شده و روی سطح خاک قرار می‌گیرد. در زمان اندازه‌گیری، این میخ‌ها تا قرار گرفتن نوک آن‌ها در سطح خاک پایین آورده می‌شود. در این روش، شیاریها با توجه به عمق و عرض آن‌ها به

**(ب) روش پارافین:** در پژوهش حاضر، برای استفاده از روش پارافین در اندازه‌گیری فرسایش شیاری، مقدار مشخصی پارافین در استوانه مدرج ریخته شد و در آن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. بعد از ذوب شدن کامل آن با توجه به میزان مصرفی پارافین برای پرکردن شیاریها، حجم شیاریها و در نتیجه هدررفت خاک ناشی از آن‌ها به دست آمد. شکل ۳، نمایی از نحوه استفاده از پارافین برای اندازه‌گیری حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری را نمایش می‌دهد.

**(ج) روش شیارسنج:** در خصوص استفاده از روش

چندین قسمت تقسیم شده و حجم شیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$V_{rs} = 0.5(A_1 + A_2)L_{rs} \quad (1)$$

که در آن،  $V_{rs}$  حجم هر قسمت از شیاری (میلی‌متر مکعب)،  $A_r$  مساحت بخش بالایی هر قسمت (میلی‌متر مربع)،  $A_s$  مساحت بخش پایینی هر قسمت (میلی‌متر مربع)،  $L_{rs}$  عمق هر قسمت (میلی‌متر) می‌باشد. در نهایت، با در نظر گرفتن جرم مخصوص خاک مطالعاتی، مقدار هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری برحسب گرم به‌دست آمد.

نمایی از نحوه استفاده از پارافین برای اندازه‌گیری حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری



شکل ۳- نمایی از نحوه استفاده از پارافین برای اندازه‌گیری حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری



شکل ۴- نمایی از شیارسنج استفاده شده در پژوهش حاضر

پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی کاربرد اسکرن نوری در اندازه‌گیری هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری و نیز مقایسه نتایج آن با دو روش شیارسنج و پارافین در شرایط شبیه‌ساز باران برای خاک لومی‌رسی از دامنه‌های شمالی البرز واقع در مازندران، در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نتایج حاصل از اسکن کرت‌های آزمایشگاهی به‌وسیله دستگاه اسکرن نوری، با استفاده از نرم‌افزار Geomagic Studio مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از اسکن سطح خاک در قبل و بعد از تیمارهای آزمایش بارندگی در جدول ۲ ارائه شده است. از تفاضل این مقادیر، می‌توان به میزان فرسایش و یا به عبارتی جابه‌جایی خاک ناشی از باران دست یافت. در واقع حجم خاک از دست رفته با تفاضل حجم فضای ایجاد شده ناشی از جابه‌جایی خاک قبل

و بلافاصله بعد از بارندگی به‌دست آمد و با توجه به جرم مخصوص خاک، مقدار هدررفت خاک حاصل شد. نتایج مربوط به مجموع مقادیر ذرات پاشمان شده به خارج از کرت و دیواره داخلی آن، مجموع پاشمان ذرات و رسوب حاصل از بارندگی در سطح کرت و همچنین، مقدار خاک جابه‌جا شده به‌دست آمده از اسکرن نوری در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق این جدول، در تمامی تکرارها مقدار خاک جابه‌جا شده به‌دست آمده به‌وسیله اسکرن نوری از مجموع مقادیر رسوب حاصل از سطح کرت و پاشمان به دیواره داخلی کرت و خارج از آن بیشتر بوده است. به‌عنوان مثال، در تکرار اول مربوط به شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و در مدت ۲۰ دقیقه، مقدار جابه‌جایی خاک که به‌وسیله اسکرن نوری اندازه‌گیری شده ۲۲۰/۸۲ گرم و مجموع مقدار پاشمان و رسوب ۱۱۶/۹۴ است. این اختلاف زیاد به این دلیل است که دستگاه نه‌تنها هدررفت خاک بلکه هرگونه حرکت جزئی خاک را اندازه‌گیری

## نتایج و بحث

نتایج و بحث

در اثر برخورد قطرات باران و نیز اثر متقابل خاک و نیروی ثقل ایجاد می‌شود (Novara و همکاران، ۲۰۱۲).

