

کاربرد مدل‌های ریاضی در توصیف توزیع اندازه ذرات در رسوبات پشت بندهای رسوب‌گیر متوالی

لیلا مهدی‌زاده^۱، فرخ اسدزاده^{۲*} و عباس صمدی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ^۲ استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ^۳ استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۱

چکیده

یکی از خصوصیات کلیدی رسوبات، توزیع اندازه ذرات آن‌ها است که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش توزیع اندازه ذرات رسوبات سطحی انباشته شده در پشت بندهای رسوب‌گیر مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور دو آبراهه در منطقه نوشان ارومیه که به ترتیب دارای سه و چهار بند سنگی ملاتی بودند، انتخاب شده و توزیع اندازه ذرات رسوب پشت آن‌ها با اندازه ذرات خاک دامنه مشرف به بندها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ذرات رسوب پشت بندها در مجموع نسبت به ذرات خاک دامنه، اندازه درشت‌تری داشته و دارای بافت شنی-لومی و شنی هستند. در بندهای نیمه‌پر ترسیب انتخابی ذرات رسوب مشاهده شد و بندهای پایین دست دارای ذراتی با اندازه تقریباً مشابه با خاک اصلی بودند. در حالی که در بندهای پر، این شرایط مشاهده نشده و عملاً بخش قابل توجهی از ذرات کوچک‌تر از ۰/۱۲۴ میلی‌متر از بندها عبور نمودند. ده مدل مختلف ریاضی برای توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب به کار رفته و قابلیت آن‌ها بر مبنای طیف متنوعی از ضرایب کارایی مورد ارزیابی قرار گرفت. خوشه‌بندی سلسله مراتبی مدل‌ها بر مبنای ضرایب کارایی منتخب نشان داد که به ترتیب سه مدل فردلاند، ORL و ONL دارای برتری نسبی در مقایسه با سایر مدل‌ها هستند. مقدار ضریب تبیین در هر سه مدل برابر با ۰/۹۹ بوده و آماره AIC نیز در آن‌ها به ترتیب برابر با ۴۴/۱۳، ۴۳/۹۲ و ۴۱/۴۶ بود. بنابراین این مدل‌ها می‌توانند برای کمی‌سازی توزیع اندازه ذرات رسوب مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: ارومیه، ترسیب انتخابی، مدل توزیع اندازه ذرات، مدل فردلاند، نوشان

مقدمه

به دام انداختن رسوبات و در نهایت کنترل فرسایش خاک احداث می‌شوند (Abedini و همکاران، ۲۰۱۲). نگرانی از ذرات رسوب و جلوگیری از ورود آن‌ها به اراضی پایین دست و مخازن سدها می‌تواند از مهم‌ترین کارکردهای بندهای رسوب‌گیر محسوب شود (Allen و Welch، ۱۹۷۱). این سازه‌ها در مناطق مختلف دنیا و

احداث بندهای رسوب‌گیر از پرکاربردترین روش‌های کنترل مکانیکی فرسایش خاک در مناطق نیمه-خشک محسوب می‌شود. این سازه‌های کوچک، موانع هیدرولیکی ساده‌ای هستند که در مسیر رودخانه‌های فصلی و خندق‌ها و با هدف کاهش سرعت جریان آب،

توزیع اندازه ذرات رسوب پشت این بندها می‌تواند در تحلیل کارایی آن‌ها برای به دام انداختن ذرات ریز رسوب مفید باشد. آن‌ها در پژوهش خود ۱۸ بند رسوب‌گیر در حوزه آبخیز Quipar در کشور اسپانیا را به صورت تصادفی انتخاب نموده و گزارش کردند که بافت رسوبات پشت بندها در اغلب موارد لوم متمایل به سیلتی بوده و در برخی از موارد نیز لوم‌شنی است. Hassanli و Esmaili-Nameghi (۲۰۰۷) و Hassanli و همکاران (۲۰۰۹) اقدام به بررسی وضعیت دانه‌بندی ذرات رسوب انباشته شده در بندهای گابیونی واقع در منطقه درودزن استان فارس نموده‌اند. آن‌ها در نتایج خود منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب را به صورت کیفی در بندهای مختلف مورد مقایسه قرار داده و گزارش نموده‌اند که بندهای پایین‌دست آبراهه‌ها کارایی بیشتری در به دام انداختن ذرات ریز رسوبات دارند.

در طول دهه اخیر مدل‌های ریاضی متعددی که مبتنی بر فرضیات متفاوتی برای ارتباط بین جرم و اندازه ذرات می‌باشند، با هدف توصیف منحنی توزیع اندازه ذرات خاک معرفی و استفاده شده‌اند. از مدل‌هایی که بیشترین کاربرد را در این زمینه دارند، می‌توان به مدل توانی مبتنی بر هندسه فرکتالی^۱ (Bird و همکاران، ۲۰۰۰) مدل‌های لوگ‌نرمال^۲ دو یا چندپارامتری تک‌نمایی (Buchan، ۱۹۸۹؛ Buchan و همکاران، ۱۹۹۳) و لوگ‌نرمال دونمایی مانند مدل شیوازا و کمپبل (Campbell و Shiozawa، ۱۹۹۱) و مدل‌های چهار پارامتری مانند فردلانند^۳ (Fredlund و همکاران، ۲۰۰۰) و گمپرتز^۴ (Nemes و همکاران، ۱۹۹۹) اشاره کرد. در زمینه استفاده از مدل‌های مذکور برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک، در سال‌های اخیر مطالعات متعددی صورت گرفته است. برای نمونه Zhao و همکاران (۲۰۰۹) مدل فرکتالی را برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک‌های زراعی واقع در پایین‌دست سد مورد استفاده قرار داده و گزارش نموده‌اند که مدل فرکتالی با ضریب تبیین ۰/۹۱-۰/۸۳ توانایی نسبتاً خوبی در توصیف توزیع اندازه

به‌خصوص در مناطق نیمه‌خشک که انجام عملیات بیولوژیکی کنترل فرسایش خاک به‌دلیل محدودیت‌های ناشی از آب قابل استفاده گیاهان به سختی امکان‌پذیر است، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Romero-Diaz و همکاران، ۲۰۱۲). از دیگر کارکردهای این بندها می‌توان به کاهش شیب موثر کانال در طول زمان اشاره کرد که این امر سبب افزایش ذخیره رطوبتی در رسوبات انباشته شده در پشت این بندها شده و با طی زمان امکان استقرار پوشش گیاهی و آغاز عملیات بیولوژیکی مبارزه با فرسایش را فراهم می‌آورد (Bombino و همکاران، ۲۰۰۶). به علاوه در برخی از مطالعات نیز حجم رسوبات پشت بندها به‌عنوان شاخصی از مقدار تولید رسوب حوضه‌های بالادست مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hashemi و Arabkhedri، ۲۰۰۸).

با توجه به نقش بندهای رسوب‌گیر در به دام انداختن ذرات رسوب، مطالعه رسوبات موجود در پشت این بندها از نظر ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات دارای اهمیت به‌سزایی است، چرا که از یک طرف ذخیره رطوبتی در پشت این بندها تابعی از ویژگی‌های مرتبط با توزیع اندازه ذرات رسوبات بوده و از سوی دیگر مطالعات متعدد در زمینه فرسایش خاک بیان‌گر این نکته است که اندازه‌های مختلف ذرات رسوب دارای ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی بوده و از نظر آثار مربوط به آلاینده‌گی و نیز تلفات عناصر غذایی بسیار متفاوت عمل می‌نمایند (Romero-Diaz و همکاران، ۲۰۱۲). از این‌رو می‌توان گفت که بررسی کمی ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات رسوب در پشت بندهای رسوب‌گیر بسیار حائز اهمیت است. با وجود این اهمیت، بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات بسیار اندکی در زمینه وضعیت دانه‌بندی رسوبات انباشته شده در پشت بندهای رسوب‌گیر صورت گرفته است و تقریباً می‌توان گفت که مطالعات مربوط به این موضوع محدود به پژوهش‌های صورت گرفته توسط Hassanli و همکاران (۲۰۰۹) و Romero-Diaz و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد.

