

ارزیابی خطای برآورد در تعدادی از مدل‌های توزیع اندازه ذرات برای توصیف دانه‌بندی رسوبات آبی

فرخ اسدزاده¹

استادیار دانشگاه ارومیه؛ f.asadzadeh@urmia.ac.ir

دریافت: 95/8/25 و پذیرش: 96/3/3

چکیده

توزیع اندازه ذرات رسوب از فاکتورهای کلیدی رسوب محسوب شده و بسیاری از ویژگی‌های مربوط به رسوبات از جمله ویژگی‌های هیدرولیکی و الکتریکی و ویژگی‌های مرتبط با فرسایش و قابلیت انتقال آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این مطالعه مقایسه‌ی تحلیلی خطای برآورد در تعدادی از مدل‌های ریاضی توزیع اندازه ذرات در توصیف رسوبات انباشته شده در پشت بندهای رسوبگیر متوالی بود. برای این منظور 20 نمونه رسوب از چهار آبراهه‌ی فصلی در مناطق نوشان و انبی ارومیه تهیه شده و توزیع اندازه ذرات آن‌ها به روش هیدرومتری تعیین شد. به منظور بررسی کارایی مدل‌ها از ضرایب کارایی با ماهیت متفاوت استفاده شد. خوشه‌بندی سلسله مراتبی مدل‌ها براساس منتخب نشان داد که 6 مدل ویبول، فردلاند، ویبول اصلاح شده، ون‌گنوختن، ONL و ORL نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بهتری داشتند. در بین این مدل‌ها نیز مدل ویبول دارای برتری نسبی در مقایسه با سایرین بود. کارایی مدل‌های برگزیده از نظر ضریب تبیین با افزایش درصد شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب افزایش یافت. خطای نسبی مدل‌ها در دامنه‌ی ذرات با قطر 0/005-2 میلی‌متر کم بوده و مدل‌ها توانایی مطلوبی در پیش‌بینی مقدار شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب داشتند.

واژه‌های کلیدی: بند رسوبگیر، مدل‌های ریاضی، کارایی مدل، مدل ویبول

¹ نویسنده مسئول، آدرس: گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

مقدمه

توزیع اندازه ذرات از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی مواد مختلف محسوب شده و از آن به عنوان یک فاکتور کلیدی در بسیاری از جنبه‌های علوم زمین استفاده می‌شود (یانگ و همکاران، 2012). در علوم زمین بسیاری از ویژگی‌های مربوط به رسوبات در ارتباط مستقیم با چگونگی توزیع اندازه‌ی ذرات آن‌ها می‌باشند که از آن جمله می‌توان به مواردی مانند (1) ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر تخلخل، نفوذپذیری، چگالی ظاهری و مقدار آب باقیمانده (بادو، 2000)؛ (2) ویژگی‌های الکتریکی نظیر مقدار بار الکتریکی ذرات، ضریب دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی (کرونیکان و همکاران، 2004)؛ (3) ویژگی‌های مرتبط با انتقال نظیر حرکت املاح و اعوجاج (ایندرارائنا و همکاران، 2000)؛ (4) ترکیب و واکنش‌پذیری شیمیایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی و سرعت واکنش‌های شیمیایی (ولتج و همکاران، 2004؛ سیرا و همکاران، 2013)؛ (5). وجود برخی ایزوتوپ‌های طبیعی مانند ^{232}Th ، ^{238}U ، ^{40}K (فریندیک و همکاران، 1999)؛ و از همه مهمتر (6) قابلیت انتقال توسط عوامل فرساینده مانند آب و باد و ترسیب مجدد ذرات رسوب (فلمینگ، 2007) اشاره نمود.

اندازه ذرات رسوب غالباً به صورت یک تابع ریاضی و تحت عنوان توزیع اندازه ذرات (PSD^1) توصیف شده و بر این اساس اندازه ذرات در مقابل فراوانی نسبی و یا فراوانی تجمعی آن‌ها ترسیم و مدل‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات بر آن برازش می‌یابند. هدف از برازش مدل مناسب بر داده‌های توزیع اندازه ذرات، به دست آوردن تابعی پیوسته از اندازه در مقابل فراوانی است تا به کمک آن بتوان درون‌یابی دقیق‌تری بین داده‌های نقاط اندازه‌گیری شده به دست آورد (گوپتا و یانگ، 2006؛ منندزآگوئدا و همکاران، 2015). از این رو معرفی و استفاده از مدل‌های کارآمدتر می‌تواند در طبقه‌بندی ویژگی‌های ذرات رسوب اهمیت ویژه‌ای داشته باشد (فردلان و همکاران، 2000؛ سیرا و همکاران، 2011).

بندهای رسوبگیر سازه‌هایی هستند که اغلب در مسیر آبراه‌های فصلی بالادست رودخانه‌ها احداث شده و هدف از ایجاد آن‌ها جلوگیری از ورود ذرات رسوب حاصل از فرسایش اراضی بالادست به درون رودخانه‌ی اصلی و متعاقباً به پشت مخازن سدها می‌باشد (عابدینی و همکاران، 2012). این بندها همچنین با به دام انداختن رسوب موجود در جریان‌ها سیلابی، شیب طولی آبراهه‌ها را کاهش داده و فرصت مناسبی برای انجام عملیات

بیولوژیکی کنترل فرسایش خاک از طریق استقرار گیاهان را فراهم می‌آورند (بومینو و همکاران، 2006؛ رومرو دیاز و همکاران، 2012). با توجه به نقش بندهای رسوب‌گیر در به دام انداختن ذرات رسوب، مطالعه‌ی رسوبات موجود در پشت این بندها از نظر ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات دارای اهمیت بسزایی است چرا که از یک طرف ذخیره رطوبتی در پشت این بندها تابعی از توزیع اندازه ذرات رسوبات بوده و از سوی دیگر مطالعات متعدد در زمینه فرسایش و رسوب بیانگر این نکته است که اندازه‌های مختلف ذرات رسوب دارای ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی بوده و از نظر آثار مربوط به آلاینده‌ی و نیز تلفات عناصر غذایی بسیار متفاوت عمل می‌نمایند (حسنلی و همکاران، 2009؛ رومرو دیاز و همکاران، 2012). از این رو می‌توان گفت که بررسی و مدل‌سازی دقیق توزیع اندازه ذرات رسوب در پشت بندهای رسوب‌گیر بسیار حائز اهمیت است.

مرور منابع نشان می‌دهد که در طول دهه‌ی اخیر مدل‌های متعددی برای توصیف توزیع اندازه ذرات به کار برده شده‌اند که هر کدام دارای پارامترها مختلفی بوده و مبتنی بر فرضیات متفاوتی هستند. در رابطه با ذرات رسوب، مدل لاگ‌نرمال تک‌نمایی کاربرد بیشتری داشته است (سان و همکاران، 2002). اما در کنار آن می‌توان به سایر مدل‌ها نظیر مدل لاگ‌نرمال دونمایی شینوازا و کمپل (1991) مدل توانی مبتنی بر هندسه فرکتالی (پیرد و همکاران، 2000)، مدل‌های چهار پارامتری مانند فردلان (فردلان و همکاران، 2000) و گمپرتز (نمس و همکاران، 1999) و همچنین مدل‌هایی نظیر ویبول و ویبول اصلاح شده (ژائو و همکاران، 2013) و سوربک (اوپرلونی، 2005؛ منندزآگوئدا و همکاران، 2015) اشاره نمود.

