

## تأثیر نوع خاک و قدرت جریان بر اهمیت نسبی فرایندهای ناشی از روان آب در شرایط آزمایشگاهی

سیده کوثر دانش‌یار<sup>۱</sup>، حسین اسدی<sup>۲\*</sup>، سیدعلی موسوی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان

۲. استادیار گروه خاک‌شناسی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان

۳. مربی گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۰/۸)

### چکیده

درک فرایندهای فرسایش و تهیه مدلهای فرسایش خاک به فهم جداسازی و ته‌نشینی و انتقال ذرات در شیارها نیاز دارد. به‌منظور بررسی اثر نوع خاک و قدرت جریان بر اهمیت نسبی فرایندهای ناشی از روان آب و مرز بین فرایندها از نظر کلاس اندازه ذرات انتقالی، اثر ۶ قدرت جریان، در شیب ۲ درصد، روی ۵ نمونه خاک مختلف بررسی شد. نمونه‌ها در بستر فرسایشی با ابعاد  $۲.۵ \times ۰.۵ \times ۰.۵$  متر ریخته شد و به مدت ۴۰ دقیقه، تحت دبی جریان معین، تغییرات زمانی توزیع اندازه ذرات رسوب تعیین و بر مبنای آن فرایندهای انتقال ذرات تحلیل شد. نتایج این مطالعه مؤید وجود یک الگوی انتخابی وابسته به شرایط هیدرولیکی و انتقال ذرات با اندازه‌های متفاوت به‌وسیله مکانیسم‌های مختلف، از جمله جهش-تعلیق و چرخش، است. نتایج همچنین نشان داد کلاس اندازه‌ای با حداقل شدت انتقال، مرز بین جهش-تعلیق و چرخش، در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف، منحصر به همان خاک است و با افزایش قدرت جریان از ۰.۱۲ به ۰.۸ وات بر متر مربع تغییر نمی‌یابد.

کلیدواژگان: انتقال رسوب، چگالی ذرات، شیار، مدلهای فرسایش خاک.

### مقدمه

درک فرایندهای فرسایش و تهیه مدلهای فرسایش خاک به فهم جداسازی و ته‌نشینی و انتقال ذرات خاک در شیارها نیاز دارد (Polyakov and Nearing, 2003). توزیع اندازه ذرات خاک بر انتقال و ته‌نشینی رسوب تأثیر زیادی می‌گذارد. آگاهی از توزیع اندازه ذرات رسوب درک و فهم فرایندهای فرسایشی و انتقال رسوب و در نتیجه مدل‌سازی فرایندی را بهبود می‌بخشد (Shi et al, 2012). فرسایش خاک معمولاً به دو دسته کلی فرسایش شیبی و بین‌شیب تقسیم می‌شود (Lafren et al, 1991). ذرات خاک انتقال‌یافته (رسوب) ترکیبی از ذرات اولیه (شن، سیلت، رس) و ثانویه (خاک‌دانه‌ها) خاک است (Mitchell et al, 1983). توافق عمومی بر این است که در فرسایش بین‌شیب ذرات ریز به صورت انتخابی حمل می‌شوند، در حالی که در فرسایش شیبی، بعد از یک تنش برشی بحرانی خاص، مقدار این انتخابی‌بودن کمتر می‌شود (Proffitt and Rose, 1991; Malam Issa et al, 2006).

در جریان رودخانه‌ای ذرات انتقالی بسته به اندازه و شکل و چگالی ذره و ویسکوزیته و سرعت سیال با چهار مکانیسم لغزش، غلطش (چرخش)، جهش، و تعلیق جابه‌جا می‌شوند. در

مراحل آرام انتقال، لغزش و چرخش متداول‌ترین مکانیسم‌ها هستند؛ در حالی که در مراحل شدید، جهش و تعلیق وجه غالب انتقال ذرات‌اند (Allen, 1994).

در مطالعات فرسایش خاک و به‌ویژه در مدل‌سازی فرسایش ناشی از جریان (سطحی یا شیبی)، همانند مدل GUEST (Misra and Rose, 1996) و مدل WEPP (Foster et al, 1995)، توضیح مشخصی درباره مکانیسم انتقال ذرات نداده‌اند. از سوی دیگر، فقط یک حد آستانه یا بحرانی واحد برای جریان در نظر گرفته شده است که در قدرت جریان (مدل GUEST) یا تنش برشی جریان (مدل WEPP) بالاتر از آن کنده‌شدن و انتقال ذرات رخ می‌دهد. Moss et al (1979) اعلام کردند انتقال رسوب در فرسایش خاک نیز می‌تواند به بار معلق و جهشی و بستر تقسیم شود که هر یک با دامنه اندازه‌ای خاصی ارتباط دارند. نتایج مطالعه Asadi et al (2007a) نشان داد یک الگوی انتخابی در انتقال ذرات خاک به‌وسیله جریان سطحی وجود دارد. آن‌ها دلیل انتقال انتخابی ذرات با اندازه‌های مختلف را مقاومت متفاوت ذرات با اندازه‌های مختلف در مقابل انتقال (انتقال‌پذیری متفاوت ذرات) یا وجود فرایندهای مختلف انتقال برای ذرات با اندازه‌های مختلف اعلام کردند. Asadi et al (2007b) به این نتیجه رسیدند که توزیع اندازه ذرات رسوب به صورت دونمایی و شامل دو بخش ذرات خیلی ریز و متوسط تا

\* نویسنده مسئول: asadi@guiln.ac.ir

و بلک (Page et al, 1982)، و میزان کربنات کلسیم به روش تیتراسیون (Page et al, 1982) انجام شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های بررسی‌شده در جدول ۱ می‌آید. نمونه خاک گیلوان، خاک مارنی، شور- سدیمی بدون خاک‌دانه پایدار در آب، نمونه خاک جنگلی با خاک‌دانه‌های بسیار پایدار و با میزان ماده آلی زیاد نمونه بکندی آهکی است. نمونه خاک لیلاکوه رسوبات شنی سیلابی رودخانه‌ای است. واکنش (pH) نمونه خاک‌های مطالعه‌شده خنثی و فقط در نمونه جنگلی اندکی اسیدی است.