Romero-Diaz و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهش خود به اهمیت مطالعه توزیع اندازه ذرات رسوبات پشت بندها اشاره نموده و بیان داشته‌اند که آگاهی از

¹ Fractal

² Lognormal

³ Fredlund

⁴ Gompertz

توزیع اندازه ذرات رسوب در بندهای رسوب گیر سنگی ملاتی متوالی در دو حالت پر و نیمه پر انجام شده و طی آن کارایی برخی از مدل های پر کاربرد توزیع اندازه ذرات در توصیف ویژگی های اندازه ای آن ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش ها

منطقه مورد پژوهش و نمونه برداری: برای انجام این مطالعه دو آبراهه فصلی در منطقه نوشان ارومیه با مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 21' 29''$ عرض شمالی و $44^{\circ} 56' 39''$ طول شرقی انتخاب شدند. از نظر شرایط اقلیمی، میانگین بارش سالانه در این منطقه برابر با 605 میلی متر و میانگین درجه حرارت سالانه نیز برابر با هفت درجه سانتی گراد می باشد. منطقه مذکور دارای پوشش مرتعی به شکل رویشی گندمیان، علفی و بوته ای می باشد. خاک های منطقه دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک بوده و در دو رده انتی سول و اینسپتی سول طبقه بندی شده اند. آبراهه های منتخب به موازات یکدیگر قرار داشته و در این مقاله تحت عنوان آبراهه G1 و G2 شناخته خواهند شد. طول تقریبی آبراهه G1 برابر با 1200 متر بوده و روی آن سه بند سنگی ملاتی متوالی با ارتفاع چهار متر و با فواصل تقریباً مساوی از هم احداث شده است. طول تقریبی آبراهه G2 نیز برابر با 1100 متر بوده و روی آن نیز چهار بند سنگی ملاتی متوالی با ارتفاع چهار متر احداث شده بودند. شیب بستر این آبراهه ها یکنواخت و در حدود هشت درصد است. بندهای موجود در آبراهه G1 نیمه پر و بندهای موجود در آبراهه G2 پر بودند.

در شکل ۱ تصویری از بندهای پر و نیمه پر به ترتیب در آبراهه های G1 و G2 نشان داده شده است. این بندها در طول شش سال اخیر احداث شده و هدف اصلی از احداث آن ها کنترل رسوبات جریان های سیلابی و جلوگیری از ورود آن ها به رودخانه شهرچای که منبع عمده تامین کننده آب شرب شهر ارومیه می باشد، است. بندهای موجود در هر دو آبراهه به ترتیب از بالادست به سمت پایین دست آبراهه کد گذاری شدند، به طوری که بند واقع در بالادست آبراهه ها با شماره ۱ و آخرین بند موجود در پایین دست

ذرات این خاک ها دارد. Zhao و همکاران (۲۰۱۱) نیز در یک پژوهش دیگر اقدام به مقایسه کارایی برخی از مدل های توزیع اندازه ذرات در توصیف ویژگی های خاک های رسوبی حاشیه یک سد در چین نمودند. نتایج این محققین نشان داد که بر اساس ضریب تبیین و آماره آکائیک^۱، مدل فردلاند و مدل فرکتالی به ترتیب مطلوب ترین و ضعیف ترین مدل در برآورد توزیع اندازه ذرات این خاک ها بودند. Botula و همکاران (۲۰۱۳) نیز ۱۰ مدل مختلف را برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک های مناطق استوایی استفاده نموده و گزارش کردند که مدل فردلاند توانایی بیشتری نسبت به سایر مدل ها در توصیف توزیع اندازه ذرات این خاک ها دارد.

Zolfaghari و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که با درشت تر شدن بافت خاک، توزیع اندازه ذرات به سمت توزیع نرمال متمایل شده و در نتیجه در خاک های درشت بافت مدل توزیع نرمال توانایی مطلوبی در توصیف توزیع اندازه ذرات دارد. این محققین همچنین، به ضعف مدل های فرکتالی در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک های شنی نیز اشاره نموده اند. Rastgo و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش نموده اند که کارایی مدل های توزیع اندازه ذرات خاک در طبقه های مختلف بافت خاک، متفاوت بوده و در خاک های شنی مدل S شکل دارای نتایج مطلوبی است.

با توجه به بررسی منابع می توان گفت که با وجود موفقیت استفاده از این مدل ها در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک، تاکنون کارایی این مدل ها در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر امروزه منحنی توزیع اندازه ذرات کاربردهای فراوانی در برآورد منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی و سایر ویژگی های هیدرولیکی و مکانیکی خاک و رسوب (Mohammadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Lee و Ro، ۲۰۱۴) دارد. بنابراین با کمی سازی منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب و پیوسته کردن آن با استفاده از مدل های ریاضی مناسب می توان اقدام به برآورد بسیاری از ویژگی های هیدرولیکی رسوبات نمود. از این رو این پژوهش با هدف بررسی وضعیت

¹ Akaike Information Criteria

همکاران (۲۰۱۲) معادل با عمق نمونه‌برداری از خاک سطحی و در محدوده ۲۰-۰ سانتی‌متری بود. نمونه‌های رسوب به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. توزیع اندازه ذرات به روش Gee و Bauder (۱۹۸۶) تعیین شد؛ به این ترتیب که جرم معینی از نمونه‌ها با محلول پراکنش (هگزامتافسفات سدیم) تیمار شده و به‌منظور تفکیک ذرات شن، از الک ۵۳ میکرون عبور داده شدند و توزیع اندازه ذرات عبور کرده از الک با استفاده از قرائت هیدرومتر در زمان‌های مختلف (از ۳۰ ثانیه تا ۴۸ ساعت) تعیین شد. توزیع اندازه ذرات شن جدا شده نیز با استفاده از سری الک‌های یک، ۰/۵، ۰/۲۵، و ۰/۱۵ میلی‌متری تعیین شد. قابلیت هدایت الکتریکی و pH نمونه‌ها در عصاره اشباع و ماده آلی نیز به‌روش والکی-بلک تعیین شد (Rowell, ۱۹۹۴).

مدل‌های توزیع اندازه ذرات: برای بررسی کارایی مدل‌های مختلف در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب، ۱۰ مدل توزیع اندازه روی داده‌های به‌دست آمده از روش هیدرومتری برآزش داده شد. در این مطالعه مبنای عمل برای گزینش مدل‌ها گسترده‌گی کاربرد مدل‌ها بوده و سعی شده تا مدل‌هایی با کاربرد بیشتری مورد استفاده قرار گیرند. این مدل‌ها شامل مدل نرمال ساده، مدل فرکتالی (Bird و همکاران، ۲۰۰۰)، مدل تک پارامتری جکی (Hwang و همکاران، ۲۰۰۲)، لوگ نرمال ساده (Buchan, ۱۹۸۹)، مدل‌های لوگ نرمال اصلاح شده سه پارامتری ¹ORL و ²ONL (Buchan و همکاران، ۱۹۹۳)، مدل لوگ نرمال سه پارامتری دو نمایی شیزواوا و کمپبل (Shiozawa و Campbell, ۱۹۹۱)، مدل چهار پارامتری فردلاندر (Fredlund و همکاران، ۲۰۰۰) و گمپرتز (Nemes و همکاران، ۱۹۹۹) و همچنین، مدل ون‌گنوختن (Bagarello و همکاران، ۲۰۰۹) بودند. جزئیات مربوط به معادلات و پارامتر-های مربوط به هر مدل در جدول ۱ ارائه شده است. برآزش مدل‌های مذکور رویدادهای مشاهده‌ای از طریق رگرسیون غیرخطی و با بهینه‌سازی مجموع

برای آبراهه‌های G1 و G2 به ترتیب مربوط به بندهای شماره ۳ و ۴ بودند.



شکل ۱- تصویری از بندهای موجود در آبراهه‌های G1 (بند نیمه‌پر) و G2 (بند پر)

برای تعیین توزیع اندازه ذرات رسوب انباشته شده در پشت بندها، از هر بند در مکانی نزدیک به دیواره بند و در امتداد آن سه نمونه با وزن تقریبی دو کیلوگرم از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری تهیه شد. در نمونه‌برداری از بندها دقت شد تا حتی‌الامکان از مناطق نزدیک به دیواره آبراهه نمونه‌برداری نشود تا از اختلاط خاک‌های مجاور دیواره با نمونه‌های رسوب جلوگیری شود (Romero-Diaz و همکاران، ۲۰۱۲). به‌منظور مقایسه توزیع اندازه ذرات رسوب با خاک موجود در دامنه‌های مشرف به بندها، یک نمونه از خاک دامنه از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری و به همان شکل تهیه شد. نمونه مذکور به‌صورت مرکب و از نقاط مختلف دامنه‌های مشرف به بندها تهیه شد.