با وجود موفقیت نسبی استفاده از بیشتر این مدل‌ها در توصیف توزیع اندازه ذرات، بررسی‌های ما نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های انگشت‌شماری در زمینه مقایسه‌ی کارآمدی این مدل‌ها در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب صورت گرفته است. لذا بررسی قابلیت برازش تعداد وسیعی از مدل‌های توزیع اندازه ذرات، با به کار بردن شاخص‌های کارایی متعدد و با ماهیت متفاوت، جهت ارزیابی دقیق و جامع مدل‌ها حائز اهمیت خواهد بود. با توجه به اینکه بندهای رسوبگیر از نظر کاربردی اهمیت ویژه‌ای در میان اقدامات کنترل فرسایش خاک و آلودگی دارند؛ شایسته است که مطالعه‌ی دقیقی در ارتباط با توانمندی مدل‌های در توصیف توزیع اندازه‌ی ذرات رسوب آن‌ها صورت گیرد. لذا در این

¹ Particle size distribution

0/002-0/005 میلی‌متری سیلت³ و ذرات با قطر کوچکتر از 0/002 میلیمتر رس⁴ نامیده شده‌اند.

مدل‌های توزیع اندازه ذرات

برای بررسی کارایی مدل‌های مختلف در توصیف توزیع اندازه‌ی ذرات رسوب، 13 مدل توزیع اندازه بر روی داده‌های به دست آمده از روش هیدرومتری برازش داده شد. جزئیات مربوط به معادلات و پارامترهای مدل‌های مورد استفاده، در جدول 1 ارائه شده است. برازش مدل‌های مذکور بر روی داده‌های مشاهده‌ای از طریق رگرسیون غیرخطی و با بهینه‌سازی مجموع مربعات خطا با کاربرد نرم‌افزار MATLAB 7. 11 صورت گرفت. در پژوهش حاضر به منظور مقایسه دقیق‌تر توانایی مدل‌ها، طیف متنوعی از ضرایب کارایی با قابلیت‌های مختلف (جدول 2) به کار برده شده است. به طور کلی ضرایب کارایی به عنوان معیارهای ریاضی برای بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌ای می‌باشند (کراوس و همکاران، 2005) و هر کدام از آن‌ها می‌توانند قابلیت مدل را از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار دهند. برای نمونه ضریب تبیین نشان دهنده‌ی نسبت کوواریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده بر حاصلضرب واریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد و یا اینکه ضریب GMER به عنوان معیاری از خطا بوده و در عین حال بیش برآوردی و کم‌برآوردی کلی مدل را نیز نشان می‌دهد. مقادیر بیش از 1 برای آماره GMER بیانگر وجود کم‌برآوردی و مقادیر کمتر از 1 این آماره بیانگر بیش‌برآوردی سیستماتیک مدل است (شانگوان و همکاران، 2014).

آماره آکائیک نیز به عنوان شاخصی است که تعداد پارامترهای مدل را به عنوان یک معیار در کارایی مدل 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 دهنده‌ی کارایی مدل از حیث خطا و تعداد پارامترها می‌باشد (هوانگ و همکاران، 2012).

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 2 برای تمامی مدل‌ها و در همه‌ی نمونه‌های مورد بررسی محاسبه شده و ضرایب مذکور با استفاده از روش خوشه-

مطالعه کارآیی 13 مدل مختلف که دارای طیف متنوعی از فرضیات اولیه می‌باشند در توصیف توزیع اندازه رسوبات به صورت تحلیلی مقایسه شده و طی آن ضمن معرفی مدل یا مدل‌های برتر، ارتباط کارآیی این مدل‌ها با ویژگی‌های رسوبات مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین توزیع اندازه ذرات

برای انجام این مطالعه دو آبراهه در منطقه‌ی نوشان ارومیه که هر یک دارای 3 و 4 بند رسوبگیر، و دو آبراهه در منطقه‌ی آنبی ارومیه که آن‌ها نیز به ترتیب دارای 6 و 7 بند رسوبگیر بودند انتخاب شد. بندها از نوع سنگی ملاتی بوده و توزیع اندازه ذرات رسوبات سطحی انباشته شده در پشت بندهای رسوب‌گیر (در مجموع 20 نمونه) مورد مطالعه قرار گرفت.

برای تعیین توزیع اندازه‌ی ذرات رسوبات، از هر بند در مکانی نزدیک به دیواره بند و در امتداد آن 3 نمونه از عمق 0-20 سانتی‌متری تهیه شد. در نمونه-برداری از بندها دقت شد تا حتی الامکان از مناطق نزدیک به دیواره‌ی آبراهه نمونه‌برداری نگردد تا از اختلاط خاک-های مجاور دیواره با نمونه‌های رسوب جلوگیری شود (رومرودیاز و همکاران، 2012). نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و پس از هوا خشک شدن از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند. توزیع اندازه‌ی ذرات آن‌ها به روش هیدرومتری (گی و باوور، 1986) تعیین شد؛ به این ترتیب که جرم معینی از نمونه‌ها با محلول پراکنش (هگزامتافسفات سدیم) تیمار شده و پس از 24 ساعت به درون یک مزور یک لیتری منتقل و توزیع اندازه ذرات با استفاده از قرائت هیدرومتر در زمان‌های مختلف (از 30 ثانیه تا 48 ساعت) تعیین شد. با توجه به محدودیت هیدرومتر در تعیین توزیع اندازه ذرات با قطر بیش از 0/05 میلیمتر، پس از آخرین قرائت هیدرومتر، نمونه‌های داخل مزور به روی یک الک 0/05 میلی‌متری ریخته شده و به خوبی شستشو داده شدند تا ذرات با قطر بیش از 0/05 جدا شوند. پس از جدا کردن ذرات بزرگتر از 0/05 میلی‌متر، توزیع اندازه ذرات این بخش (2mm-0/05) نیز با استفاده از سری الک‌های با قطر 1، 0/5، 0/25 و 0/15 میلی‌متری به صورت دستی تعیین گردید. لازم به ذکر است که در این مطالعه براساس طبقه‌بندی¹ USDA ذرات با محدوده‌ی قطری 2-0/05 میلیمتری شن (ماسه)²، ذرات با محدوده‌ی قطری

³. Silt

⁴. Clay

¹. United States Department of Agriculture

². Sand

همانگونه که در شکل 2 نشان داده شده است متوسط مقادیر R^2 از 0/888 در مدل نرمال تا 0/986 در مدل ویبول متغیر بود. مدل‌های فردلانند، ORL و ONL، نیز از نظر R^2 کارایی نسبتاً مشابهی با مدل ویبول داشته‌اند. در پژوهش‌های مشابه بر روی نمونه‌های خاک نیز کارایی بیشتر مدل‌های ویبول و فردلانند بر اساس آماره R^2 گزارش شده است (شانگوان و همکاران، 2014). در بین مدل‌های مورد بررسی ضمن اینکه دو مدل نرمال و مدل فرکتالی کمترین مقادیر میانگین R^2 را داشتند، دارای بیشترین تغییرات R^2 در بین نمونه‌ها نیز بودند که این امر نشان می‌دهد که این مدل‌ها علاوه بر اینکه کارایی کمتری دارند، دامنه‌ی توانایی آن‌ها در نمونه‌های مختلف نیز متفاوت است.