#### اجرای آزمایش‌ها

برای انجام‌دادن این تحقیق و برای شبیه‌سازی شیار از دستگاه فلوم فرسایشی آزمایشگاه فیزیک و فرسایش خاک دانشگاه گیلان استفاده شد که توصیف آن در (Asadi et al, 2011) آمده است. فلوم مذکور متشکل از کانالی شفاف به ابعاد  $۲/۵ \times ۰/۲ \times ۰/۲$  متر است که روی چارپایه‌ای فلزی قرار می‌گیرد و یک منبع آب جریان مورد نیاز را با دبی ثابت در داخل کانال تأمین می‌کند (شکل ۱). فلوم دارای لوازم جانبی شامل آرام‌کننده جریان، قطعات نگهدارنده خاک، هموارگر خاک، و وسیله اندازه‌گیری عمق آب نیز هست. در تحقیق حاضر برای انجام‌دادن آزمایش‌ها و به‌منظور یکنواختی جریان و ممانعت از شیاری شدن جریان در فلوم عرض کانال با استفاده از یونولیت به  $۰/۰۵$  متر تغییر یافت. آزمایش‌های قبلی (Asadi et al, 2011) نشان داد چنانچه عرض جریان زیاد باشد، شیارهای کوچکی در بستر ایجاد می‌شود که موجب تمرکز آب و غیر یکنواختی جریان می‌شود و امکان محاسبه میانگین تنش برشی و قدرت وجود نخواهد داشت. به‌منظور جلوگیری از نفوذ آب به زیر یونولیت، یونولیت با استفاده از چسب آکواریوم به کف و دیواره‌ها چسبانده و آب‌بندی شد. برای انجام‌دادن هر آزمایش، به مقدار لازم از نمونه خاک‌های گذرانده‌شده از الک ۴ میلی‌متری (به جز نمونه خاک شماره ۵) در فلوم ریخته شد و پس از هموارکردن دقیق با یک جریان آرام غیر فرساینده (دبی  $< ۵$  میلی‌لیتر بر ثانیه در شیب صفر) به مدت یک شب اشباع شد. برای نمونه خاک شماره ۵ (رسوبات شنی لیلاکوه لنگرود) از الک  $۲/۳۶$  میلی‌متری استفاده شد. آزمایش‌های قبلی نشان داد به‌دلیل چگالی بالای ذرات شن، در صورت عبور دادن نمونه از الک ۴ میلی‌متری، در دامنه شدت جریان‌های بررسی‌شده در این تحقیق، هیچ‌گونه انتقال ذره‌ای صورت نمی‌گیرد (Asadi et al, 2011). بعد از پایان هر آزمایش، خاک از داخل بستر به آرامی تخلیه شد و در صورت نیاز بستر فلوم، با استفاده از آب، به صورت کامل شسته و پس از خشک‌شدن کامل بستر دوباره فلوم با خاک پر شد.

درشت است. آن‌ها نتیجه گرفتند فرایندهای مختلف موجب انتقال ترجیحی ذرات با اندازه‌های مختلف می‌شوند. همچنین نتایج (Asadi et al, 2011)، که بر دو نوع خاک و در دامنه‌ای محدود از قدرت جریان ( $< 0.5 \text{ W m}^{-2}$ ) انجام شد، نشان داد حداقل دو فرایند متفاوت جهش- تعلیق و چرخش در انتقال ذرات به‌وسیله جریان مؤثر است که اهمیت نسبی آن‌ها به خصوصیات جریان، به‌ویژه قدرت جریان و بافت خاک، وابسته است. به‌طور کلی رابطه‌ای قوی و محکم بین ارتباط رسوب با چرخش و قدرت جریان وجود دارد (Shi et al, 2012) و بافت خاک عامل اصلی توزیع اندازه ذرات رسوب است (Young, 1980). Shi et al (2012) نشان دادند مکانیسم اصلی در فرسایش بین‌شیاری جهش- تعلیق ذرات ریز است؛ در حالی که بعد از ایجاد شیار از میزان فعالیت این مکانیسم کاسته می‌شود و انتقال به‌وسیله فرایند چرخش، که مکانیسم غالب در انتقال ذرات بزرگ‌تر است، غالب می‌شود. اهمیت نسبی مکانیسم‌های انتقال رسوب وابسته به قدرت جریان است؛ طوری که اهمیت نسبی جهش- تعلیق با افزایش قدرت جریان کم می‌شود و چرخش در قدرت جریان بالا اهمیت بیشتری می‌یابد (Asadi et al, 2011) نتایج حاکی از آن است که جداسازی و انتقال در شدت‌های مختلف با مکانیسم‌هایی متفاوت انجام می‌پذیرد (Shi et al, 2012).

با توجه به مطالعات انجام‌شده و از آنجا که اهمیت نسبی فرایندهای انتقال رسوب به‌وسیله جریان شیاری و نیز مرز بین ذراتی که با مکانیسم جهش- تعلیق یا چرخش منتقل می‌شوند در خاک‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوت (کلاس اندازه‌ای ذرات متفاوت) و شرایط هیدرولیکی مختلف (قدرت جریان‌های متفاوت) هنوز به‌روشنی مشخص نیست، هدف تحقیق حاضر بررسی مکانیسم‌های انتقال ذرات و اهمیت نسبی آن‌ها در ۵ نمونه خاک با توزیع اندازه متفاوت تحت دبی‌های مختلف جریان بود.

#### مواد و روش‌ها

##### نمونه‌برداری از خاک و آنالیز نمونه‌ها

نمونه خاک‌ها از ۵ منطقه مختلف (جدول ۱) با ویژگی‌های متفاوت انتخاب گردید. نمونه‌برداری به صورت هم‌زمان و در یک فصل انجام شد. نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک سطحی به‌دست آمد. پس از گذراندن زیرنمونه‌ای از خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متری، آنالیز فیزیکی و شیمیایی بافت خاک به روش هیدرومتر (Klute, 1986)، توزیع اندازه ذرات ثانویه به روش الک تر (Blake and Hartge, 1986)، میزان ماده آلی به روش والکی

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها

شماره خاک	منطقه نمونه برداری	مشخصات	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	CCE (%)	OM (%)	pH	*MWD (mm)	*EC (dS m <sup>-1</sup> )
۱	بکندی (کوهین فزوین)	زمین زراعی	۴۹°۳۵'	۳۶°۲۲'	۲۱٫۶	۱٫۱۰	۷٫۶۳	۱٫۰۲	۰٫۵۹
۲	توتکابن (رستم آباد گیلان)	زمین زراعی	۴۹°۳۱'	۳۶°۵۳'	۸٫۸	۲٫۴۴	۷٫۴۱	۱٫۲۶	۰٫۶
۳	گیلوان (مرز گیلان- زنجان)	زمین بایر	۴۹°۱۵'	۳۶°۴۵'	۱۶٫۵	۰٫۱۴	۸٫۴۴	۱٫۶۴	۱۰٫۲۴
۴	سدتاریک (امامزاده هاشم گیلان)	جنگل	۴۹°۳۳'	۳۶°۵۹'	۴	۵٫۷۱	۶٫۶۵	۳٫۶۲	۲٫۳۴
۵	لیلاکوه (لنگرود گیلان)	رسوبات رودخانه‌ای	۵۰°۰۷'	۳۷°۱۰'	۲	۰	۷٫۲۳	۱٫۹۴	۰٫۲۵

CCE کربنات کلسیم معادل، OM ماده آلی، MWD میانگین وزنی قطر ذرات ثانویه (خاکدانه‌های) کوچکتر از ۴ میلی‌متر و رسوبات شنی لیلکوه کوچکتر از ۲٫۳۶ میلی‌متر، EC هدایت الکتریکی عصاره اشباع