در رابطه عمق نمونه‌برداری، با توجه به این‌که هدف مقایسه ویژگی‌های خاک سطحی با نمونه‌های رسوب پشت بندها بود، بنابراین عمق نمونه‌برداری از رسوبات نیز مطابق با توصیه Romero-Diaz و

¹ Offset-Renormalized Log-Normal Model

² Offset-Nonrenormalized Log-Normal Model

صورت گرفت.

مربعات خطا با کاربرد نرم افزار MATLAB 7. 11

جدول ۱- مدل های توزیع اندازه ذرات مورد استفاده

نام مدل	علامت اختصاری	معادله	پارامترهای مدل
نرمال	Norm	$F(d) = (1 + \operatorname{erf}\left[\frac{d - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]) / 2$	σ و μ
فراکتالی	Frac(B)	$F(d) = Cd^{(3-D)}$	C و D
جکی (Jaky)	Jak	$F(d) = \exp\left[-\frac{1}{p^2} \left[\ln \frac{d}{d_0}\right]^2\right]$	$d_0=(2\text{mm})$ و P
لوگ نرمال	Log-N	$F(d) = (1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]) / 2$	σ و μ
ORL	ORL	$F(d) = (1 - e) \times (1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]) / 2 + e$	e و σ , μ
ONL	ONL	$F(d) = (1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]) / 2 + c$	c و σ , μ
شیوزاوا و کمپیل	Sh-Cam	$F(d) = C \times \left[1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]\right] / 2 + (1 - C) \times \left[1 + \operatorname{erf}\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right]\right] / 2$	C و σ , μ
فردلان	Fred	$F(d) = \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{1}{d}\right)^m\right]} \left[1 - \left(\frac{\ln\left(1 + \frac{d_f}{d}\right)}{\ln\left(1 + \frac{d_f}{d_m}\right)}\right)^7\right]$	d_f, m, n, a ($d_m=0.0001 \text{ mm}$)
گمپرتز	Gom	$F(d) = \alpha + \gamma \exp[-\exp[-\beta(d - \mu)]]$	γ و μ, β, α
ون گنوختن	Van	$F(d) = \left[1 + \left(\frac{d_g}{d}\right)^N\right]^{-M}$	d_g, N $M=1-(2/N)$

در نظر گرفته و به دنبال یافتن بهترین مدل بر مبنای حداقل خطا و نیز حداقل تعداد پارامترهای مدل است. کم بودن مقدار آن نشان دهنده کارایی مدل از حیث خطا و تعداد پارامترها می باشد (Hwang و همکاران، ۲۰۰۲).

در مدل های مرتبط با رسوب و هیدرولوژی، دامنه-ای از مقادیر مطلوب برای برخی از ضرایب کارایی ارائه شده است، برای نمونه Zhang و همکاران (۱۹۹۶) مقادیر ضریب تبیین بیش از ۰/۵ را برای مدل WEPP مطلوب ارزیابی نموده اند. Nearing (۱۹۹۸) نیز اشاره نموده که دستیابی به مقادیر ضریب تبیین بیش از ۰/۷۶ در مدل های فرسایش خاک به ندرت امکان پذیر است. وی همچنین، بیان نموده است که مقادیر ضریب نش-ساتکلیف بیش از ۰/۵، در مدل های فرسایشی مطلوب بوده و نباید در این گونه مدل ها انتظار مقادیر بیش از ۰/۷ برای این ضریب را داشت. اما واقعیت این است که در مدل هایی نظیر مدل های توزیع اندازه

در پژوهش حاضر به منظور مقایسه دقیق تر توانایی مدل ها، طیف متنوعی از ضرایب کارایی با قابلیت های مختلف (جدول ۲) به کار برده شده است. به طور کلی ضرایب کارایی به عنوان معیارهای ریاضی برای بررسی توانایی مدل در شبیه سازی داده های مشاهده ای می باشند (Krause و همکاران، ۲۰۰۵) و هر کدام از آنها می توانند قابلیت مدل را از جنبه های مختلفی مورد بررسی قرار دهند. برای نمونه ضریب تبیین نشان دهنده نسبت کوواریانس داده های مشاهده ای و برآورد شده بر حاصل ضرب واریانس داده های مشاهده ای و برآورد شده می باشد و یا این که ضریب GMER^۱ به عنوان معیاری از خطا بوده و در عین حال بیش برآوردی و کم برآوردی کلی مدل را نیز نشان می دهد. آماره اکائیک نیز به عنوان شاخصی است که تعداد پارامترهای مدل را به عنوان یک معیار در کارایی مدل

¹ Geometric Mean Error Ratio

استفاده از ضرایب کارایی مختلف در عین سودمند بودن به دلیل ماهیت مختلف این ضرایب می‌تواند، همراه با مشکلاتی در رابطه با قضاوت صحیح در مورد کارایی مدل‌ها شود. بنابراین در این مطالعه به منظور انجام مقایسه دقیق‌تر مدل‌ها بر مبنای ضرایب کارایی متنوع، ابتدا ضرایب کارایی مورد اشاره در جدول ۲ برای تمامی مدل‌ها و در همه نمونه‌های مورد بررسی محاسبه شده و ضرایب مذکور با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی^۱ و تجزیه به مولفه‌های اصلی^۲ دسته‌بندی شدند. سپس از هر گروه یک ضریب کارایی انتخاب شده و در ادامه مدل‌های مورد اشاره در جدول ۱ بر اساس ضرایب کارایی برگزیده شده، مجدداً دسته‌بندی شدند. از نرم‌افزار Minitab 14 به منظور خوشه‌بندی و تجزیه به مولفه‌های اصلی مدل‌ها و ضرایب کارایی بهره‌گیری شد.

ذرات خاک، دامنه مقادیر گزارش شده برای ضرایب کارایی مدل‌ها بسیار متفاوت با مدل‌های فرسایش و رسوب است. برای نمونه Shangguan و همکاران (۲۰۱۴) در مقایسه تعدادی از مدل توزیع اندازه ذرات خاک، دامنه تغییرات ضریب تبیین را بین ۰/۸۹-۰/۹۹ گزارش نموده‌اند. واقعیت این است که در این‌گونه مدل‌ها ابتدا مدل مورد نظر بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش یافته و پس از تعیین پارامترهای آن (جدول ۱)، مجدداً مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که این امر سبب ارتقای قابلیت مدل از حیث ضرایب کارایی می‌شود. این امر بیان‌گر این واقعیت است که حتی در مدل‌هایی که دارای ضرایب کارایی مطلوبی هستند، بایستی مقایسه بین مدل‌ها صورت گرفته و مدل نهایی بر مبنای بهترین مقادیر ضرایب کارایی گزینش شود (Saeidi و Sadeghi، ۲۰۱۰).

جدول ۲- ضرایب کارایی برای ارزیابی مدل‌ها (Krause و همکاران، ۲۰۰۵؛ Misgana، ۲۰۱۱)

شاخص	رابطه*
ضریب تبیین (R^2)	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})(P_i - P_{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{mean})^2}} \right]^2$
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$
آماره آکائیک (AIC)	$AIC = n \left[\ln(2\pi) + \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n - p} \right) \right] + p$
ضریب همسانی (d)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{mean} + O_i - O_{mean})^2}$
ضریب نش-ساتکلیف (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2}$
نسبت میانگین هندسی خطا (GMER)	$GMER = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right)}{n} \right]$

* O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده به وسیله مدل در یک نقطه، O_{mean} و P_{mean} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده به وسیله مدل، n تعداد نقاط و p تعداد پارامترهای مدل

این جدول مشاهده می‌شود، نمونه‌های رسوب از نظر هدایت الکتریکی به عنوان رسوبات غیرشور محسوب می‌شوند و pH آن‌ها نیز اغلب در محدوده خنثی است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های رسوبات: ویژگی‌های کلی رسوبات پشت بندها در جدول ۳ ارائه شده است، همان‌گونه که در

¹ Hierarchical Cluster Analysis

² Principal Component Analysis (PCA)

به طوری که میانگین هدایت الکتریکی نمونه‌های پشت بندها ۱/۱۳ دسی‌زیمنس در متر بوده و میانگین pH نمونه‌های رسوب نیز ۷/۱۳ است. بافت نمونه‌ها نیز بر اساس مثلث بافت خاک در محدوده شن تا لوم شنی

قرار دارد که نشان‌دهنده بافت سبک این رسوبات است. محتوای ماده آلی رسوبات نیز به دلیل دارا بودن بافت سبک، اندک است به گونه‌ای که میانگین محتوای ماده آلی در رسوبات برابر با ۰/۵۶ درصد است.