به منظور بررسی اثر افزایش پارامترهای مدل در کارایی برازش آن از آماره AIC استفاده شد. دقت برازش مدل‌ها به داده‌های مشاهده شده به تعداد پارامترهای مدل-ها وابسته می‌باشد، ولی لزوماً افزایش تعداد پارامترهای یک مدل مترادف با بهبود قابلیت برازش آن مدل نیست (هوانگ، 2004). برای مثال، مدل چهار پارامتری گمپرتز برازش ضعیف‌تری نسبت به مدل دو پارامتری لوگ نرمال و همچنین مدل یک پارامتری جکی نشان داد. مدل ویبول براساس آماره آکائیک برابر با 57/66- به عنوان کارآمدترین مدل از حیث خطا و تعداد پارامترها می‌باشد. از این نظر مدل‌های فردلانند، ویبول اصلاح شده، ORL، ONL به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. بر اساس این آماره، مدل نرمال ساده با مقدار 29/79- ضعیف‌ترین مدل معرفی شد. شانگوان و همکاران (2014) نیز مدل-های اندرسون (با چهار پارامتر) و ویبول (با سه پارامتر) را به عنوان مدل‌های با کمترین مقدار AIC معرفی نموده‌اند. در بررسی صورت گرفته توسط هوانگ (2004) و هوانگ و همکاران (2002) براساس مقایسه مقادیر متوسط AIC و R^2 ، مدل فردلانند چهار پارامتری در بین مدل‌های مورد بررسی بهترین عملکرد را نشان داد. در پژوهش حاضر نیز مدل فردلانند چهار پارامتری به عنوان یکی از مدل‌های برتر بین 13 مدل مورد ارزیابی بود. راستگو و همکاران (1392) نیز مدل ویبول را براساس آماره AIC به عنوان مدل برتر معرفی نمودند اما در مطالعه‌ی آن‌ها مدل ون-گنوختن (Van) دارای AIC کمتری نسبت به مدل فردلانند بود که این امر تأثیر ویژگی‌های نمونه بر توانمندی مدل‌ها را تأیید می‌نماید. راستگو و همکاران (1392) همچنین مدل جکی (Jak) را به علت داشتن تنها یک پارامتر برازشی از نظر آماره AIC نسبت به مدل‌های لوگ نرمال، ORL، ONL و Sh-Cam بهتر ارزیابی نموده‌اند. مقایسه‌ی

بندی سلسله مراتبی¹ و تجزیه به مولفه‌های اصلی² دسته-بندی شدند. سپس از هر گروه یک ضریب کارایی انتخاب شده و در ادامه، مدل‌های مورد اشاره در جدول 1 براساس ضرایب کارایی برگزیده شده مجدداً دسته‌بندی شدند. از نرم‌افزار Minitab 14 به منظور خوشه‌بندی و تجزیه به مولفه‌های اصلی مدل‌ها و ضرایب کارایی بهره-گیری شد. برای تحلیل همبستگی داده‌ها از نرم‌افزار SPSS18 استفاده شد. رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج

مقادیر متوسط هر یک از ذرات سه گانه (شن (ماسه)، سیلت و رس) در هر چهار آبراهه‌ی مورد بررسی در جدول 1 ارائه شده است. از نکات قابل توجه در رابطه با این جدول، فراوانی نسبتاً زیاد سیلت و شن (ماسه) در نمونه‌ها در مقایسه با مقدار رس آن‌ها است. به عبارت دیگر بافت نمونه‌های رسوب برداشت شده اغلب در محدوده‌ی بافت‌های درشت لوم تا لوم‌شنی قرار دارد. این امر نشان دهنده‌ی وجود فرآیند ترسیب انتخابی در آبراهه-ها بوده و حاکی از این است که ذرات درشت‌تر موجود در جریان‌های سیلابی، به دلیل جرم سنگین‌تر خود در برخورد با بندهای رسوب‌گیر ترسیب پیدا کرده و به احتمال زیاد، ذرات ریزتر موجود در جریان‌ها سیلابی توسط جریان آب خارج شده‌اند (رومرودیاز و همکاران، 2012). این مشاهدات تأکیدی بر کارایی بندها در نگه-داشت ذرات درشت رسوب بوده (حسنلی و همکاران، 2009) و اهمیت توجه به ذرات درشت در نمونه‌های رسوب پشت بندها به عنوان یک ویژگی کلیدی از رسوبات را نشان می‌دهد.

برازش مدل‌ها و مقایسه کارایی آن‌ها

نحوه‌ی برازش تعدادی از مدل‌های ذکر شده در شکل 1 برای دو نمونه رسوب منتخب نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود مدل‌ها دارای توانایی متفاوتی در توصیف داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات رسوب هستند. از این رو به منظور مقایسه‌ی مدل‌های مورد بررسی، پس از برازش هر مدل به توزیع اندازه ذرات رسوب، ضرایب کارایی مدل مذکور در هر نمونه با استفاده از روابط ارائه شده در جدول 2 محاسبه شد. نتایج مربوط به هر یک از ضرایب کارایی مورد اشاره به صورت نمودارهای جعبه‌ای در شکل 2 قابل مشاهده است.

¹ Hierarchical cluster analysis

² Principal component analysis (PCA)

بین مطالعات مختلف گویای این واقعیت است که و ویژگی‌های آن‌ها، توانایی مدل‌های مختلف متفاوت براساس نوع نمونه‌های مورد بررسی (خاک و یا رسوب) است.

جدول 1- مدل‌های توزیع اندازه ذرات رسوبات مورد استفاده

پارامترهای مدل	معادله	علامت	نام مدل
μ, σ	$F(d) = (1 + \operatorname{erf} \left[\frac{d - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2$	Norm	نرمال
D, C	$F(d) = Cd^{(3-D)}$	Frac(B)	فرکتالی ^q
$d_0 = \frac{p}{2} \text{mm}$	$F(d) = \exp \left[-\frac{1}{p^2} \left[\ln \frac{d}{d_0} \right]^2 \right]$	Jak	جکی [#]
μ, σ	$F(d) = (1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2$	Log-N	لاگ‌نرمال
e, μ, σ	$F(d) = \left[(1 - e)(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{d - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2 \right] + e$	ORL	ORL [§]
c, μ, σ	$F(d) = \left[(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2 \right] + c$	ONL	ONL [†]
C, μ, σ	$F(d) = \left[C \times \left[(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2 \right] \right] + \left[(1 - C) \times \left[(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]) / 2 \right] \right]$	Sh-Cam	شیوزاوا و کمبل
a, n, m, d_f $d_m = 0.0001 \text{mm}$	$F(d) = \left[\ln \left(\exp(1) + \left(\frac{a}{d} \right)^n \right) \right]^{-m} \times \left[1 - \left(\ln \left(1 + \frac{d_f}{d} \right) / \ln \left(1 + \frac{d_f}{d_m} \right) \right)^7 \right]$	Fred	فردلاند
$\gamma, \mu, \alpha, \beta$	$F(d) = \alpha + \gamma \exp[-\exp[-\beta(d - \mu)]]$	Gom	گمپرتز
N, d_g $M=1-(2/N)$	$F(d) = \left[1 + \left(d_g / d \right)^N \right]^{-M}$	Van	ون‌گنوختن
c, a, b	$F(d) = c + (1 - c)(1 - \exp(-aD^b))$ $D = d - d_{\min} / d_{\max} - d_{\min}$	W	ویبول
K, n	$F(d) = 1 - \exp(-Kd^n)$	R-W	ویبول اصلاح شده
d_{50}, b $d_{\max} = 2 \text{mm}$	$F(d) = \left[1 + \left[\ln \left(\frac{d_{\max}}{d} \right) / \ln \left(\frac{d_{\max}}{d_{50}} \right) \right]^b \right]^{-1}$	S	سوربک [£]

q Fractal (Bisret al. 2000)