می‌کند. همچنین، عامل موثر دیگر در ایجاد اختلاف نام‌برده، فشردگی خاک است؛ به طوری که در خاک خیس با گذشت زمان، در اثر از دست دادن رطوبت، میزان فشردگی خاک افزایش می‌یابد. فشردگی خاک

جدول ۲- نتایج حاصل از اسکن سطح کرت‌ها در قبل و بعد از بارندگی به وسیله اسکنر نوری (میلی متر مکعب)

تیمارهای بارندگی	تکرار	قبل از بارندگی	بعد از بارندگی	تفاوت حجم قبل و بعد از بارندگی
شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۲۰ دقیقه	۱	۶۳۴۴۹۸/۷	۸۰۴۳۶۷/۵	۱۶۹۸۶۸/۸
	۲	۵۷۰۸۱۰/۲	۸۵۷۸۲۴/۷	۲۸۷۰۱۴/۵
	۳	۸۴۱۱۴۴/۰	۱۰۳۸۰۶۱/۶	۱۹۶۹۱۷/۶
شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۸۰ دقیقه	۱	۶۴۲۳۸۰/۵	۸۴۸۸۷۵/۴	۲۰۶۴۹۴/۹
	۲	۵۷۹۶۳۳/۷	۷۱۴۵۴۲/۵	۱۳۴۹۰۸/۸
	۳	۶۸۶۲۸۳۷	۱۵۵۵۰۸۰	۵۳۰۷۷۵۷

جدول ۳- نتایج حاصل از جابه‌جایی خاک (گرم) ناشی از فرسایش شیاری و بین‌شیاری اندازه‌گیری شده به وسیله اسکنر نوری

تیمارهای بارندگی	تکرار	مقدار پاشمان	مجموع پاشمان و رسوب	مقدار خاک جابه‌جا شده
شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در مدت ۲۰ دقیقه	۱	۳۸/۹۱	۱۱۶/۹۴	۲۲۰/۸۲
	۲	۶۲/۷۳	۱۸۸/۲۵	۳۷۳/۱۱
	۳	۶۸/۴۴	۲۰۵/۴۳	۲۵۵/۹۹
شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت در مدت ۸۰ دقیقه	۱	۴۶/۵۲	۱۳۹/۵۳	۶۹۰/۰۰
	۲	۴۲/۵۰	۱۲۷/۷۴	۱۷۵/۳۸
	۳	۷۷/۳۱	۲۳۲/۰۵	۲۶۸/۴۴

این تکرار ۳۶/۳۹ گرم یا ۱۳ درصد آن ناشی از در نظر گرفتن جابه‌جایی خاک و نیز فشردگی آن می‌باشد. در این پژوهش، علاوه بر اسکنر نوری، از روش‌های شیاریسنج و پارافین به منظور مقایسه سه روش مطالعاتی در اندازه‌گیری مقدار فرسایش شیاری استفاده شد که نتایج حاصل از آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جدول، میزان خاک جابه‌جا شده اندازه‌گیری شده با استفاده از روش اسکنر سه بعدی بیشتر از سایر روش‌ها محاسبه شد. این اختلاف زیاد را می‌توان به این امر نسبت داد که در روش‌های سنتی صرفاً هدررفت خاک ناشی از شیاری ایجاد شده، اندازه‌گیری شده و هدررفت ناشی از فرسایش بین شیاری نادیده گرفته شده است. این در حالی است که اسکنر نوری سه بعدی از تمام سطح کرت برداشت انجام داده و در اثر آن نیز جزئی‌ترین حرکات ذرات خاک در نظر گرفته شده است. این نتایج با بخشی از مطالعه Vinci و همکاران (۲۰۱۵) و نیز Carollo و همکاران (۲۰۱۵) در خصوص عدم تشابه

نمودار بودجه رسوب حاصل از فرسایش شیاری برای مثال مربوط به یکی از تکرارها (تکرار سوم از تیمار با شدت بارندگی ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت در مدت ۸۰ دقیقه) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میزان کل خاک جابه‌جا شده به دست آمده از روش اسکنر نوری ۲۶۸/۴۴ گرم می‌باشد. از این مقدار، ۱۵۴/۷۰ گرم یعنی ۵۷/۶ درصد آن به صورت رسوب از کرت خارج شده است که به عنوان مقدار تحویل رسوب<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ۷۷/۳۵ گرم یعنی ۲۹ درصد از میزان کل خاک جابه‌جا شده به صورت پاشمان صورت گرفته است. در هر حال، باید انتظار داشت که مجموع میزان پاشمان و نیز رسوب حاصل از فرسایش با میزان خاک جابه‌جا شده محاسباتی به وسیله اسکنر نوری برابر باشد، اما با توجه به شکل، مقدار خطا<sup>۲</sup> در

<sup>۱</sup> Sediment Delivery Ratio (SDR)

<sup>۲</sup> Error



نتایج حاصل از اسکنر لیزری و شیارسنج در اندازه‌گیری فرسایش شیاری مشابه است. همچنین، یافته‌های این مطالعه با Dabek و همکاران (۲۰۱۸) در راستای کاربرد روش‌های اسکنر لیزری و فناوری‌های جدید و گزارش عملکرد دقیق و سریع آن‌ها در اندازه‌گیری فرسایش مطابقت دارد.