جدول ۳- ویژگی‌های خاک و نمونه‌های رسوب مربوط به آبراهه‌ها

شماره آبراهه	نمونه	شن	رس	سیلت	ماده آلی	کلاس بافتی	هدایت الکتریکی	pH
			%				dSm ⁻¹	-
آبراهه G1	خاک اصلی	۲۱	۳۳	۴۶	۰/۸۵	لوم رسی	۱/۳۶	۷/۸۱
	بند ۱	۶۷	۴	۲۹	۰/۲۷	لوم شنی	۱/۲۶	۶/۹۴
	بند ۲	۷۰	۷	۲۳	۰/۶۵	لوم شنی	۱/۲۹	۷/۴
	بند ۳	۲۶	۲۱	۵۳	۱/۱۳	لوم سیلتی	۱/۶۰	۷/۳۲
آبراهه G2	خاک اصلی	۳۰	۲۸	۴۲	۲/۴	لوم رسی	۰/۹۲	۷/۴
	بند ۱	۹۲	<۱	۸	۰/۴۵	شن	۰/۷۱	۶/۹۰
	بند ۲	۸۶	۳	۱۱	۰/۵۸	شن لومی	۰/۸۹	۶/۹۹
	بند ۳	۸۶	۷	۷	۰/۴۵	شن لومی	۱/۰۷	۷/۰۳
	بند ۴	۸۹	۴	۷	۰/۴۱	شن	۱/۱۲	۷/۳۵

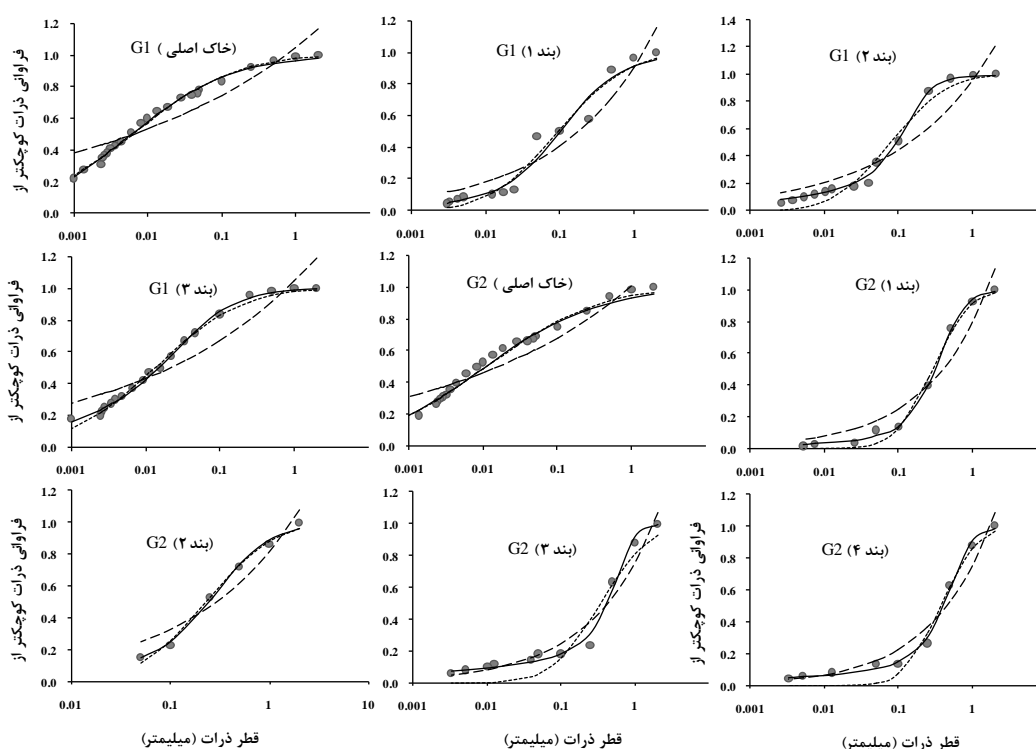
توزیع اندازه ذرات رسوبات: توزیع اندازه ذرات رسوبات انباشته شده در پشت بندهای متوالی و نیز خاک اصلی نمونه‌برداری شده از دامنه‌ی آبراهه‌های G1 و G2 در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل علاوه بر داده‌های مشاهده‌ای، برازش سه مدل گزینش شده شامل مدل فرکتالی، فردلانند، و مدل لوگ‌نرمال نیز نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌های رسوب آبراهه G1 دارای توزیع اندازه درشت‌تری نسبت به نمونه خاک اصلی می‌باشند. در بین بندها نیز با حرکت به سمت پایین‌دست آبراهه (از بند ۱ به سمت بند ۳) توزیع اندازه ذرات به تدریج ریزتر شده و در بند شماره ۳ اندازه ذرات تقریباً مشابه با خاک اصلی دامنه است. این امر نشان‌دهنده برتری نسبی بندهای پایین‌دست در به دام انداختن ذرات ریز رسوب بوده و نتایج پژوهش Hassanli و همکاران (۲۰۰۹) را تأیید می‌نماید. وجود این روند در داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات رسوب، حاکی از وقوع فرآیند انتخابی ترسیب در مسیر آبراهه بوده و نشان می‌دهد که ذرات درشت رسوب توسط بندهای بالادست گرفته شده و به تدریج با حرکت به سمت پایین‌دست از درصد ذرات

درشت رسوب کاسته شده است. وقوع فرآیند ترسیب انتخابی در آبراهه توسط Nadeu و همکاران (۲۰۱۲) نیز مشاهده شده است. بر اساس قانون استوکس ذرات درشت رسوب در زمان کوتاه‌تری ترسیب می‌یابند (Gee و Bauder، ۱۹۸۶)، بنابراین با جدا شدن ذرات از ماتریکس خاک، ابتدا ذرات درشت در بندهای بالادست این آبراهه ترسیب نموده‌اند. با توجه به روند ریزتر شدن ذرات رسوب با حرکت به سمت بندهای پایین در این آبراهه، کوچک‌تر بودن اندازه ذرات رسوب در بند ۳ این آبراهه نسبت به خاک اصلی می‌توانست حاکی از کارایی این توالی بندها در به دام انداختن ذرات معلق رسوب باشد (Nadeu و همکاران، ۲۰۱۲)، اما مشابهت تقریبی توزیع اندازه رسوبات بند ۳ در این آبراهه با خاک اصلی نشان می‌دهد که احتمالاً ذرات رسوب معلق در جریان‌های سیلابی توسط انتقال معلق از بند ۳ عبور نموده‌اند (Nadeu و همکاران، ۲۰۱۲).

ارزیابی توزیع اندازه ذرات رسوب مشاهده‌ای در آبراهه G2 نشان می‌دهد که بند ابتدایی (بند ۱) عملکرد خوبی در ترسیب ذرات درشت دارد. در بندهای میانی (بند ۲ و ۳) نسبت به بند ابتدایی به-

داشته‌اند و تنها توانسته‌اند با کاهش جزئی سرعت جریان سیلاب که آن هم ناشی از تغییر در شیب پروفیل طولی آبراهه است، ذرات درشت رسوب را در پشت خود نگه دارند (Lague و Davy، ۲۰۰۹). از سوی دیگر در این آبراهه در بیشتر مواقع سال دبی پایه در جریان است. جریان آب پایه دارای بار رسوبی اندکی بوده و در نتیجه پتانسیل انتقال بالایی دارد که باعث می‌شود، پس از اتمام جریان سیلابی ذرات ریز رسوب به‌وسیله دبی پایه شسته و خارج شوند (Bull و Kirkby، ۲۰۰۲؛ Hobley و همکاران، ۲۰۱۱).