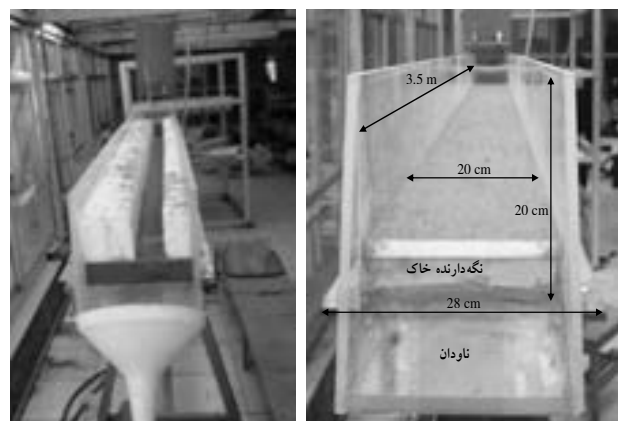
شیب و دبی در همه آزمایش‌ها ثابت است. همه آزمایش‌ها در شرایط زیر بحرانی (عدد فرود کوچکتر از ۱) انجام شد. سرعت و عمق جریان در خاک‌های مختلف اختلاف اندکی دارند. پس از نمونه برداری، نمونه‌ها روی سری الک با اندازه‌های ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۵، ۰٫۲۵، ۰٫۱۲۵، ۰٫۰۷۴، و ۰٫۰۴۴ میلی‌متر منتقل گردید و پس از الک کردن در زیر آب (الک تر) و انتقال ذرات به کروزه در آن با دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. سپس مقدار هر نمونه روی الک بر حسب گرم به دست آمد. مقدار خاک عبور یافته از ریزترین الک نیز با تعیین غلظت و حجم آب عبوری به دست آمد. فقط در یک نمونه خاک (توتکابن) بنا به ضرورت و به دلیل اینکه بیش از ۱۰ درصد جرم خاک ذرات کوچکتر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر بود برای تعیین اندازه خاکدانه‌های کوچکتر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر از داده‌های هیدرومتر استفاده شد.

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها

از آنجا که در تحقیق حاضر فقط فرایندهای ناشی از جریان (در غیاب بارندگی) بررسی شده و خاک قبل از آزمایش اشباع شده، اثر شکسته شدن خاکدانه‌ها در هنگام آزمایش بر توزیع اندازه ذرات رسوب منتهی یا ناچیز است. اثر توزیع اندازه ذرات (خاکدانه‌ها) خاک اصلی را می‌توان با تقسیم بندی توزیع اندازه ذرات خاک به n کلاس قطری با جرم اولیه یکسان (برابر) حذف کرد (Asadi et al, 2007 a; Asadi et al, 2011). بر این اساس و به منظور تفسیر نتایج و توضیح فرایندهای دخیل در فرسایش، محاسبات و تبدیلهای زیر انجام شد:

الف) منحنی توزیع اندازه ذرات ثانویه خاک در ۳ تکرار با آزمایش الک تر تعیین شد. با استفاده از منحنی توزیع اندازه ذرات ثانویه، با روشی که Asadi et al (2007a) شرح داده‌اند، هر نمونه خاک به ۱۰ کلاس قطری به گونه‌ای تقسیم شد که هر کلاس دارای جرم برابر در خاک اصلی باشد. به دیگر سخن، در این روش برای هر خاک تعداد ۱۰ مرز قطری کلاس اندازه‌ای به گونه‌ای تعریف شد که هر کلاس یک‌دهم جرم کل خاک را شامل شود.

آزمایش‌های فرسایش برای ۵ نمونه خاک تحت ۶ دبی جریان مختلف (در دامنه ۰٫۰۳ تا ۰٫۲ لیتر در ثانیه) و در شیب ۲ درصد انجام شد. این شرایط (ترکیب دبی‌ها و شیب) برای دستیابی به قدرت جریان‌های مختلف در دامنه ۰٫۱ تا ۱ وات بر متر مربع و با توجه به مطالعات قبلی (Asadi et al, 2007 a and b; Asadi et al, 2011) انتخاب شدند. دبی‌های مورد نظر با اندازه‌گیری‌های متوالی و میزان شیب نیز با شیب‌سنج مخصوص فلوم تنظیم شد. قدرت جریان در واحد سطح (ω) برابر با حاصل ضرب تنش برشی (τ) در میانگین سرعت جریان (V) است (ω=τV= ρgShV= ρgSq) که ρ دانسیته آب، g شتاب ثقل، S شیب بستر، h عمق جریان، و q دبی در واحد عرض (است).



شکل ۱. کانال و بستر فرسایشی مورد استفاده

پس از اعمال تیمار مورد نظر، در خروجی فلوم نمونه برداری از روان آب خروجی انجام شد و نمونه‌های روان آب در زمان‌های ۱، ۳، ۶، ۱۰، ۲۰، ۴۰ دقیقه هر یک به میزان ۲ تا ۵ لیتر جمع‌آوری گردید. در فواصل نمونه برداری عمق و سرعت جریان نیز اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عمق عمق‌سنج مخصوص فلوم و برای تعیین سرعت جریان روش رنگ‌سنجی با ۳ تکرار به کار رفت. دامنه تغییرات برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های مختلف در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۲. دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های مختلف (شیب ۰٫۵ تا ۲ درصد، دبی ۳۰ تا ۲۰۰ میلی‌لیتر بر ثانیه، دبی در واحد عرض ۶ تا ۴۰ متر مربع بر ثانیه)

نمونه خاک	عمق جریان (mm)	سرعت ( $m s^{-1}$ )	عدد رینولدز	عدد فرود
بکندی	۶-۱۴	۰٫۰۶-۰٫۲۱	۳۷۰-۲۹۸۲	۰٫۲۵-۰٫۷۱
توتکابن	۶-۲۰	۰٫۰۹-۰٫۲۳	۷۸۰-۳۴۹۱	۰٫۲۸-۰٫۸۳
گیلوان	۷-۱۶	۰٫۱۰-۰٫۲۶	۷۱۷-۳۹۴۱	۰٫۳۳-۰٫۷۱
جنگلی (سدتاریک)	۷-۲۰	۰٫۰۷-۰٫۲۷	۶۵۳-۴۰۷۵	۰٫۲۰-۰٫۷۰
لیلاکوه	۵-۲۰	۰٫۰۶-۰٫۲۷	۶۷۷-۳۵۴۰	۰٫۲۱-۰٫۸۳

خاک دو تفاوت اساسی با خاک بکندی و همچنین سایر خاک‌های آزمایش‌شده دارد. اول اینکه نقطه اوج دوم خیلی ضعیف است و جز در یکی دو مورد به وضوح دیده نمی‌شود؛ به گونه‌ای که می‌توان توزیع اندازه ذرات رسوب را در این خاک بیشتر یک‌نمایی دانست. دومین تفاوت مربوط به نقطه اوج اول است که در این خاک، برخلاف خاک بکندی، متشکل از سه کلاس اندازه‌ای است. به بیان دیگر، با افزایش قدرت جریان میزان ذرات ریز کاهش یافته، اما میزان ذرات درشت تغییر برجسته‌ای نکرده است. شاید علت وجود ذرات ریز دانه‌بندی این خاک باشد. چهار کلاس اندازه‌ای اول، برخلاف سایر نمونه‌ها، کوچک‌تر از ۰٫۰۸ میلی‌مترند.