Jaky

§ Offset-renormalized log-normal model

† Offset-nonrenormalized log-normal model

£ Swerbec

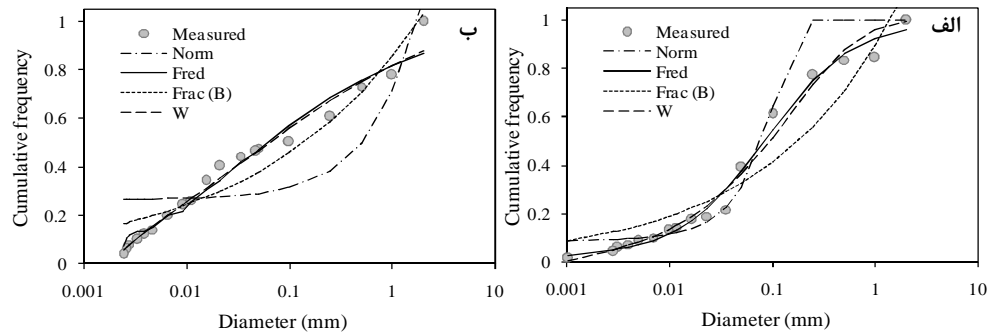
جدول 2- ضرایب کارایی برای ارزیابی مدل‌ها

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

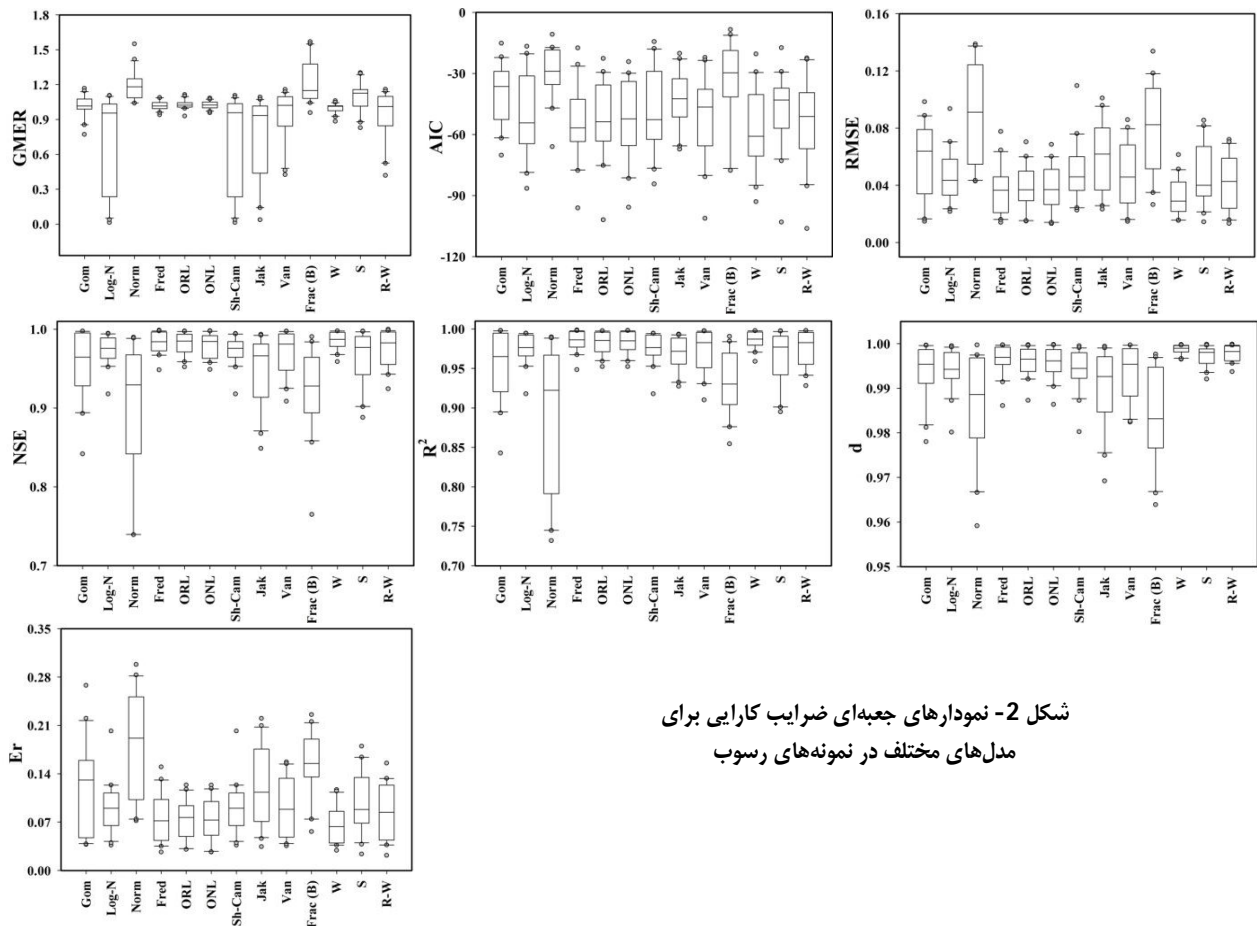
O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل در یک نقطه، O_{mean} و P_{mean} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل، n تعداد نقاط و p تعداد پارامترهای مدل

جدول 3- میانگین پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده در بندها در مناطق مورد مطالعه

کلاس بافت	رس	سیلت	شن (ماسه)	آبراهه
	%			
لوم	10/68±7/04	41±12/53	48/33±19/22	آبراهه 1
شن لومی	3/1±2/5	10/6±2/1	86/2±2/9	آبراهه 2
لوم شنی	8/8±3/6	34/9±5/8	56/2±9/2	آبراهه 3
لوم شنی	10/1±8/6	31/5±25/1	58/4±33/4	آبراهه 4



شکل 1- نمودار دانه‌بندی دو نمونه رسوب منتخب و نحوه‌ی برازش چهار مدل مختلف بر آن‌ها



شکل 2- نمودارهای جعبه‌ای ضرایب کارایی برای مدل‌های مختلف در نمونه‌های رسوب

های لوگ- نمایی، فرکتال و نمایی را نیز گزارش نمودند. براساس مقادیر متوسط شاخص d در نمونه‌های رسوب، مدل‌های ویبول، ویبول اصلاح شده با d برابر با 0/998 مطلوب‌ترین و مدل فرکتال با مقدار d برابر با 0/983 ضعیف‌ترین مدل‌ها ارزیابی شدند. ضریب GMER نیز در مدل‌های ویبول، گمپرتز و فردلاند نزدیک به یک بود که نشان دهنده‌ی کارایی مطلوب این مدل‌ها می‌باشد.

به طور کلی بررسی ضرایب کارایی مختلف نشان می‌دهد که هر چند مدل ویبول نسبت به سایر مدل‌ها کارآمدتر بوده و مدل‌های نرمال و فرکتال کارایی کمی دارند، اما سایر مدل‌ها از نظر ضرایب کارایی مختلف رفتار متفاوتی دارند. برای نشان دادن این واقعیت، مدل‌ها براساس میانگین ضرایب کارایی مختلف در 20 نمونه رسوب رتبه‌بندی شدند که نتایج آن در جدول 4 قابل مشاهده است.