دلیل وجود پوشش گیاهی، تا حدودی رسوبات ریز انباشت شده است، ولی برخلاف انتظار، عملکرد بند واقع در پایین دست آبراهه (بند ۴) در ترسیب رسوبات ریز چندان مناسب نیست و رسوب انباشته شده دارای بافت شنی است (جدول ۳). به نظر می‌رسد که دلیل این امر این باشد که تمام بندهای واقع در آبراهه G2 کاملاً پر بوده‌اند و چون نمونه‌برداری از رسوبات سطحی پشت بندها صورت گرفته است، با وقوع جریان‌های سیلابی اخیر بندها توانایی کمتری در نگه‌داشتن جریان سیلابی و در نتیجه ترسیب ذرات رسوب



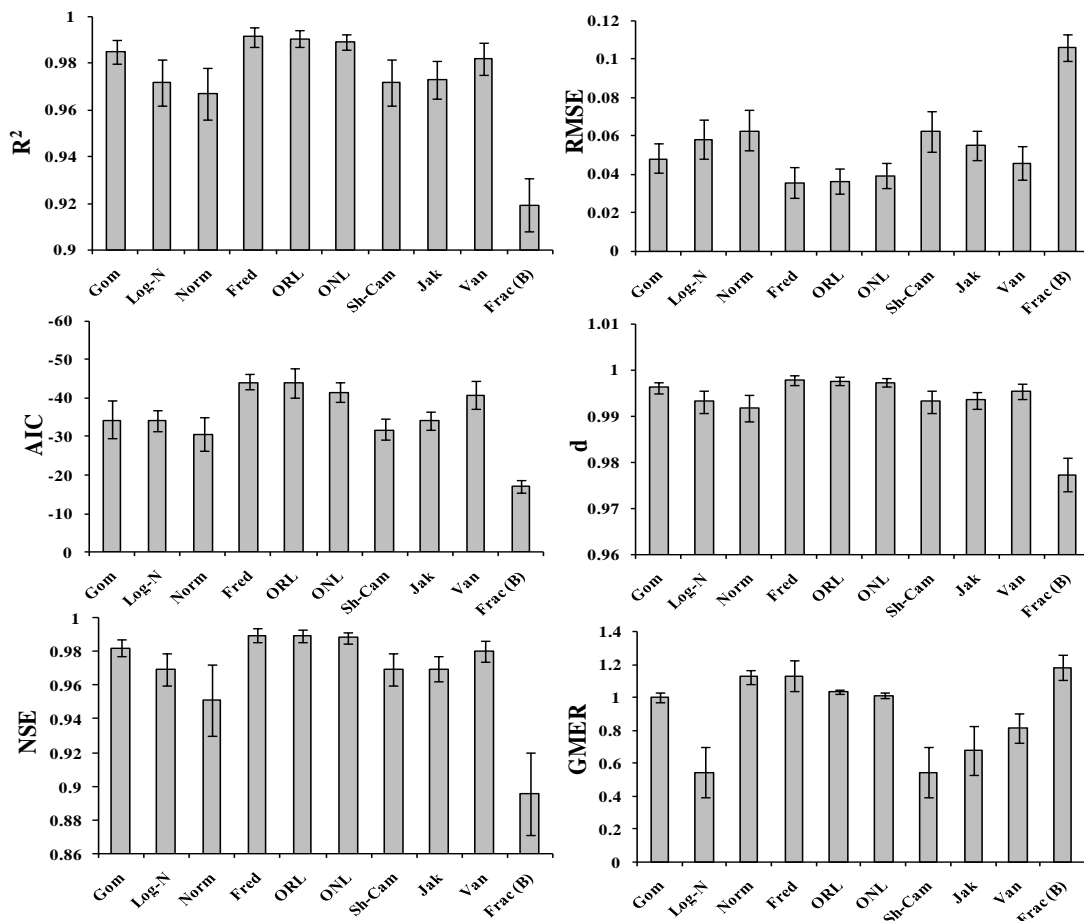
شکل ۲ - توزیع اندازه ذرات رسوب و خاک اصلی و برازش برخی از مدل‌ها روی داده‌های مشاهده‌ای در آبراهه‌ها (دایره‌های تو پر، نقاط مشاهده‌ای؛ خط ممتد، مدل فردلاند؛ خط چین درشت، مدل فرکتالی؛ خط چین ریز، مدل لوگ‌نرمال)

ارزیابی مدل‌های توزیع اندازه ذرات: نتایج مربوط به ضرایب کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات مورد استفاده (جدول ۱) در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل میانگین ضرایب کارایی هر مدل در نمونه‌های رسوب به همراه خطای معیار ضریب کارایی مدل مورد نظر نشان داده شده است. همچنین، نحوه برازش سه مدل فردلاند، لوگ‌نرمال و فرکتالی بر داده‌های مشاهده‌ای در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است. میانگین مقادیر ضریب تبیین در مدل‌های مختلف در دامنه-

۰/۹۹۱-۰/۹۱۹ بود. مطابق شکل بیشترین مقدار میانگین ضریب تبیین مربوط به مدل فردلاند و کمترین نیز متعلق به مدل فرکتالی است. بررسی شکل ۲ همچنین، نشان می‌دهد که سه مدل فردلاند، ORL و ONL دارای کمترین مقدار خطای استاندارد میانگین برای ضریب تبیین نیز بوده‌اند که این امر نشان‌دهنده کارایی مطلوب این مدل‌ها در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه است، در حالی که مدل‌های فرکتالی، نرمال و تا حدودی نیز لوگ‌نرمال دارای

مذکور برای تعداد پارامترهای بیشتر مدل جریماهی در نظر می‌گیرد، اما با این حال باز هم مدل چهار پارامتری فردلاند را می‌توان به‌عنوان کارترین مدل از نظر قابلیت توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب محسوب نمود. نتایج آماره RMSE هم با ضریب تبیین مشابه بوده و بر اساس این آماره نیز مدل‌های فردلاند و فرکتالی با مقادیر RMSE، ۰/۰۳۶ و ۰/۱۰۶ به ترتیب به‌عنوان برترین و ضعیف‌ترین مدل در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوبات پشت بندها شناخته شدند. ضریب GMER نیز در مدل‌های فردلاند، گمپترز و فرکتالی و نیز نرمال نزدیک به یک بود که نشان‌دهنده کارایی مطلوب این مدل‌ها می‌باشد.

بیشترین مقدار پراکندگی ضریب تبیین بودند. مقایسه مدل تک پارامتری جکی با مدل‌های شیوزاوا و کمپیل، نرمال و لوگ‌نرمال نیز نشان می‌دهد که مدل مذکور کارایی مشابهی با مدل‌های لوگ‌نرمال و شیوزاوا و کمپیل داشته و تا حدودی نیز بهتر از مدل نرمال عمل نموده است که این امر نشان می‌دهد که افزایش تعداد پارامترهای مدل لزوماً به معنی افزایش کارایی آن نیست. نتایج آماره آکائیک نیز موید برتری نسبی مدل فردلاند بود. بر اساس این آماره، مدلی که دارای کمترین مقدار معیار آکائیک باشد، به‌عنوان مدل مطلوب شناخته می‌شود (Hwang, ۲۰۰۴). بررسی مقادیر این آماره نشان می‌دهد که هر چند آماره



شکل ۳- میانگین و خطای استاندارد ضرایب کارایی مورد بررسی برای مدل‌های مختلف در نمونه‌های رسوب

در این مطالعه برای حل این مشکل و ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها، ابتدا ضرایب کارایی محاسبه شده برای مدل‌های ده‌گانه توزیع اندازه ذرات، استاندارد شده و بر اساس روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و بر مبنای