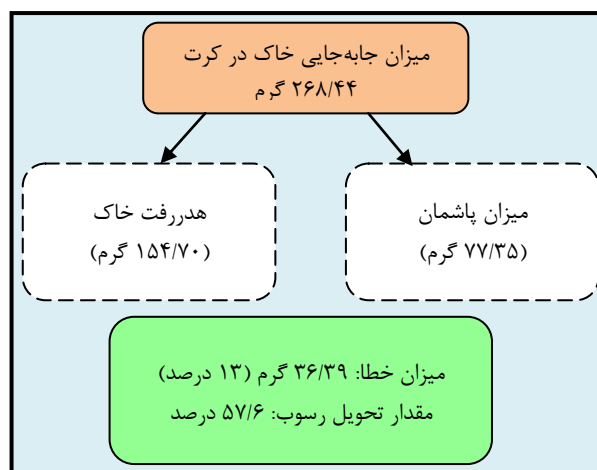
**جدول ۴-** مقدار جابه‌جایی خاک ناشی از فرسایش شیاری و بین شیاری به‌دست آمده از روش اسکنر نوری و خاک جابه‌جا شده ناشی از فرسایش شیاری با استفاده از روش پارافین و شیارسنج (گرم)

تیمارهای بارندگی	تکرار	اسکنر نوری	پارافین	شیارسنج	رسوب
شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۲۰ دقیقه	۱	۲۲۰/۸۲	۳۷/۷۱	۲۶/۱۸	۷۷/۹۶
	۲	۳۷۳/۱۱	۴۴/۲۳	۳۸/۲۸	۱۲۵/۵۰
	۳	۲۵۵/۹۹	۵۵/۹۱	۴۲/۰۲	۱۳۶/۹۰
شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۸۰ دقیقه	۱	۲۶۸/۴۴	۵۹/۴۲	۴۷/۷۸	۱۵۴/۷۰
	۲	۱۷۵/۳۸	۳۸/۹۱	۳۶/۶۸	۸۵/۱۶
	۳	۶۹۰/۰۰	۴۰/۳۴	۳۹/۸۹	۹۳/۰۲

### نتیجه‌گیری

در طول دهه گذشته، مهندسی نقشه‌برداری در نقاط مختلف جهان، پیشرفت‌های گسترده‌ای در زمینه روش‌های جمع‌آوری داده‌های مکانی داشته است. یکی از این پیشرفت‌ها به‌صورت فناوری اسکنر نوری ظاهر شده است. دستگاه اسکنر نوری برای پایش سطح در سه بعد به‌صورت غیر تماسی استفاده می‌شود. خروجی دستگاه اسکنر نوری به‌صورت ابر نقاط است که دارای

مختصات سه بعدی هستند. هر چه چگالی این توده ابر نقاط بیشتر باشد، سطح بهتر و جزئیات بیشتری را نشان خواهد داد. بنابراین در همین راستا، در پژوهش حاضر امکان‌سنجی مطالعه فرسایش شیاری با استفاده از اسکنر نوری و نیز مقایسه عملکرد آن با روش‌های سنتی شامل پارافین و شیارسنج در اندازه‌گیری هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری بررسی شد.



شکل ۵- نمودار بودجه رسوب حاصل از جابه‌جایی خاک در کرت‌های کوچک آزمایشگاهی

دستگاه، اطلاعات مناسبی از سطح اسکن شده، ارائه می‌دهد. این در حالی است که روش‌های سنتی در این زمینه محدودیت‌هایی داشتند و قادر به انجام این امر نیستند. روش‌های سنتی، روش‌های آسان و ارزان در اندازه‌گیری فرسایش به حساب می‌آیند و سطح خاک

بر اساس نتایج مشخص منتج از پژوهش، اسکنر نوری جزئیات و اطلاعات بیشتری از میزان هدررفت خاک و نیز جزئی‌ترین حرکات خاک در اختیار قرار داد. همچنین، اسکنر نوری این اطلاعات را از تمام سطح خاک برداشت کرده و با توجه به دقت بالای

دستگاه اسکنر نوری به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری نوین در مقوله فرسایش خاک نیازمند انجام پژوهش‌های گسترده در شرایط مختلف آزمایشگاهی و صحرایی است.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، از همکاری‌های سرکار خانم مهندس فاطمه صدیقی در انجام پژوهش حاضر قدردانی و تشکر نمایند.