در شکل ۴ نتایج خاک گیلوان می‌آید. در این مورد، با افزایش قدرت جریان، توزیع اندازه ذرات رسوب به تدریج از حالت یک‌نمایی به حالت دونمایی تغییر می‌کند؛ طوری که در زمان ۱ دقیقه میزان ذرات ریز (کلاس ۰ تا ۰٫۰۴ میلی‌متر) از حدود ۶۰ درصد در قدرت جریان ۰٫۱۲ وات بر متر مربع به کمتر از ۴۰ درصد در قدرت جریان ۰٫۸ وات بر متر مربع کاهش یافته و در مقابل میزان ذرات درشت (کلاس ۱٫۵۶ تا ۴ میلی‌متر) از حدود ۵ درصد به ۲۰ درصد افزایش یافته است. شش کلاس میانی اندازه ذرات (از ۰٫۲ تا ۱٫۱۲ میلی‌متر) در همه قدرت جریان‌ها به‌طور کم‌وبیش یکسان دارای حداقل شدت انتقال‌اند. در نمونه خاک جنگلی (شکل ۵) توزیع اندازه ذرات رسوب، همچون خاک توتکابن، همواره یک‌نمایی است؛ با این تفاوت اساسی که نقطه اوج مربوط به کوچک‌ترین کلاس اندازه‌ای (۰ تا ۰٫۰۶۵ میلی‌متر) است و با افزایش قدرت جریان میزان نسبی ذرات درشت‌تر به‌کندی و حداکثر تا ۱۰ درصد افزایش یافت. این نمونه خاک خاک‌دانه‌های درشت و کاملاً پایدار در آب دارد.

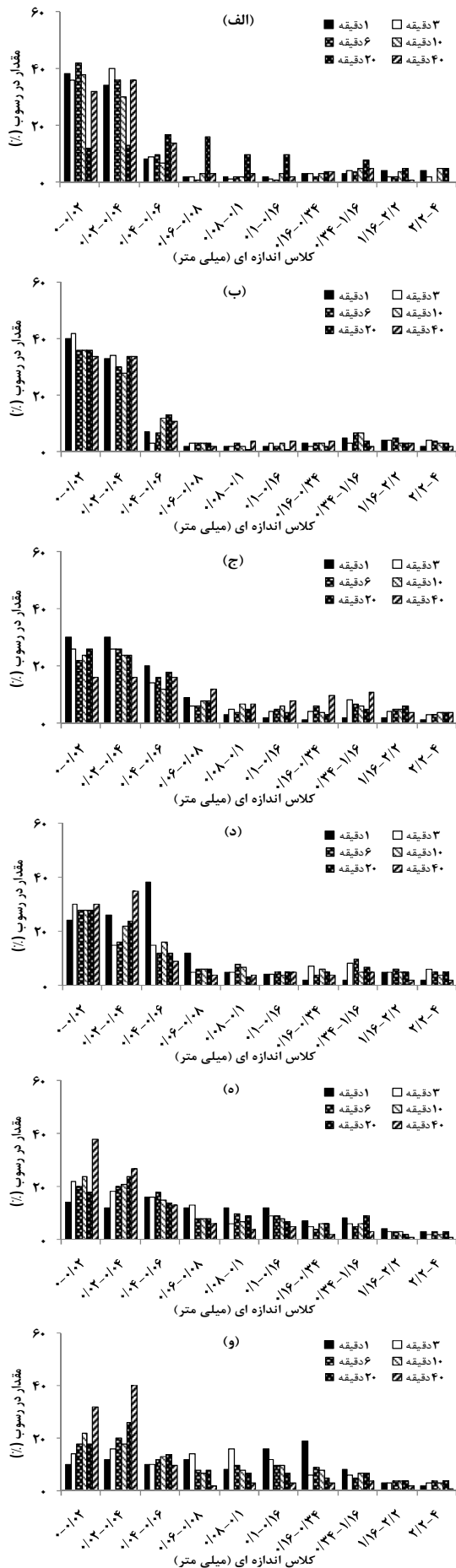
در نمونه رسوب رودخانه‌ای (شن) حالتی شاخص و کلاسیک از تغییرات دیده می‌شود. در این مورد، همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در کمترین قدرت جریان آزمایش‌شده

(ب) برای خاک‌های بررسی‌شده در آزمایش‌های مختلف، مقدار هر یک از کلاس‌های قطری ده‌گانه در رسوب خروجی از فلوم در زمان‌های مختلف تعیین شد. برای این منظور از منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب در زمان‌های مختلف و مرزهای هر کلاس قطری تعیین‌شده در قسمت الف استفاده شد. در یک نمونه خاک (بکندی)، به دلیل اینکه بیش از ۱۰ درصد جرم خاک ذرات کوچک‌تر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر (کوچک‌ترین الک مورد استفاده) بود، برای تعیین اندازه خاک‌دانه‌های کوچک‌تر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر از داده‌های هیدرومتر استفاده شد. در یک نمونه خاک (توتکابن)، به دلیل اینکه بیش از ۱۰ درصد جرم خاک را ذرات کوچک‌تر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر (کوچک‌ترین الک مورد استفاده) تشکیل می‌داد، برای تعیین اندازه خاک‌دانه‌های کوچک‌تر از ۰٫۰۴۴ میلی‌متر از داده‌های هیدرومتر استفاده شد.