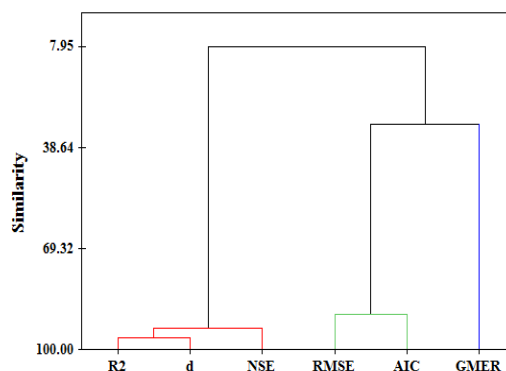
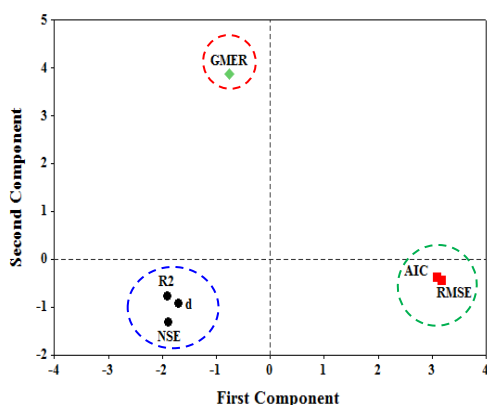
تنوع ضرایب کارایی برای ارزیابی مدل‌ها در عین سودمند بودن به‌دلیل ماهیت مختلف این ضرایب، قضاوت در رابطه با قابلیت مدل‌ها به‌ویژه زمانی که تعداد آن‌ها زیاد باشد را با مشکلاتی مواجه می‌نماید.

گرفته‌اند و ضریب GMER نیز در یک دسته جداگانه جای گرفته است.

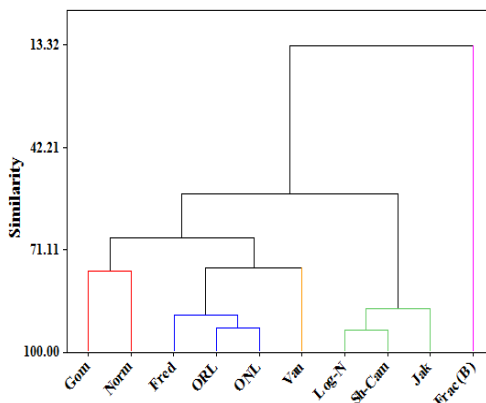
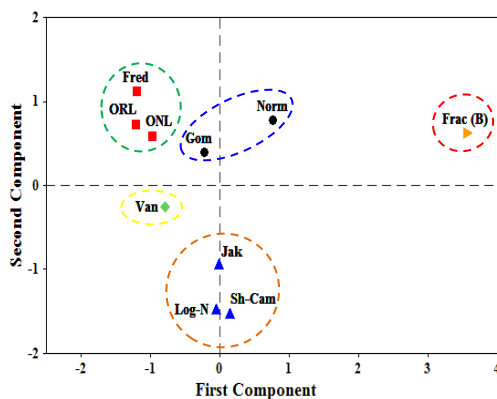
بنابراین به منظور ارزیابی مدل‌ها از هر خوشه یک ضریب که شامل R^2 ، AIC و GMER بود، انتخاب شده و مدل‌های ده‌گانه توزیع اندازه ذرات به همان روش قبل و این بار بر مبنای این سه ضریب دسته‌بندی شده و تجزیه مولفه‌های اصلی بر روی آن‌ها صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۴ نشان داده شده است.

شکل ۵ به روشنی نشان‌دهنده مشابهت سه مدل ONL، ORL و فردلاند بوده و آن‌ها را در یک گروه جای داده است. همچنین، مدل‌های جکی، شیوزاوا و کمپبل و لوگ‌نرمال نیز دارای عملکرد مشابهی بوده و در یک گروه جای گرفته‌اند. شکل ۵ همچنین، نشان‌دهنده عملکرد متفاوت مدل فرکتالی در مقایسه با سایر مدل‌ها است.

میزان مشابهت، دسته‌بندی شدند. به‌منظور تایید نتایج حاصل از خوشه‌بندی، تجزیه مولفه‌های اصلی نیز روی داده‌های ضرایب کارایی مدل‌ها صورت گرفته و نمودار پراکنش ضرایب کارایی نسبت به مولفه‌های اول و دوم که معیاری از دسته‌بندی ضرایب کارایی را نیز ارائه می‌دهد، ترسیم شد. نتایج مربوط به خوشه‌بندی ضرایب کارایی در شکل ۴ و نتایج مربوط به تجزیه به مولفه‌های اصلی ضرایب کارایی در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۴ می‌توان گفت که بر اساس روش تجزیه به مولفه اصلی دو مولفه اول و دوم قادر به تبیین ۹۷/۴ درصد تغییرات در داده‌های مشاهده‌ای بودند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ضرایب R^2 ، d و NSE از نظر عملکرد در داده‌های این تحقیق مشابه عمل نموده و در یک دسته قرار گرفته‌اند. همچنین، دو ضریب AIC و RMSE نیز دارای عملکرد مشابهی بوده و در یک دسته جای



شکل ۴- دسته‌بندی ضرایب کارایی بر مبنای روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و نمودار پراکنش ضرایب کارایی نسبت به مولفه‌های اصلی اول و دوم



شکل ۵- دسته‌بندی مدل‌های توزیع اندازه ذرات بر مبنای روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و نمودار پراکنش مدل‌ها نسبت به مولفه‌های اصلی اول و دوم

جدول ۴- مشخصات مولفه‌های ایجاد شده در روش تجزیه به مولفه‌های اصلی ضرایب کارایی و مدل‌های توزیع اندازه ذرات

مدل‌های توزیع اندازه ذرات				ضرایب کارایی			
شماره مولفه	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس	شماره مولفه	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس
PC1	۱/۹۷	۶۵/۷	۶۵/۷	PC1	۶/۰۴	۶۰/۵	۶۰/۵
PC2	۰/۹۸	۳۲/۷	۹۸/۴	PC2	۳/۶۹	۳۷/۰	۹۷/۴
PC3	۰/۰۴	۱/۶	۱۰۰/۰	PC3	۰/۲۳	۲/۴	۹۹/۸

شد و دامنه قطر ذرات متناظر با هر طبقه از روی منحنی تجمعی اندازه ذرات برازش داده شده، استخراج شد. سپس درصد جرمی متناظر با هر یک از این طبقات ده‌گانه قطر ذرات، به ترتیب از منحنی‌های توزیع تجمعی ذرات رسوب بندهای ۱ تا ۳ (برای آبراهه G1) و ۱ تا ۴ (برای آبراهه G2) استخراج شد که نتایج آن به تفکیک دو آبراهه در شکل ۶ ارائه شده است.

در این شکل محدوده طبقات ده‌گانه اندازه‌ای ذرات در محور افقی نشان داده شده است، به طوری که این طبقات اندازه‌ای، هر کدام در خاک اصلی دارای فراوانی ۱۰ درصد می‌باشند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در آبراهه G1 در بندهای شماره ۱ و ۲ فراوانی هفت طبقه اولیه ذرات، نسبت به خاک اصلی کمتر است. که این امر نشان‌دهنده کمتر بودن فراوانی ذرات ریز رسوب در این بندها نسبت به خاک اصلی است. در حالی که در بند شماره ۳ که در پایین دست آبراهه واقع شده است، فراوانی چهار طبقه اول اندازه‌ای نسبت به خاک اصلی کم بوده است.

در مجموع می‌توان گفت که درصد فراوانی طبقات با قطر زیاد در نمونه‌های مربوط به هر سه بند نسبت به خاک اصلی بیشتر است؛ یعنی بندها در به دام انداختن ذرات در اندازه شن کارآمد عمل کرده‌اند. برای نمونه در بند شماره ۲، ذرات با طبقه اندازه ۰/۲-۰/۵ میلی‌متر که در محدوده ذرات شن خیلی ریز تا شن متوسط هستند، در حدود ۴۸ درصد از جرم رسوب را به خود اختصاص داده‌اند و یا این‌که در بند شماره ۱ تقریباً ۶۵ درصد از جرم ذرات رسوب در محدوده دو طبقه انتهایی قرار داشته و قطری بیش از ۰/۵ میلی‌متر دارند. این بدان معنی است که بخش-های درشت رسوبات در بندهای بالادست گرفتار شده و کمتر به بندهای پایین دست منتقل می‌شوند. توجه

به‌طور کلی خوشه‌بندی سلسله مراتبی مدل‌ها و در نظر گرفتن مقادیر ضرایب کارایی برگزیده بر اساس شکل ۴ نشان می‌دهد که به ترتیب سه مدل فردلانند، ORL و ONL دارای برتری نسبی در مقایسه با سایر مدل‌ها هستند. مقدار ضریب تبیین در هر سه مدل برابر با ۰/۹۹ بوده و آماره AIC نیز در آن‌ها به ترتیب برابر با ۴۴/۱۳، ۴۳/۹۲ و ۴۱/۴۶- است.