مقایسه مدل‌ها براساس RMSE نشان می‌دهد که مدل ویبول و فردلاند با کمترین مقادیر RMSE به‌عنوان برترین مدل‌های PSD بودند و از طرفی مدل‌های نرمال و فرکتالی با بیشترین مقادیر RMSE ضعیف‌ترین مدل‌های PSD هستند. بررسی شکل 2 هم‌چنین نشان می‌دهد که مدل‌های ویبول، فردلاند، ONL و ORL دارای کم‌ترین مقدار تغییرات RMSE در بین نمونه‌های مختلف بودند که این امر نشان دهنده‌ی این واقعیت است که مدل‌های مذکور دارای ثبات عملکرد مطلوب در طیف نسبتاً وسیعی از نمونه‌های رسوب هستند. ژائو و همکاران (2011) در بررسی کارایی مدل‌های PSD در خاک‌های رسوبی پیرامون سدها، گزارش کردند که مدل فردلاند چهار پارامتری بهترین برازش را به داده‌های PSD داشته است. هم‌چنین مدل ویبول را در بین مدل‌های سه پارامتری و مدل جکی را در بین مدل‌های تک پارامتری به‌عنوان مدل‌های برتر معرفی نموده و قابلیت برازش ضعیف مدل-

جدول 4- ترتیب کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات براساس میانگین ضرایب کارایی مختلف در نمونه‌های رسوب

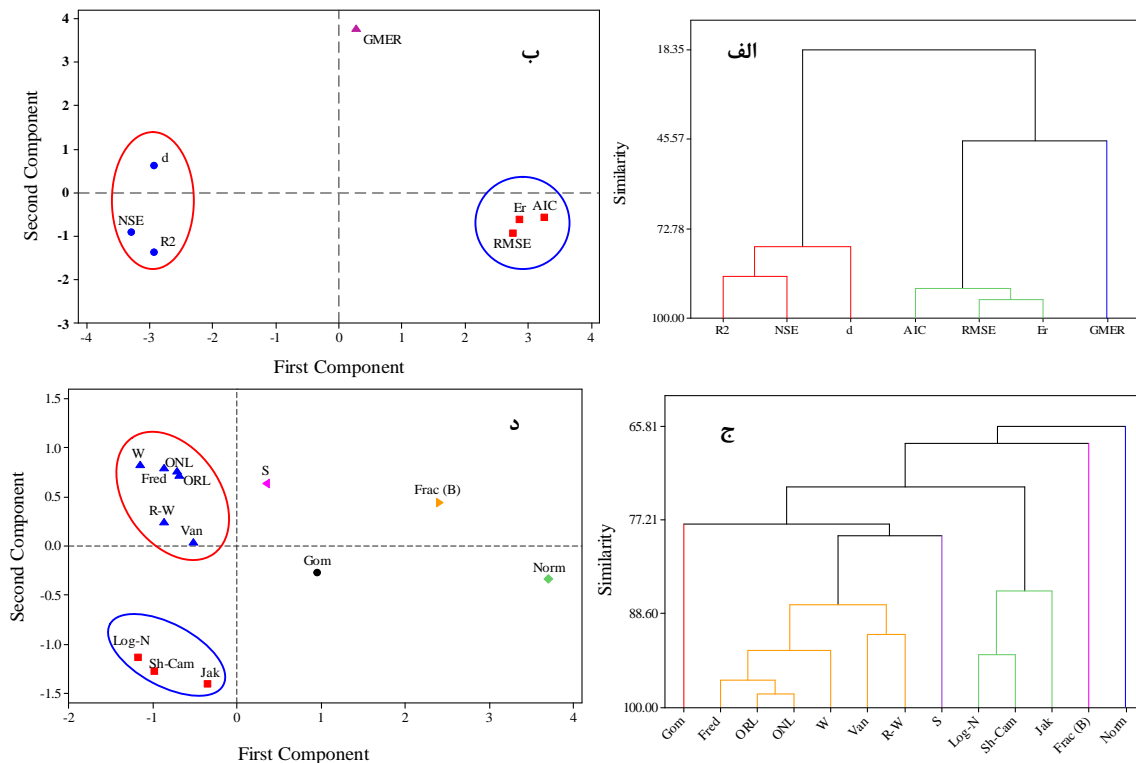
d	NSE	RMSE	GMER	ER	AIC	R ²	ترتیب کارایی
W	W	W	W	W	W	W	1
R-W	Fred	Fred	Gom	ORL	Fred	Fred	2
S	ORL	ONL	Fred	ONL	R-W	ONL	3
Fred	ONL	ORL	ONL	Fred	ORL	ORL	4
ORL	R-W	R-W	ORL	R-W	ONL	R-W	5
ONL	Log-N	Van	Van	Sh-Cam	Van	Sh-Cam	6
Log-N	Sh-Cam	Log-N	R-W	Log-N	Log-N	Log-N	7
Sh-Cam	Van	S	S	Van	Sh-Cam	Van	8
Gom	S	Sh-Cam	Norm	S	S	Jak	9
Van	Gom	Gom	Frac(B)	Gom	Jak	S	10
Jak	Jak	Jak	Jak	Jak	Gom	Gom	11
Norm	Frac (B)	Frac (B)	Log-N	Frac (B)	Frac (B)	Frac (B)	12
Frac (B)	Norm	Norm	Sh-Cam	Norm	Norm	Norm	13

منظور تأیید نتایج حاصل از خوشه‌بندی، تجزیه‌ی 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 گردید. نتایج مربوط به خوشه‌بندی ضرایب کارایی در شکل 3 (الف و ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود ضرایب Er، AIC و RMSE از نظر عملکرد در داده‌های این تحقیق مشابه عمل نموده و در یک دسته قرار گرفته‌اند. هم‌چنین دو ضرایب R^2 و NSE نیز دارای عملکرد مشابهی بوده و در یک دسته جای گرفته‌اند و ضریب

همان‌گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌شود؛ ترتیب کارایی مدل‌ها، به‌رغم یکسان بودن رتبه‌ی مدل ویبول، براساس ضرایب کارایی مختلف متفاوت است. این امر نشان می‌دهد که تنوع ضرایب کارایی برای ارزیابی مدل‌ها در عین سودمند بودن به دلیل ماهیت مختلف این ضرایب، قضاوت در رابطه با قابلیت مدل‌ها به ویژه زمانی که تعداد آن‌ها زیاد باشد را با مشکلاتی مواجه می‌نماید. برای حل این مشکل و ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها، ابتدا ضرایب کارایی محاسبه شده برای مدل‌ها، استاندارد شده و بر اساس روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و بر مبنای میزان مشابهت، دسته‌بندی شدند. به

بندی سلسله مراتبی مدل‌ها و در نظر گرفتن مقادیر ضرایب کارایی برگزیده براساس شکل 3 نشان می‌دهد که شش مدل ویبول، ویبول اصلاح شده، فردلانند، ون-گنوختن، ORL و ONL دارای برتری نسبی در مقایسه با سایر مدل‌ها بوده و به عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند. هر چند برتری مدل‌های مذکور در پژوهش‌های دیگر مربوط به تعیین توزیع اندازه ذرات خاک نیز گزارش شده است (فردلانند و همکاران، 2000؛ هوانگ و همکاران، 2002؛ ژائو و همکاران، 2013؛ شانگون و همکاران، 2015) اما نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های مذکور در برآورد منحنی توزیع اندازه ذرات رسوبات شنی نیز کارایی بسیار مطلوبی داشته و می‌تواند برای کمی‌سازی توزیع اندازه ذرات رسوب به کار رود.