در اثر کاربرد آن تغییر کرده، موجب اختلال در اندازه‌گیری و دقت نتایج به‌دست آمده می‌شود. طی این پژوهش مشخص شد که استفاده از قابلیت‌های اسکنر نوری در منابع طبیعی می‌تواند بسیاری از عدم قطعیت‌های موجود در برآورد جزئیات فرایندها و عوارض، به‌ویژه در مطالعات فرسایش و رسوب را از بین ببرد. به هر تقدیر، برای دستیابی به جمع‌بندی کامل و جامع در خصوص قابلیت اعتماد به داده‌های حاصل از

### منابع مورد استفاده

1. Afana, A., A. Sole-Benet and J. Perez. 2010. Determination of soil erosion using laser scanners. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 39-42.
2. Barbarella, M. and M. Fiani. 2012. Landslide monitoring using terrestrial laser scanner, georeferencing and canopy filtering issues in a case study. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39: B5.
3. Berger, C., M. Schulze and D. Rieke-Zapp. 2010. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(12): 1456-1467.
4. Bewket, W. and G. Sterk. 2003. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga Watershed, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97(1): 81-93.
5. Bouaziz, M., A. Wijaya and R. Gloaguen. 2011. Remote gully erosion mapping using Aster data and geomorphologic analysis in the Main Ethiopian Rift. *Geo-spatial Information Science*, 14(4): 246-254.
6. Bremer, M. and O. Sass. 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology*, 138(1): 49-60.
7. Carollo, F., C. Stefano, V. Ferro and V. Pampaloni. 2015. Measuring rill erosion at plot scale by a drone-based technology. *Hydrological Processes*, 29: 3802-3811.
8. Chen, X.Y., Y.H. Huang, Y. Zhao, B. Mo and H.X. Mi. 2015. Comparison of loess and purple rill erosions measured with volume replacement method. *Journal of Hydrology*, 530: 476-483.
9. Chen, X.Y., Y. Zhao, H.X. Mi and B. Mo. 2016. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena*, 136: 135-140.
10. Consuelo, C.R., L. Stroosnijder and A. Guillermo. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*, 70(2): 105-113.
11. Dąbek, P.B., C. Patrzalek, B. Ćmielewski and R. Żmuda. 2018. The use of terrestrial laser scanning in monitoring and analyses of erosion phenomena in natural and anthropogenic ally transformed areas. *Cogent Geoscience*, 4(1): 1437684.
12. D'Oleire-Oltmanns, S., I. Marzolf, K.D. Peter and J.B. Ries. 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4: 3390-3416.
13. Eltner, A., P. Baumgart, H.G. Maas and D. Faust. 2015. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(6): 741-755.
14. Guo, M., H. Shi, J. Zhao, P. Liu, D. Welbourne and Q. Lin. 2016. Digital close range photogrammetry for the study of rill development at flume scale. *Catena*, 143: 265-274.
15. Hazbavi, Z., S.H.R. Sadeghi and H. Younesi. 2013. Analysis and assessing effectability of runoff components from different levels of polyacrylamide. *Water and Soil Resource Conservation*, 2(2): 1-13 (in Persian)
16. Hazbavi, Z., S.H.R. Sadeghi and M. Kiani Harchegani. 2016. Application of biochar on temporal variability of runoff volume and coefficient. 3rd Conference of the World Association of Soil and Water Conservation, 22-26 August, 6 pages.
17. Hekmat, H. 2012. Optical three-dimensional measuring devices technology and its application. *Manufacturing and Production Magazine*, 34: 96-99 (in Persian).