کارایی مدل فردلانند در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک برای بانک داده‌های خاک کشور چین به‌وسیله Shangguan و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش شده است. همچنین، Hwang و همکاران (۲۰۰۲) نیز در بررسی مدل‌های مناسب برای بانک داده‌های خاک کشور کره جنوبی، مدل فردلانند را بر پایه مقادیر ضریب تبیین و نیز آماره آکائیک به‌عنوان مدل مطلوب ارزیابی نموده‌اند. هر چند Hwang و همکاران (۲۰۰۲) گزارش نموده‌اند که کارایی مدل فردلانند با افزایش مقدار رس در خاک افزایش می‌یابد، اما نتایج این پژوهش نشان داد که مدل مذکور در برآورد منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب شنی نیز کارایی بسیار مطلوبی داشته و می‌تواند برای کمی‌سازی توزیع اندازه ذرات رسوب به‌کار رود.

مقایسه اندازه ذرات رسوب با خاک اصلی دامنه:

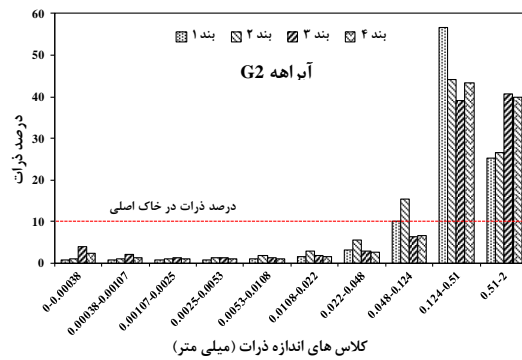
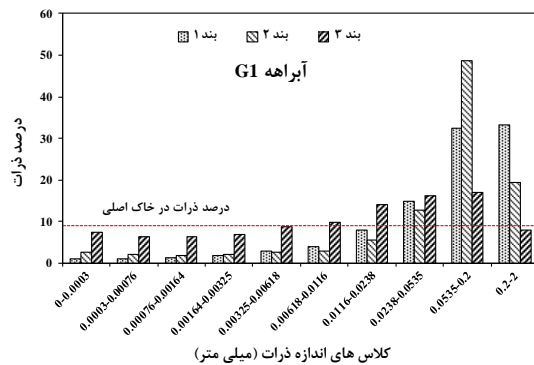
به‌منظور مقایسه دقیق‌تر توزیع اندازه ذرات رسوب پشت بندها و خاک اصلی دامنه، از روش پیشنهاد شده توسط Asadi و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شد. برای این منظور ابتدا توزیع تجمعی ذرات نمونه‌های خاک اصلی دامنه و رسوبات پشت بندها با استفاده از برازش مدل فردلانند که در بخش قبل به‌عنوان مدل برتر شناخته شده بود، به حالت پیوسته تبدیل شد (Fredlund و همکاران، ۲۰۰۰). پس از این مرحله منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات خاک اصلی بر اساس درصد جرمی ذرات، به ۱۰ طبقه مساوی تقسیم

نتایج موید این نکته است که بندهای پر به رغم تغییر در شیب طولی آبراهه و کند کردن سرعت جریان سیلاب، به دلیل عدم توانایی در نگه‌داشت جریان، امکان کنترل ذرات ریز رسوب را نداشته و این ذرات اغلب به شکل معلق در جریان، این بندها را ترک می‌کنند. در حالی که در بندهای نیمه‌پر به دلیل توانایی نگه‌داشت جریان سیلابی در دقایق اولیه، توزیع اندازه ذرات رسوب حداقل در بندهای پایین‌دست شبیه به خاک اصلی است.

این نتایج یافته‌های Hassanli و همکاران (۲۰۰۹) مبنی بر کارایی بندهای واقع در پایین‌دست آبراهه در به دام انداختن ذرات ریز رسوب را تأیید نموده و تأکید می‌نماید که فرآیند ترسیب انتخابی ذرات رسوب در توالی آبراهه‌ها بیشتر در بندهای خالی و یا نیمه‌پر که توانایی نگه‌داشت جریان را دارند، دیده می‌شود و در بندهای پر تقریباً تمامی ذرات در ابعاد کوچک‌تر از شن خیلی ریز (< 0.1) بندها را ترک می‌نمایند. از این رو تخلیه رسوبات پشت بندهای پر به‌عنوان یک عمل ضروری برای جلوگیری از ورود ذرات رسوب ریز سیلابی به منابع آب سطحی پایین‌دست، محسوب می‌شود.

به توزیع اندازه ذرات بند شماره ۳ که در پایین‌دست آبراهه واقع شده است، نشان می‌دهد که توزیع فراوانی ذرات با طبقات اندازه مختلف در این نمونه با خاک اصلی تطابق مطلوبی دارد. با در نظر گرفتن این نکته که فراوانی این ۱۰ طبقه در خاک اصلی برابر با ۱۰ درصد است، مشاهده می‌شود که فراوانی‌های نشان داده شده برای بند ۳ به‌ویژه در طبقات بزرگ‌تر از 0.001 میلی‌متر بسیار نزدیک به ۱۰ درصد است. پایین بودن درصد ذرات با طبقه کوچک‌تر در این بند نشان‌دهنده این واقعیت است که این بندها قابلیت نگهداری تمامی ذرات رسوب را در خود نداشته و بخشی از ذرات خاک اصلی که به رسوب تبدیل شده‌اند به شکل بار معلق توسط آبراهه به اراضی پایین‌دست منتقل می‌شوند.

در آبراهه G2 با توجه به پر بودن بندها و عدم توانایی آن‌ها در نگه‌داشت ذرات رسوب سیلابی، فراوانی طبقات اندازه‌ای کوچک (هفت طبقه اول) در هر چهار بند بسیار کمتر از خاک اصلی دامنه است، در حالی که در طبقات اندازه‌های درشت و در ذرات با قطر بیش از 0.124 میلی‌متر فراوانی ذرات در نمونه‌های رسوب به مراتب بیش از خاک اصلی دامنه است. این



شکل ۶- مقایسه درصد طبقات ده‌گانه اندازه ذرات در نمونه‌های رسوب پشت بندها با خاک اصلی دامنه

توزیع اندازه ذرات رسوب موجود در آخرین بند پایین‌دست تقریباً مشابه با خاک اصلی دامنه بود. در رابطه با بندهای پر ذرات رسوب به شکل قابل توجهی درشت‌تر از ذرات خاک اصلی دامنه بودند که نشان‌دهنده عدم توانایی این بندها در به دام انداختن ذرات ریز رسوب بوده و نمایان‌گر افزایش پتانسیل آلودگی در منابع آب سطحی پایین‌دست به دلیل عبور ذرات

در این مطالعه توزیع اندازه ذرات رسوب پشت بندهای سنگی ملاتی متوالی در دو آبراهه‌ی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توزیع اندازه ذرات رسوب پشت بندها در مقایسه با توزیع ذرات اندازه خاک دامنه درشت‌تر است. در بندهای نیمه‌پر متوالی با حرکت به سمت پایین‌دست آبراهه ترسیب انتخابی ذرات رسوب مشاهده شد به‌طوری‌که

مجموع قابلیت بسیار زیادی در کمی‌سازی منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب پشت بندها از خود نشان داد. با این حال پیشنهاد می‌شود که برای کسب اطمینان بیشتر از کارایی مدل مذکور، مطالعات گسترده‌تری در انواع مختلف بندها نظیر بندهای گابیونی صورت گیرد تا در صورت امکان بتوان مدل فردلاند را به‌عنوان یک مدل مطلوب در زمینه توصیف ویژگی‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات رسوب پشت بندها معرفی نمود.