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 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 3 (ج، د) نشان داده شده است. شکل 3 به روشنی نشان دهنده‌ی مشابهت مدل‌های ویبول، ویبول اصلاح شده، فردلانند، ون‌گنوختن ORL و ONL بوده و آن‌ها را در یک گروه جای داده است. هم‌چنین مدل‌های جکی، شیوزاوا و کمبل و لوگ‌نرمال نیز دارای عملکرد مشابهی بوده و در یک گروه جای گرفته‌اند. شکل 3 هم‌چنین نشان دهنده‌ی عملکرد متفاوت مدل‌های سوربک، گمپرتز، فرکتال و نرمال در مقایسه با سایر مدل‌ها است. بطور کلی خوشه-



شکل 3- دسته‌بندی ضرایب کارایی بر مبنای روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و نمودار پراکنش ضرایب کارایی نسبت به مولفه‌های اصلی اول و دوم

مختلف عملکرد نسبتاً متفاوتی دارند. بنابراین به منظور بررسی تأثیرپذیری کارایی مدل‌های منتخب از مقدار شن (ماسه)، سیلت و رس نمونه‌ها، ارتباط بین ضرایب کارایی (R^2 ، AIC و GMER) مدل‌های منتخب با درصد شن

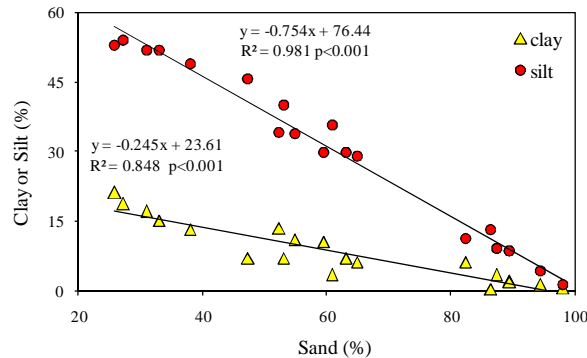
بحث و نتیجه‌گیری

تأثیرپذیری کارایی مدل‌ها از محتوای ذرات سه‌گانه رسوبات

بررسی کارایی 6 مدل برگزیده نشان می‌دهد که از حیث ضرایب کارایی مدل‌های مذکور در نمونه‌های

(ماسه) در نمونه‌های رسوب می‌تواند معرف مقدار سیلت و رس آن‌ها بوده و براین اساس می‌توان گفت که کاربرد درصد شن (ماسه) به تنهایی می‌تواند تأثیرپذیری مدل‌های منتخب از محتوای ذرات سه‌گانه نمونه‌ها را نشان دهد.

(ماسه) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که مقدار شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب دارای رابطه‌ی بسیار قوی با درصد سیلت و رس است که این ارتباط در شکل 4 قابل مشاهده است. بنابراین مقدار شن

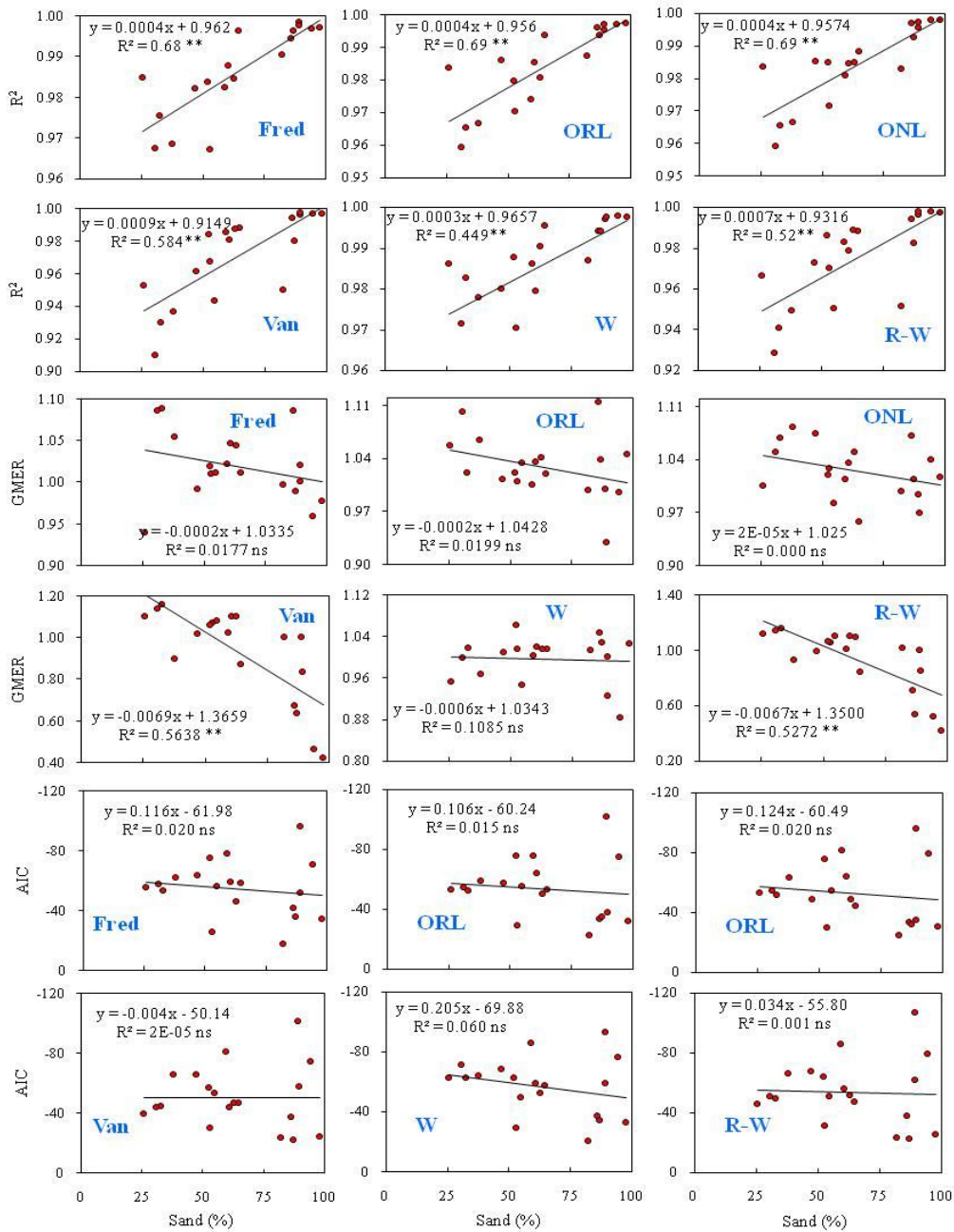


شکل 4- ارتباط بین درصد ذرات شن (ماسه) با درصد رس و سیلت در نمونه‌های رسوب

شن (ماسه) در نمونه‌ها نداشت. که این امر بیانگر این واقعیت است که درصد شن (ماسه) نمونه‌ها تأثیری بر عملکرد مدل‌ها براساس آماره‌ی AIC نداشته است که این امر شاید به دلیل در نظر گرفتن تعداد پارامترهای مدل‌ها در این آماره باشد. به طور کلی براساس نتایج این بخش می‌توان گفت که در نمونه‌های رسوب که اغلب دارای مقدار شن (ماسه) زیادی هستند با افزایش درصد شن (ماسه) کارایی مدل‌ها از حیث R^2 افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران (2013) نیز با بررسی تعداد زیادی نمونه که دارای 30 تا 95 درصد شن (ماسه) بودند بر عملکرد مطلوب مدل ویبول و ویبول اصلاح شده در نمونه‌های شن (ماسه)‌ای اشاره نموده‌اند. نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر، مبنی بر عدم وابستگی درصد شن (ماسه) رسوبات با مقادیر آماره AIC، با نتایج گزارش شده توسط ژائو و همکاران (2011) همخوانی دارد. روابط ایجاد شده نظیر آنچه در شکل 5 نمایش داده شده است؛ می‌تواند در پیش‌بینی حدود اطمینان مورد نظر پژوهشگران براساس براساس وضعیت شن (ماسه) نمونه‌ها کمک نماید به عبارت دیگر مقدار ضریب R^2 مورد انتظار برای نمونه‌ی با درصد شن (ماسه) مشخص و برای مدل ویبول با استفاده از این روابط قابل دستیابی است.