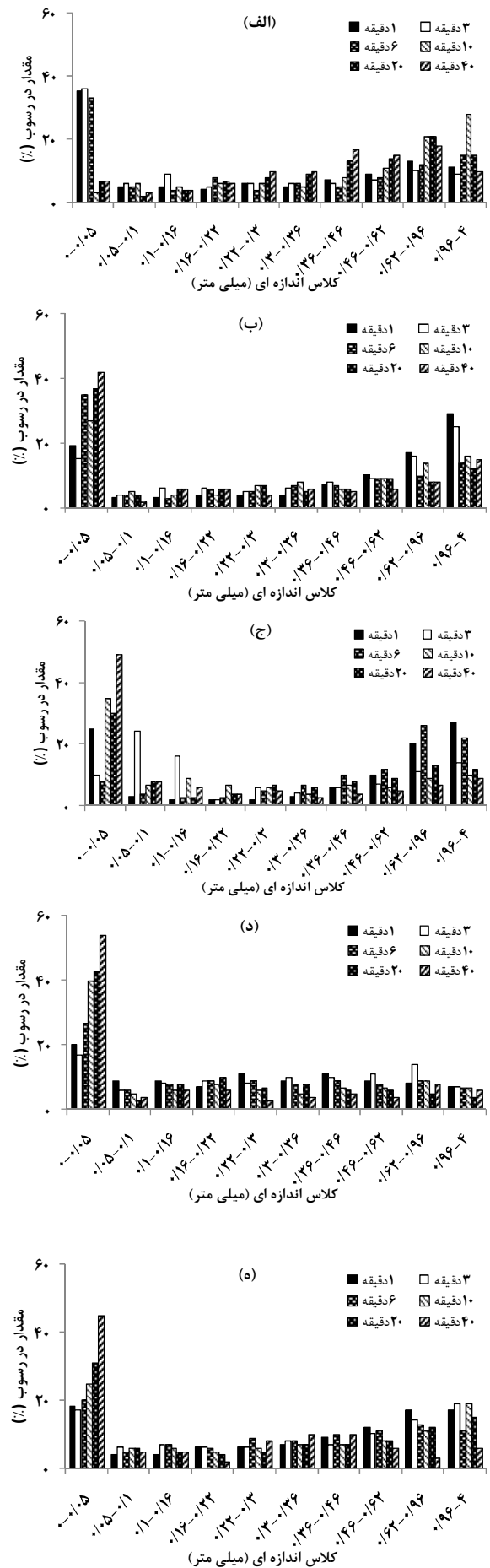
## یافته‌ها و بحث

تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب با زمان بر حسب درصد هر یک از کلاس‌های ده‌گانه برای نمونه خاک‌های مطالعه‌شده در قدرت جریان‌های مختلف در شکل‌های ۲ تا ۶ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۲ برای نمونه خاک بکندی مشاهده می‌شود، توزیع اندازه ذرات رسوب هرچند تغییرات دینامیک دارد، به‌طور کلی دونمایی (دارای دو نقطه اوج) است. در زمان ۱ دقیقه میزان ذرات ریز (۰ تا ۰٫۰۵ میلی‌متر) در قدرت جریان ۰٫۲ وات بر متر مربع از حدود ۳۵ درصد به ۱۸ درصد در قدرت جریان ۰٫۸ وات بر متر مربع کاهش یافته است، در حالی که میزان ذرات درشت (۰٫۹۶ تا ۴ میلی‌متر) از حدود ۱۰ درصد در قدرت جریان ۰٫۲ وات بر متر مربع به ۱۸ درصد در قدرت جریان ۰٫۸ وات بر متر مربع افزایش یافته است. در همه موارد، کلاس‌های اندازه‌ای ۰٫۰۵ تا ۰٫۲۲ میلی‌متر دارای حداقل شدت انتقال‌اند. در همه زمان‌ها روند تقریباً مشابه تکرار شده است.

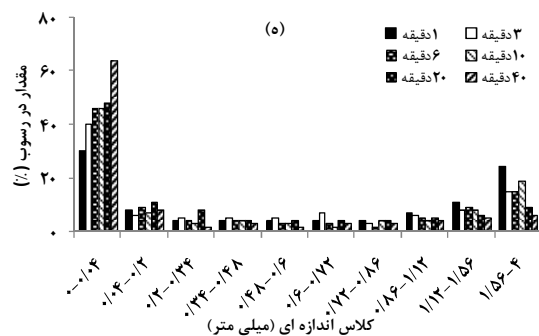
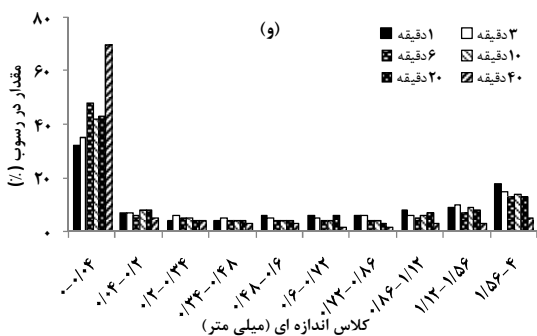
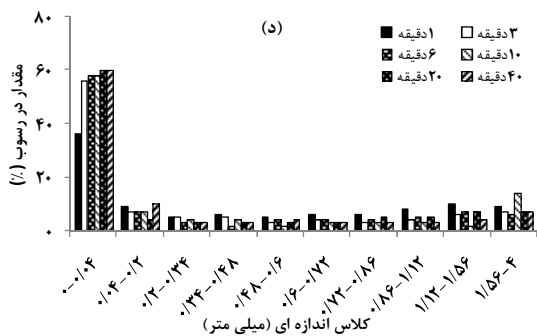
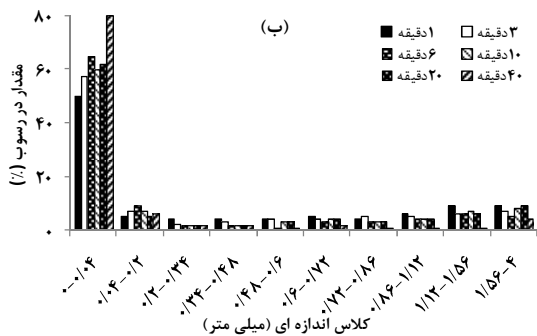
شکل ۳ تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب را در نمونه خاک توتکابن نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، این



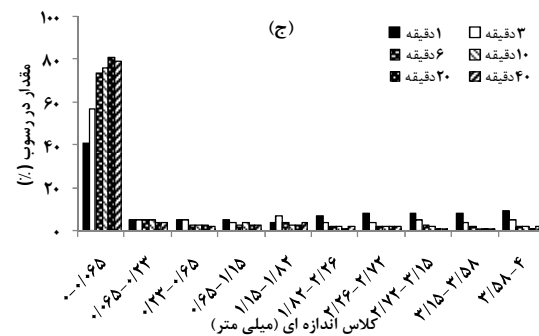
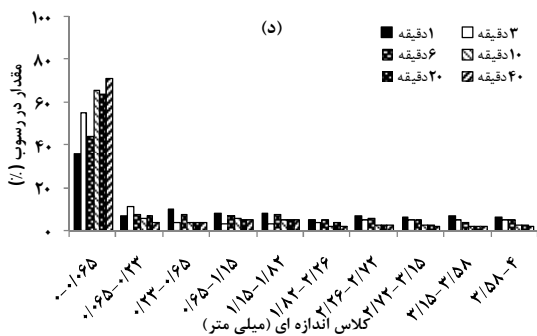
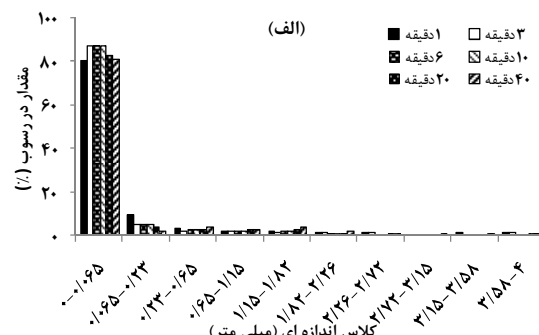
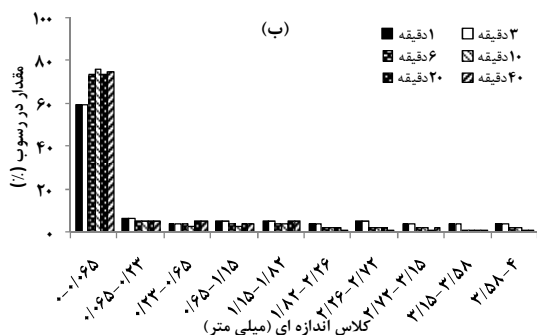
شکل ۳. تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب در نمونه خاک توکتابن در قدرت جریان‌های (الف) ۰/۲، (ب) ۰/۳، (ج) ۰/۴، (د) ۰/۶، (ه) ۰/۸، (و) ۰/۱ وات بر متر مربع