18. Hosseini, S.H., A. Mosaedi, K. Naseri and A. Golkarian. 2012. Identification of the most effective elements on rill erosion in the hill slope units of Mashhad south west, Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 2: 87-99 (in Persian).
19. Kaviani, A., R. Asgariyan, Z. Jafarian Jeloudar and M.A. Bahmanyar. 2012. Effect of soil properties on runoff and sediment yield in farm scale, case study: a part of Sari towns neighboring Croplands. *Water and Soil Science*, 23(4): 45-57 (in Persian).
20. Khaledi Darvishan, A.V., S.H.R. Sadeghi, M. Homaei and M. Arabkhedri. 2014. Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity and antecedent soil moisture content in laboratorial erosion plots. *Iran Water Research Journal*, 8(15): 441-49 (in Persian).
21. Khaledi Darvishan, A.V., S.H.R. Sadeghi, M. Homaei and M. Arabkhedri. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28: 4463-4471.
22. Khaledi Darvishan, A.V., K. Banasik, S.H.R. Sadeghi, L. Gholami and L. Hejduk. 2015. Effects of rain intensity and initial soil moisture on hydrological responses in laboratory conditions. *International Agrophysics*, 29: 165-173.
23. Kheirfam, H., S.H.R. Sadeghi, M. Homaei and B. Zarei Darki. 2017. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*, 165: 230-238.
24. Liying, S., F. Haiyan, Q. Deli, L. Junlan and C. Qinangueo. 2013. A review on rill process and its influencing factors. *Chinese Geographical Science*, 23(4): 389-402.
25. Nadal-Romero, E., J. Revuelto, P. Errea and J.I. Lopez-Moreno. 2015. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area Central Spanish Pyrenees. *Soil*, 1: 561-573.
26. Novara, A., A. Armstrong, L. Cristina, K.T. Semple and J.N. Quinton. 2012. Effects of soil compaction, rain exposure and their interaction on soil carbon dioxide emission. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(9): 994-999.
27. Romanescu, G., V. Cotiuga, A. Asandulesei and C. Stoleriu. 2012. Use of the 3-D scanner in mapping and monitoring the dynamic degradation of soils, case study of the Cucuteni-Baiceni Gully on the Moldavian Plateau Romania. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 953-966.
28. Sadeghi, S.H.R. 2010. Study and measurement of water erosion. Tarbiat Modares Press, 200 pages (in Persian).
29. Sadeghi, S.H.R. and S. Gharemahmudli. 2013. Investigating bed sediment granulometry precision based on image processing of cameras with different resolutions. *Watershed Engineering and Management*, 5(2): 115-124 (in Persian).
30. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi, H. Younesi and M. Behzadfar. 2013. Trend of soil loss and sediment concentration changeability due to application of polyacrylamide. *Water and Soil Resource Conservation*, 2(4): 53-67 (in Persian).
31. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi and M. Kiani Harchegani. 2016a. Controlling of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*, 15: 483-490.
32. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi, H. Younesi and N. Bahramifar. 2016b. Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues. *Catena*, 142: 213-220.
33. Sadeghi, S.H. R., M.B. Raisi and Z. Hazbavi. 2016c. Effects of polyacrylamide in controlling of splash erosion from a soil induced freeze-thaw cycle. *Journal of Water and Soil*, 29(6): 1601-1611 (in Persian).
34. Sadeghi, S.H.R., E. Sharifi Moghadam and A. Khaledi Darvishan. 2016d. Effects of subsequent rainfall events on runoff and soil erosion components from small plots treated by vinasse. *Catena*, 138: 1-12.
35. Shi, Z.H., N.F. Fang and F.Z. Wu. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 454: 123-130.
36. Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: is it possible? *Catena*, 64: 162-173.
37. Torkashvand, A.M., D. Nikkami, M. Esfandiari and S.K. Alavipanah. 2010. Investigating some methodologies in preparing rill erosion map, using RS and GIS. *Watershed Engineering and Management*, 2(3): 150-161 (in Persian).
38. Vaezi, A.R. and A. Vatani. 2015. Determining rill erodibility in some soils in Zanjan province under simulated rainfall. *Water and Soil Science*, 19(71): 59-68 (in Persian).
39. Vinci, A., R. Brigante, F. Todisco, F. Mannocchi and F. Radicioni. 2015. Measuring rill erosion by laser scanning. *Catena*, 124: 97-108.
40. Vinci, A., F. Todisco and F. Mannocchi. 2016. Calibration of manual measurements of rills using terrestrial laser scanning. *Catena*, 140: 164-168.

41. Zoratipour, A. and M. ArabKhedri. 2015. Assessment of the effect of the rainfall returns period and pattern on the hillslope erosion on the catchments, case study: Heshan Basin. Irrigation Science and Engineering, 39(4): 123-132 (in Persian).