ارتباط بین درصد شن (ماسه) نمونه‌ها با مقدار R^2 ، AIC و GMER مدل‌های منتخب در شکل 5 نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود؛ تغییرات ضرایب کارایی در مقابل تغییرات درصد شن (ماسه) نمونه‌ها رفتار متفاوتی دارند که این امر به نوبه‌ی خود بر دسته‌بندی صحیح ضرایب کارایی (شکل 3) تأکید دارد. مطابق شکل 5 با افزایش درصد شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب مقدار ضریب R^2 در همه‌ی مدل‌ها به صورت خطی افزایش می‌یابد. که این امر نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر مدل‌ها در نمونه‌های درشت بافت است. این یافته مشابه گزارش‌ها ذوالفقاری و همکاران (2014) در دامنه‌ی نسبتاً وسیعی از کلاس‌های بافتی است. تغییرات ضریب GMER در مقابل درصد شن (ماسه) فقط برای مدل‌های ون‌گنوختن و ویبول اصلاح شده معنی‌دار بود. روند تغییرات GMER در این دو مدل به گونه‌ای است که با افزایش درصد شن (ماسه) در نمونه‌ها تمایل مدل به سمت کم‌برآوردی درصد ذرات تمایل پیدا می‌کند. مقدار بهینه‌ی ضریب GMER برای هر دو مدل در نمونه‌های با 50 درصد شن (ماسه) به دست می‌آید. راستگو و همکاران (2014) نیز با بررسی 160 نمونه خاک زراعی بر تأثیر کلاس بافتی خاک‌ها بر قابلیت برازش مدل‌های توزیع اندازه ذرات تأکید نموده‌اند.

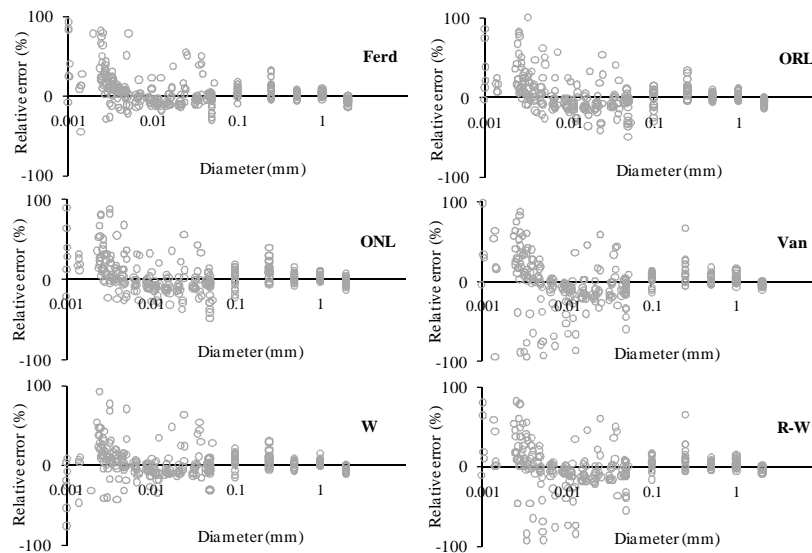
برخلاف دو ضریب GMER و R^2 ضریب AIC مدل‌های برگزیده هیچ‌گونه رابطه‌ی معنی‌داری با درصد



شکل 5- ارتباط مقدار شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب با مقدار ضرایب کارایی برگزیده در 6 مدل منتخب

شکل 6 ارائه شده است. لازم به توضیح است که درصد خطای نسبی مدل در هر نقطه از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

ساختار خطای نقطه به نقطه در مدل‌های برتر به منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های برگزیده، درصد خطای برآورد در هر یک از نقاط منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها محاسبه شده و در مقابل قطر ذره ترسیم گردید. که نتایج آن برای مدل‌های مختلف در



شکل 6- ارتباط بین قطر ذرات با خطای نسبی برآورد در مدل‌های برگزیده

نیز بر توانایی بیشتر مدلی مانند ویبول در برآورد مقادیر شن متوسط و درشت تأکید نموده‌اند (بوتولا و همکاران، 2013). پیش‌بینی دقیق درصد ذرات شن (ماسه) و بویژه شن (ماسه) خیلی زیر (0/05-0/1 میلیمتر) توسط مدل‌های مذکور از اهمیت کاربردی فراوانی برخوردار است چرا که این ذرات نقش بسیار مهمی در کنترل ویژگی‌های مربوط به تخلخل، ضریب آب‌گذری و فرسایش‌پذیری توده رسوبات دارند (بادو، 2000؛ فلمینگ، 2007). از سوی دیگر مقدار شن (ماسه) یک نمونه به عنوان یک ورودی بسیار مهم در بسیاری از توابع انتقالی¹ مربوط به برآورد ویژگی‌های دیرپافت خاک‌ها و رسوبات محسوب شده و تخمین دقیق آن می‌تواند سبب افزایش عملکرد توابع انتقالی شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت 13 مدل مختلف در توصیف توزیع اندازه ذرات 20 نمونه رسوب به صورت تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت. رسوبات مورد استفاده از پشت بندهای رسوبگیر در چهار آبراهه مختلف جمع-آوری شدند. از بین مدل‌های مورد استفاده 6 مدل ویبول، ویبول اصلاح شده، فردلاند، ون‌گنوختن، ORL و ONL توانایی بهتری در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب داشتند. که از بین این مدل‌ها نیز مدل ویبول نسبت به سایر مدل‌ها دارای برتری نسبی بود. عملکرد مدل‌های 6 گانه براساس ضریب R^2 با افزایش مقدار شن (ماسه) در نمونه‌های رسوب بهتر شد. اما افزایش شن (ماسه) تأثیری بر روی عملکرد مدل‌ها از حیث ضریب AIC نداشت و

$$RE = [(P_i - O_i) / O_i] \times 100$$

در این رابطه؛ RE درصد خطای نسبی بوده و P_i و O_i نیز به ترتیب فراوانی پیش‌بینی شده توسط مدل و فراوانی اندازه‌گیری شده‌ی ذرات با اندازه i است. همانطور که مشاهده می‌شود درصد خطای نسبی برای اندازه‌های مختلف ذرات در مدل‌های مختلف متفاوت است. شکل 6 به روشنی نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌های برگزیده درصد خطای نسبی برای ذرات با قطر بزرگتر کمتر از ذرات با قطر کوچکتر است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که مقدار خطای نسبی برای ذرات با دامنه 2- 0/005 میلی‌متر کم بوده و مدل‌های مورد نظر ذرات با قطر مابین این دامنه را به خوبی برآورد نموده‌اند. نکته مهم در این شکل چگونگی پراکنش ابر نقاط حول محور افقی است چرا که بیش‌برآوردی مدل سبب مثبت شدن خطای نسبی و کم‌برآوردی آن سبب منفی شدن خطای نسبی می‌شود. در محدوده‌ی ذرات با قطر بزرگتر از 0/005 میلی‌متر، پراکنش نقاط حول محور افقی برای تمامی مدل‌ها کم و بیش متقارن است که این امر نشان دهنده‌ی عدم وجود خطای سیستماتیک (بیش برآوردی یا کم‌برآوردی دائمی) در این دامنه از اندازه ذرات رسوب است. در حالی که در ذرات کوچکتر از 0/005 میلیمتر ابر نقاط بیشتر به سمت خطای نسبی مثبت متمایل می‌شود که این امر نشان دهنده‌ی بیش‌برآوردی سیستماتیک اغلب مدل‌ها در محدوده‌ی ذرات کوچکتر از 0/005 میلی‌متر است. این نکته از جنبه‌ی کاربردی و برای پیش‌بینی ذرات رس که در محدوده‌ی کوچکتر از 0/002 میلی‌متر قرار دارند می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. برخی از محققین