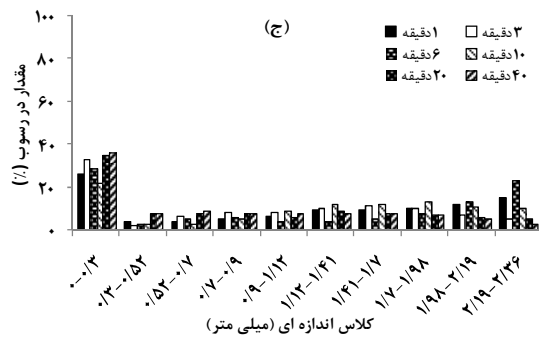
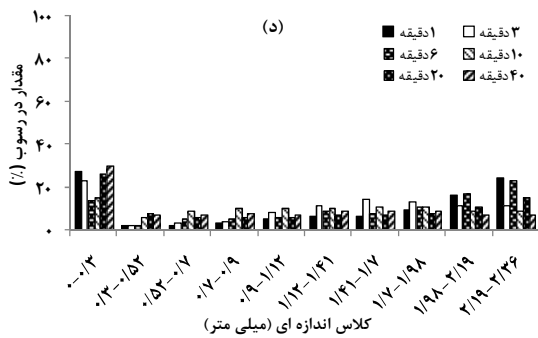
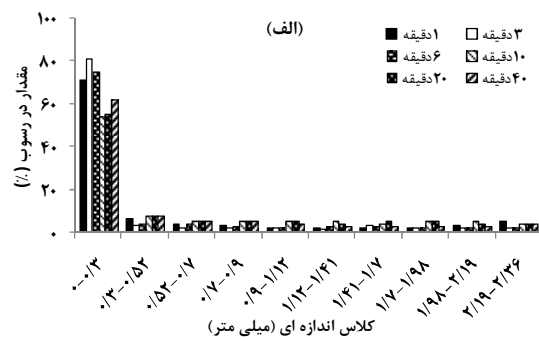
شکل ۴. تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب در نمونه خاک بکندی در قدرت جریان‌های (الف) ۰/۲، (ب) ۰/۳، (ج) ۰/۴، (د) ۰/۶، (ه) ۰/۸ وات بر متر مربع



شکل ۴. تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب در نمونه خاک گیلوان در قدرت جریان‌های الف (۰٫۱۲، ب) ۰٫۲، ج) ۰٫۳، د) ۰٫۴، ه) ۰٫۶، و و) ۰٫۸ وات بر متر مربع



شکل ۵. تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب با زمان در نمونه خاک جنگلی در قدرت جریان‌های الف (۰٫۳، ب) ۰٫۴، ج) ۰٫۶، د) ۰٫۸ وات بر متر مربع



شکل ۶. تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب با زمان در نمونه خاک شنی در قدرت جریان‌های الف (۰٫۲، ب) (۰٫۳، ج) (۰٫۴، د) (۰٫۶، ه) و ۰٫۸ وات بر متر مربع



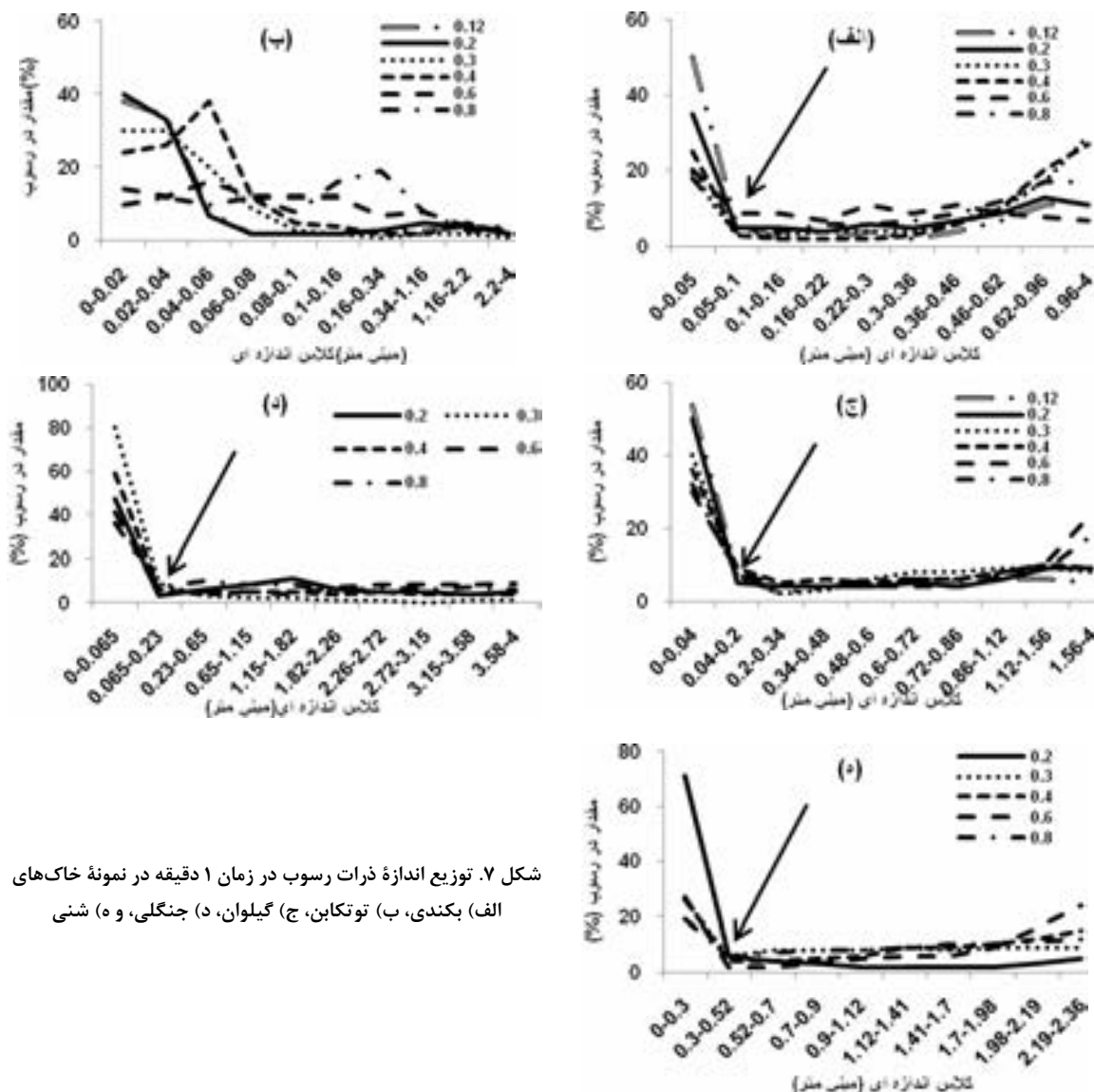
مختلفی برای انتقال ذرات وجود دارد. فرایندهای مختلف انتقال ذرات در دامنه‌های مختلفی از قدرت جریان فعال می‌شوند. این موضوع از تغییر الگو و شدت انتقال ذرات با اندازه‌های مختلف با تغییر شدت و در نتیجه قدرت جریان قابل استنباط است. از سوی دیگر، فرایندهای مختلف انتقال ذرات موجب انتقال ترجیحی ذرات با اندازه‌های مشخص می‌شوند؛ زیرا مثلاً شدت انتقال ذرات درشت (بزرگ‌تر از ۰٫۵ میلی‌متر) در دبی‌های کم ناچیز است، اما با افزایش دبی (قدرت) جریان و در نتیجه فعال‌شدن فرایندی دیگر افزایشی قابل توجه می‌یابد و این در حالی است که در هر دو حالت شدت انتقال ذرات ریز تا متوسط (۰٫۱۵ تا ۰٫۵ میلی‌متر) ناچیز و بدون تغییر باقی می‌ماند. نوع و ویژگی‌های نمونه خاک تأثیر زیادی بر ظهور و بروز و شدت و ضعف این فرایندها دارد. این موضوع تفاوت الگوی توزیع اندازه ذرات رسوب را در قدرت جریان‌های مختلف در ۵ نمونه خاک آزمایش شده نشان می‌دهد. به‌علاوه اندازه خاصی از ذرات (۰٫۵ تا ۰٫۱۵ میلی‌متر) در همه شرایط (قدرت جریان و خاک‌های مختلف) در مقابل انتقال مقاومت می‌کند و کم‌وبیش با شدت