ریز از بندهای پر به‌وسیله جریان‌های سیلابی است. ده مدل مختلف توزیع اندازه ذرات برای توصیف دانه‌بندی رسوبات پشت بندها مورد استفاده قرار گرفت و طیفی از ضرایب کارایی مختلف با توانایی‌های متنوع برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده واقع شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی می‌تواند ابزاری مطلوب برای ارزیابی دقیق مدل‌ها بر مبنای ضرایب کارایی متنوع باشد. بر اساس نتایج برآزش مدل‌های توزیع اندازه ذرات، مدل فردلاند در

منابع مورد استفاده

1. Abedini, M., M.A. Md-Said and F. Ahmad. 2012. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin). *Catena*, 97:63-70.
2. Allen, P.B. and N.H. Welch. 1971. Sediment yield reduction on watersheds treated with flood-retarding structures. *Transaction of ASAE*, 14(5): 814-817.
3. Asadi, H., A. Moussavi, H. Ghadiri and C.W. Rose. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology*, 406: 73-81.
4. Bagarello, V., G. Provenzano and A. Sgroi. 2009. Fitting particle size distribution models to data from Burundian soils for the BEST procedure and other purposes. *Biosystems Engineering*, 104: 435-441.
5. Botula, Y.D., W.M. Cornelis, G. Baert, P. Mafuka and E. VanRanst. 2013. Particle size distribution models for soils of the humid tropics. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4): 686-698.
6. Bird, N.R.A., E. Perrier and M. Rieu. 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science*, 51(1): 55-63.
7. Bombino, G., V. Tamburino and S.M. Zimbone. 2006. Assessment of the effects of check-dams on riparian vegetation in the Mediterranean environment: A methodological approach and example application. *Ecological Engineering*, 27(2): 134-144.
8. Buchan, G.D. 1989. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils. *Soil Science*, 147:155-161.
9. Buchan, G.D., K.S. Grewal and A.B. Robson. 1993. Improved models of particle-size distribution: An illustration of model comparison techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 901-908.
10. Bull, L.J. and M.J. Kirkby. 2002. Channel Heads and Channel Extension. In L.J. Bull and M.J. Kirkby (ed.) *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels*. John Wiley and Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, England, 398 pages.
11. Davy, P. and D. Lague. 2009. Fluvial erosion/transport equation of landscape evolution models revisited. *Journal of Geophysical Research*, 114: 1-16.
12. Esmaili-Nameghi, A. and A. Hassanli. 2007. Performance evaluation of check dams location across some streams in the fine sediment retention (case study: Droudzan Watershed). *JWSS-Isfahan University of Technology*, 11(1): 13-24 (in Persian).
13. Fredlund, M.D., D.G. Fredlund and G.W. Wilson. 2000. An equation to represent grain size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 817-827.
14. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size Analysis. In A. Klute (ed): *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Madison, Wis., 393-394.
15. Hassanli, A.M., A. Esmaili Nameghi and S. Beecham. 2009. Evaluation of the effect of porous check dam location on fine sediment retention (a case study). *Environmental Monitoring Assessment*, 152: 319-326.
16. Hobley, D.E.J., H.D. Sinclair, S.M. Mudd and P.A. Cowie. 2011. Field calibration of sediment flux dependent river incision. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-18.
17. Hashemi, S. and M. Arabkhedri. 2008. Evaluation of EPM model by sediment measurement in reservoirs of small dams. *Journal of Water and Soil Science*, Isfahan University of Technology, 11(42): 345-355 (in Persian).
18. Hwang, S.I., K.P. Lee, D.S. Lee, and S.E. Powers. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1143-1150.
19. Hwang, S.I. 2004. Effect of texture on the performance of soil particle-size distribution models. *Geoderma*, 123: 363-371.

20. Krause, P., D.P. Boyle and F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89–97.
21. Lee, T.K. and H.M. Ro. 2014. Estimating soil water retention function from its particle-size distribution. *Geosciences Journal*, 18(2): 219-230.
22. Misgana, K.M. 2011. Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(6): 1-27.
23. Mohammadi, M.H., M. Khatar and M. Vanclooster. 2014. Combining a single hydraulic conductivity measurement with particle size distribution data for estimating the full range partially saturated hydraulic conductivity curve. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5): 1594-1605.
24. Nadeu, E., A.A. Berhe, J.de Vente and C. Boix-Fayos. 2012. Erosion, deposition and replacement of soil organic carbon in Mediterranean catchments: a geomorphological, isotopic and land use change approach. *Bio Geosciences*, 9: 1099–1111.
25. Nearing, M.A. 1998. Why soil erosion models over predict small soil losses and under predict large soil losses. *Catena*, 32: 15–22.
26. Nemes, A., J.H.M. Wosten, A. Lilly and J.H.O. Voshaar. 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90: 187-202.
27. Rastgo, M., H. Bayat, A. Rastgo and E. Ebrahimi. 2014. The effect of textural groups on the fitting capability of soil particle size distribution curve models. *Journal of Water and Soil*, 28(1): 111-126.
28. Romero-Díaz, A., P. Marín-Sanleandro and R. Ortiz-Silla. 2012. Loss of soil fertility estimate from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena*, 99: 42-53.
29. Rowell, D.L. 1994. *Soil science: methods and applications*. Longman Scientific and Technical, 350 pages.
30. Sadeghi, S.H.R. and P. Saeidi. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 55(5): 821-831.
31. Shangguan, W., Y.J. Dai, C. García-Gutiérrez and H. Yuan. 2014. Particle-Size distribution models for the conversion of Chinese data to FAO/USDA System. *The Scientific World Journal*, ID 109310: 1-11.
32. Shiozawa, S. and G.S. Campbell. 1991. On the calculation of mean particle diameter and standard deviation from sand, silt, and clay fractions. *Soil Science*, 152: 427–431.
33. Zhang, X.C., M.A. Nearing, L.M. Risse and K.C. McGregor. 1996. Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39: 855–63.
34. Zhao, P., M. Shao and J. Zhuang. 2009. Fractal features of particle size redistributions of deposited soils on the dam farmlands. *Soil Science*, 174: 403-407.
35. Zhao, P., M. Shao and R. Horton. 2011. Performance of soil particle-size distribution models for describing deposited soils adjacent to constructed dams in the China loess plateau. *Acta Geophysica*, 59(1): 124-138.
36. Zolfaghari, A., Tirgharsoltani, M.T., Yazdani, M.R and E. Soleimani-Sardo. 2014. Investigation of models for describing soil particle size distribution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2): 199-209.

Application of mathematical models to describe the particle size distribution of sediments behind successive check dams

Leila Mehdizadeh¹, Farrokh Asadzadeh^{*2} and Abbas Samadi³

¹ MSc Student, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran, ² Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran and ³ Professor, Faculty of Agriculture, Urmia University

Received: 03 October 2014

Accepted: 15 December 2014

Abstract

Particle size distribution of sediment is one of the key factors which affects many other physical and chemical characteristics of the sediments. In this study, particle size distribution of the sediments trapped behind successive check dams was evaluated. Two waterways (G1 and G2) were selected in Noshan region of Urmia which have three and four check dams respectively. In each waterway, particle size distribution of sediment samples was compared with the original soil of the adjacent hill slope. Results indicated that the sediments have loamy-sand to sandy texture and have coarser particles than the adjacent soil samples. Selective deposition of sediment particles was observed in half full successive check dams of G1 waterway and the sediments of the check dam located at the downstream have a similar particle size distribution with adjacent soil sample. In filled dams of G2 waterway, considerable amounts of particles coarser than 0.124 mm in diameter were passed through dams. Some mathematical models were used to describe the particle size distribution of sediment samples and performance of them was evaluated by several efficiency criteria. Hierarchical cluster analysis of models, based on selected efficiency criteria, indicated that the Fredlund, ORL and ONL models have good performance in describing the particle size distribution of sediment samples. Coefficient of determination for these models was 0.99 and the Akaike's Information Criterion (AIC) for these models were -44.13, -43.92, and -41.46 respectively. It can be concluded that these models are applicable for quantifying the particle size distribution of sediment samples.

Key words: Fredlund model, Noshan, Particle size distribution model, Selective deposition, Urmia

* Corresponding author: farrokhasadzadeh@gmail.com