¹ Pedotransfer function

است. با توجه به اینکه پژوهش‌های اندکی درباره مدل‌سازی توزیع اندازه رسوبات صورت گرفته است و با در نظر گرفتن این نکته که این پژوهش با یک مجموعه داده‌ی نسبتاً محدود انجام شده است بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان گامی برای تحقیقات آینده با مجموعه داده‌های وسیع‌تری باشد تا براساس آن بتوان روابط دقیق‌تر و جامع‌تری برای کارایی مدل‌ها در نمونه‌های با ویژگی‌های متفاوت به دست آورد.

براساس ضریب GMER نیز تنها توانایی دو مدل ون-گنوختن و ویبول اصلاح شده با افزایش شن (ماسه) نمونه‌ها بهبود یافت و عملکرد بقیه‌ی مدل‌ها براساس GMER، متأثر از مقدار شن (ماسه) نمونه‌ها نبود. خطای نسبی نقطه به نقطه در مدل‌ها با افزایش اندازه ذرات کاهش یافته و در محدوده‌ی ذرات 2-0/005 میلی‌متر به کمترین مقدار رسید که نشان دهنده‌ی توانایی بیشتر مدل‌ها در برآورد دقیق ذرات با اندازه‌ی سیلت و شن (ماسه)

فهرست منابع:

1. Abedini, M., Said, M. A. M., Ahmad, F. 2012. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin). *Catena*, 97: 63-70.
2. Bird, N. R. A., Perrier, E., Rieu, M. 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.
3. Boadu F.K. 2000. Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 126(8): 739-746.
4. Bombino, G., Tamburino, V., Zimbone, S. M. 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.
5. Botula, Y. D., Cornelis, W. M., Baert, G., Mafuka, P., Van Ranst, E. 2013. Particle size distribution models for soils of the humid tropics. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4): 686-698.
6. Cronican, A. E., Gribb, M. M. 2004. Hydraulic conductivity prediction for sandy soils. *Ground water*, 42(3): 459-464.
7. Flemming, B. W. 2007. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis. *Sedimentary Geology*, 202(3): 425-435.
8. Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., Wilson, G. W. 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4): 817-827.
9. Gee, G. W., Bauder, J. W. 1986. p. 393-394. Particle-size analysis In: A. Klute. (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American society of Agronomy. Inc., Madison.
10. Gupta, A. Yan, D. 2006. *Mineral processing design and operation: an introduction*. Elsevier, Amsterdam.
11. Hassanli, A. M., Nameghi, A. E., Beecham, S. 2009. Evaluation of the effect of porous check dam location on fine sediment retention (a case study). *Environmental monitoring and assessment*, 152(1-4): 319-326.
12. Hwang, S. I. 2004. Effect of texture on the performance of soil particle-size distribution models. *Geoderma*, 123(3): 363-371.
13. Hwang, S. I., Lee, K. P., Lee, D. S., Powers, S. E. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4): 1143-1150.
14. Indraratna, B., Nguyen, V. T., Rujikiatkamjorn, C. 2012. Hydraulic conductivity of saturated granular soils determined using a constriction-based technique. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5): 607-613.
15. Krause, P., Boyle, D. P., Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97.

16. Menéndez-Aguado, J. M., Peña-Carpio, E., Sierra, C. 2015. Particle size distribution fitting of surface detrital sediment using the Swrebec function. *Journal of Soils and Sediments*, 15(9): 2004-2011.
17. Nemes, A., Wösten, J. H. M., Lilly, A., Voshaar, J. O. 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90(3): 187-202.
18. Ouchterlony, F. 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology*, 114(1): 29-44.
19. Rastgo, M., Bayat, H., Ebrahimi, E. 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.
20. Romero-Díaz, A., Marín-Sanleandro, P., Ortiz-Silla, R. 2012. Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena*, 99: 42-53.
21. Shangguan, W., Dai, Y., García-Gutiérrez, C., Yuan, H. 2014. Particle-size distribution models for the conversion of Chinese data to FAO/USDA System. *The Scientific World Journal*, 2014: 1-11.
22. Shiozawa, S., Campbell, G. S. 1991. On the calculation of mean particle diameter and standard deviation from sand, silt, and clay fractions. *Soil Science*, 152(6): 427-431.
23. Sierra, C., Menéndez-Aguado, J. M., Afif, E., Carrero, M., Gallego, J. R. 2011. Feasibility study on the use of soil washing to remediate the As-Hg contamination at an ancient mining and metallurgy area. *Journal of hazardous materials*, 196: 93-100.
24. Sierra, C., Ordóñez, C., Gallego, J. L. R. 2013. Functional outlier detection in grain-size distribution curves of detrital sediments. *Sedimentary Geology*, 297: 31-37.
25. Sun, D., Bloemendal, J., Rea, D. K., Vandenberghe, J., Jiang, F., An, Z., Su, R. 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 152(3): 263-277.
26. Weltje, G. J., & von Eynatten, H. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171(1): 1-11.
27. Yang, X., Lee, J., Barker, D. E., Wang, X., Zhang, Y. 2012. Comparison of six particle size distribution models on the goodness-of-fit to particulate matter sampled from animal buildings. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(6): 725-735.
28. Zhao, P., Shao, M. A., Omran, W., She, D. 2013. A modified model for estimating the full description of soil particle size distribution. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(1): 65-72.
29. Zhao, P., Shao, M. A., Horton, R. 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.
30. Zolfaghari, A., Tirgar-Soltani, M. T., Yazdani, M. R., Soleimani Sardo, E. 2014. Investigation of models for describing soil particle size distribution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 45(2): 199-209.

Evaluation of Prediction Error in Some Particle Size Distribution Models for River Sediments

F. Asadzadeh¹

Assistant Professor, Urmia University; E-mail: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

Received: November, 2016 and Accepted: May, 2017

Abstract

Particle size distribution is a paramount factor in characterization of sediments and may affect many of its properties such as hydraulic and electrical properties and characteristics related to the transportability by erosive agents. The aim of this study was to compare the capability of some mathematical models in describing particle size distribution of sediments trapped behind check-dams. Twenty sediment samples were taken from check-dams of four seasonal waterways in Anbi and Noshan regions of Urmia, Northwestern Iran. Full particle size distribution of sediment samples were determined by hydrometer method. Different aspects of models performance were evaluated by some efficiency criteria. Hierarchical cluster analysis of models based on selected efficiency criteria indicated that the Weibull, Revised-Weibull, Fredlund, van Genuchten, ORL and ONL are the best models in describing sediment particle size distribution. Among the selected models, Weibull was slightly superior with a mean coefficient of determination of 0.986. Efficiency of selected models, based on R^2 value, improved with the increasing of sand content in the sediment samples. Relative error of the selected models was the lowest for particles with 0.005-2 mm in diameter, indicating the high performance of models to predict sand content of sediment samples.

Keywords: Check-dam, Mathematical models, Models efficiency, Weibull model

¹ Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.