(۰٫۲ وات بر متر مربع)، توزیع اندازه ذرات رسوب به‌طور واضح یک‌نمایی است و ریزترین کلاس اندازه‌ای به‌تنهایی، به‌ویژه در زمان‌های آغازین آزمایش، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد جرم رسوب را تشکیل می‌دهد. با افزایش قدرت جریان به ۰٫۳ وات بر متر مربع، سهم این کلاس به کمتر از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد و سهم سایر کلاس‌های اندازه‌ای به‌طور تقریباً یکسان به ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در قدرت جریان‌های بالاتر از ۰٫۴ و ۰٫۶ وات بر متر مربع، توزیع اندازه ذرات رسوب به‌طور واضح دونمایی است. در نهایت در بالاترین قدرت جریان به‌کاررفته (۰٫۸ وات بر متر مربع) به‌نظر می‌رسد توزیع اندازه ذرات رسوب به سمت یکنواخت‌شدن تمایل یافته است. نتایج این نمونه از آنجا اهمیت بیشتری می‌یابد و سایر نتایج را تأیید می‌کند که بازتولید ذرات ریزتر (تغییر توزیع اندازه ذرات بستر) در اثر فرایندهایی مثل شکستن خاک‌دانه به‌طور قطع در این مورد وجود ندارد؛ زیرا خاک‌دانه‌ای برای شکستن وجود ندارد.

نتایج هر ۵ نمونه خاک مطالعه‌شده در قدرت جریان‌های مختلف (شکل‌های ۲ تا ۶) بیانگر آن است که فرایندهای

برای مقایسه و مشخص شدن بهتر نتایج و توجه ویژه به دامنه اندازه ذرات با حداقل شدت انتقال، توزیع اندازه ذرات رسوب به صورت مجزا در زمان ۱ دقیقه برای هر ۵ نمونه خاک در قدرت جریان‌های مختلف استخراج و به صورت منحنی در شکل ۷ رسم شد. از آنجا که در ابتدای آزمایش شدت فرسایش بیشتر بود و جداسازی و انتقال ذرات با وضوح بیشتری مشاهده شد و از سوی دیگر توزیع اندازه ذرات بستر هنوز نسبت به حالت اولیه تغییر چندانی نکرده بود، به زمان ۱ دقیقه بسیار توجه شد. نقطه حداقل شدت انتقال را می‌توان مرز بین دو مکانیسم جهش- تعلیق و چرخش در نظر گرفت (Asadi et al, 2011) و بر این اساس اثر قدرت جریان و نوع خاک را بر اهمیت نسبی فرایندهای فرسایش بررسی کرد.

پایینی منتقل می‌شود. وجود الگوی انتخابی در انتقال ذرات خاک به وسیله جریان و وابستگی آن به شرایط هیدرولیکی در مطالعات مختلف (Basic et al, 2002; Legue'ois et al, 2004; Hogarth et al, 2004; Malam et al, 2006; Tromp-Asadi et al, 2008) مشاهده شده است. (van Meerveld et al, 2007b)، ضمن تأیید الگوی انتخابی انتقال ذرات تئوری، انتقال ذرات ریز با مکانیسم جهش- تعلیق و انتقال ذرات درشت با مکانیسم چرخش را مطرح کردند. محققان دیگر (Shi et al, 2012) نیز آن را تأیید کردند. اهمیت نسبی این مکانیسم‌ها به قدرت جریان و البته نوع و ویژگی‌های خاک وابسته است؛ طوری که اهمیت نسبی جهش- تعلیق با افزایش قدرت جریان کم می‌شود و چرخش در قدرت جریان بالا اهمیت بیشتری می‌یابد (Asadi et al, 2011).



شکل ۷. توزیع اندازه ذرات رسوب در زمان ۱ دقیقه در نمونه خاک‌های (الف) بکندی، (ب) توتکابن، (ج) گیلوان، (د) جنگلی، و (ه) شنی

۱. توزیع اندازه ذرات رسوب دینامیکی است و شدت و ضعف آن وابسته به نوع خاک و قدرت جریان است.
۲. کلاس اندازه‌ای که حداقل شدت انتقال را دارد تحت

مرز بین دو مکانیسم در شکل ۷ برای نمونه خاک‌های مختلف با فلش مشخص شده است. شواهد ارائه‌شده در این شکل نشان می‌دهد:



### نتیجه‌گیری

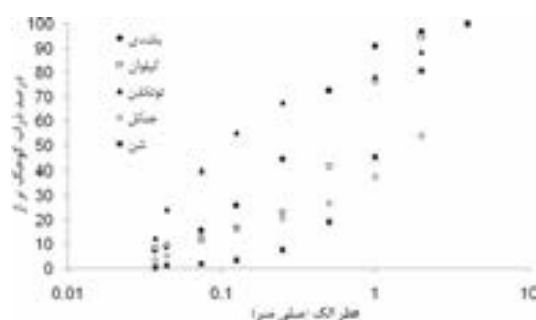
نتایج بیانگر آن است که یک الگوی انتخابی در انتقال ذرات خاک به وسیله جریان وجود دارد که وابسته به شرایط هیدرولیکی جریان است (شکل‌های ۲ تا ۶). فرایندهای مختلفی برای انتقال ذرات وجود دارد و فرایندهای مختلف انتقال ذرات موجب انتقال ترجیحی ذرات با اندازه‌های مشخص می‌شوند. فرایند غالب در انتقال ذرات فرایند جهش-تعلیق و چرخش است (Asadi et al, 2011; Shi et al, 2012). اهمیت نسبی این مکانیسم‌ها وابسته به قدرت جریان و البته نوع و ویژگی‌های خاک است؛ طوری که اهمیت نسبی جهش-تعلیق با افزایش قدرت جریان کم می‌شود و چرخش در قدرت جریان بالا اهمیت بیشتری می‌یابد (شکل ۷). با افزایش قدرت جریان از میزان ذرات ریز کاسته می‌شود و میزان مشارکت (سهم نسبی) کلاس‌های اندازه‌ای درشت در رسوب افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، اهمیت نسبی فرایند چرخش با افزایش قدرت جریان زیادتر می‌شود. نتایج به‌طور مشخص اهمیت نسبی فرایندهای انتقال رسوب را نشان می‌دهد. در توزیع‌های دونمایی، نقطه حداقل شدت انتقال را می‌توان مرزی دانست که ذرات کوچک‌تر از آن عمدتاً با مکانیسم جهش-تعلیق و ذرات بزرگ‌تر از آن عمدتاً با مکانیسم چرخش منتقل می‌شوند. کلاس اندازه‌ای با حداقل شدت انتقال (نقطه حداقل شدت انتقال) در هر خاک مخصوص و منحصر به همان خاک است و تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان و انتقال سایر ذرات با اندازه بزرگ‌تر یا کوچک‌تر قرار نمی‌گیرد (شکل ۷) و فقط اهمیت نسبی دو مکانیسم تغییر می‌یابد. این نتایج در دامنه قدرت جریان ۰/۲ تا ۰/۸ وات بر متر مربع به‌دست آمد و برای قدرت جریان‌های بالاتر باید آزمایش‌های بیشتری انجام شود.

### REFERENCES

- Allen, J. R. L. (1994). Fundamental properties of fluids and their relation to sediment transport processes. In: K. Pye (ed.), *Sediment Transport and Depositional Processes*, Chapter 2, Blackwell Scientific Publications. pp 25-60.
- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C. W., Yu, B. and Hussein, J. (2007a). An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream powers. *J. of Hydrology*, 342, 134-142.
- Asadi, H., Ghadiri, H., Rouhipour, H. and Rose, C.W. (2007b). Interrill soil erosion processes and their interaction in low slopes. *Earth Surface Processes and Landform*, 32(5), 711-724.
- Asadi, H., Moussavi, S. A., Ghadiri, H. and Rose, C.W. (2011). Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *J. of Hydrology*, 406, 73-81.
- Basic, F., Kistic, I., Nestroy, O., Mesic, M. and Butorac, A. (2002). Particle size distribution (texture) of

شرایط هیدرولیکی جریان و شدت انتقال ذرات بزرگ‌تر یا کوچک‌تر قرار نمی‌گیرد و برای هر نوع خاک مختص به همان خاک است. به‌طور کلی کلاس اندازه‌ای با حداقل شدت انتقال (یا با حداکثر مقاومت در مقابل انتقال) در دامنه ۰/۵ تا ۰/۵ میلی‌متر قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش قدرت جریان میزان مشارکت (سهم نسبی) کلاس‌های اندازه‌ای درشت در رسوب افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، اهمیت نسبی فرایند چرخش با افزایش قدرت جریان زیادتر می‌شود.

بین نمونه خاک‌های آزمایش‌شده رفتار فرسایشی نمونه خاک منطقه توتکابن به‌طور استثنای متفاوت است. همان‌گونه که در شکل ۷ ب مشاهده می‌شود، نمی‌توان مرز مشخصی بین فرایندهای مختلف انتقال ذرات تعیین کرد. دلیل این موضوع شاید توزیع اندازه ذرات خاص و متفاوت این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها باشد. توزیع اندازه ذرات این خاک بیشتر در محدوده کلاس‌های اندازه‌ای ریز است. مقایسه توزیع اندازه ذرات در نمونه خاک‌های مطالعه‌شده در شکل ۸ می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه خاک توتکابن ذرات ریز بیشتری دارد. شاید بتوان علت رفتار متفاوت نمونه خاک توتکابن را نسبت به سایر نمونه‌های مطالعه‌شده با این موضوع مرتبط دانست.



شکل ۸. توزیع اندازه ذرات ثانویه در نمونه خاک‌های مطالعه‌شده

eroded soil material. *Journal of Agronomy Crop Science*, 188, 311-322.

- Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986). Bulk Density, in A. Klute, (ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9 (2nd ed.), pp. 363-375.
- Foster, G. R., Flanagan, D. C., Nearing M. A., Lane L. J., Risse M. and Finkner, S. C. (1995). Hillslope erosion component. Chapter 11 In: D. C. Flanagan, and M. A. Nearing (eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation*. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana. 11.1-11.12.
- Hogarth, W. L., Rose, C. W., Parlange, J. Y., Sander, G. C. and Carey, G. (2004). Soil erosion due to rainfall impact with no inflow: a numerical solution with spatial and temporal effects of

- sediment settling velocity characteristics. *J. Hydrol*, 294, 229–240.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
- Lafren, J. M., Lane, L. J. and Foster, G. R. (1991). WEPP: a new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46, 34–38.
- Legue'ois, S. and Bissonnais, Y. L. (2004). Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surf. Processes Landforms*, 29, 1117–1129.
- Malam Issa, O., Bissonnais, Y. L. Planchon, O. Favis-Mortlock, D., Silvera, N. and Wainwright, J. (2006). Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment. *Earth Surf. Processes Landforms*, 31, 929–939.
- Misra, R. K. and Rose C. W. (1996). Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *Euro. J. of Soil Sci.* 47:593-604.
- Mitchell, J. K., Mostaghimi, S. and Pound, M. (1983). Primary particle and aggregate size distribution of eroded soil from sequenced rainfall events. *Trans. ASAE* 26, 1773–1777.
- Moss, A. J., Walker, P. H. and Hutka, J. (1979). Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows: An experimental study. *Sediment Geol.* 22, 165–184.
- Page, A. L., Miller, R. H. and Keeny, D. R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, Part II, Chemical and Microbiological Properties American Society of Agronomy. Inc. Soil Sci. Am. Madison, Wisconsin, USA.
- Polyakov, V. O. and Nearing, M. A. (2003). Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena* 51, 33–43.
- Proffitt, A. P. B., and Rose, C. W. (1991). Soil erosion processes: II. Settling velocity characteristics of eroded sediment. *Aust. J. Soil Res.* 29, 685–695.
- Shi, Z. H., Fang, N. F., Wu, F. Z., Wang, L., Yue, B. J. and Wu, G. L. (2012). Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *J. of Hydrology*, 454–455, 123–130.
- Tromp-van Meerveld, H. J., Parlange, J. Y., Barry, D. A., Tromp, M. F., Sander, G. C., Walter, M. T. and Parlange M. B. (2008). Influence of sediment settling velocity on mechanistic soil erosion modeling. *Water Resources Research.*, 44, W06401.
- Young, R. A. (1980). Characteristics of eroded sediment. *Trans. ASAE* 23, 1139–1142, 1146.