

## تغییر پذیری رابطه‌ی توان حمل جریان با دانه‌بندی بار معلق در رود کجور

سیدحمیدرضا صادقی<sup>\*</sup>، محبوبه کیانی‌هرچگانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۱۹

### چکیده

آگاهی از رفتارهای پیچیده و متغیر اندازه‌ی ذرات بار معلق در مدل‌سازی انتقال رسوبات اهمیت زیادی دارد. از این رو تحقیق حاضر به بررسی تأثیر بدهی جریان بر تغییرات توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق در رود کجور در حوزه‌ی آبخیز جنگلی آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس با مساحت ۵۰۰۰۰ هکتار از طریق نمونه‌برداری در مقیاس روزانه و رگبار در خروجی انجام پذیرفت. اندازه‌گیری سرعت آب به منظور تعیین بده با استفاده از پروانه‌ی آبی و هنگام رگبار به وسیله‌ی جسم شناور صورت گرفت. برداشتن نمونه‌ی آب و رسوب با کاربرد روش تلفیقی عمقی و تعیین اندازه‌ی ذرات بار معلق با کاربرد روش پیپت اصلاح شده و بر اساس قانون استوکس انجام شد. رابطه‌ی بین بده و توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق در دوره‌ی مورد مطالعه با استفاده از وایازی دو متغیره و آماره‌های مختلف بررسی شد. نتایج تحقیق امکان دستیابی به بهترین رابطه‌ی بین بدهی جریان و لای را در شرایط عادی و بین بدهی جریان و ماسه، لای و رس در شرایط رگباری و به ترتیب با ضریب همبستگی بیش از ۰/۴۶ ( $p=0/01$ ) و ۰/۶۳ ( $p=0/05$ ) درصد، خطای تخمین کم‌تر از ۱۲۹/۳۶ و ۳۲/۶۶ درصد؛ خطای تایید کم‌تر از ۴۶/۰۰ و ۴۹/۶۱ درصد و ضریب کارایی بیش از ۰/۹۵ و ۰/۹۳ را تأیید کردند.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق، جریان پایه، بده جریان، غلظت بار معلق، واقعه‌ی رگبار

۱ - استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران

۲ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس مازندران، نور

\*- نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

## مقدمه

یکی از اهداف مهم در مهندسی منابع آب بهینه کردن منافع و کمینه کردن زیان‌های ناشی از جریان رودهاست. این کار با شناسایی، رفتارسنجی و تحلیل جریان و انتقال و ته‌نشینی بار معلق در دشت‌های سیلابی و نهرها میسر می‌گردد. امروزه بیش‌تر پژوهشگران توزیع اندازه‌ی ذرات رسوبی موجود در سامانه‌های رودخانه‌ای را از دیدگاه‌های مختلفی، از جمله برای درک رفتار آب‌پویایی جریان و رسوبات مورد بررسی قرار می‌دهند (وودوارد و والینگ ۲۰۰۷). لذا درک و تفسیر انتقال مواد آب آورده با توجه به توزیع اندازه‌ی بار معلق حائز اهمیت زیادی می‌باشد. اندازه‌ی ذرات بار معلق یکی از ویژگی‌های مهم آب‌شناسی و زمین ریخت شناسی بار معلق رودخانه‌ها است که تأثیر فراوانی بر فرآیند رسوب‌زایی و مصرف کارمایه داشته و بیانگر ترکیبات مواد سطح زمین در حوزه آبخیز می‌باشد. بنابراین، تغییرات زمانی اندازه‌ی ذرات بار معلق رود، فرآیندهای رسوب‌زایی مثل فرسایش، انتقال و ته‌نشینی را هم در حوزه آبخیز و هم در نهر رودخانه منعکس می‌کند (زو ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲). به همین دلیل پژوهشگران مختلفی در سال‌های اخیر توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق را از دیدگاه‌های مختلفی مورد توجه قرار داده‌اند.

در این رابطه می‌توان به بررسی ویژگی‌های اندازه‌ی ذرات بار معلق در گره‌وال<sup>۱</sup> هیمالیا به‌وسیله‌ی ثاین و همکاران (۱۹۹۹) اشاره نمود. تحلیل تغییرات روزانه‌ی بار معلق و توزیع اندازه‌ی ذرات آن و بده به‌وسیله‌ی آنها دو اوج را نشان داد که در اوج اول ذرات ریز و متوسط ماسه‌ای و در اوج دوم ذرات ریز و متوسط لای غالبیت داشته و به‌صورت همزمان با اوج رخ داده‌اند. همچنین نمودار دو اوجی<sup>۲</sup> روزانه بار معلق و توزیع اندازه‌ی ذرات آن بیان‌گر منابع متفاوت تامین‌کننده بار معلق در رود بودند.

والینگ و همکاران (۲۰۰۰) مولفه‌های اندازه ذرات بار معلق را در رود هومبر و توود<sup>۳</sup> در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بررسی کردند. در مقیاس زمانی به بررسی تغییرات بده در زمان وقوع رگبار و در فصل‌های مختلف و تأثیر آن در انتقال توزیع اندازه‌ی ذرات و ارتباط بین آن‌ها پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در بعضی ایستگاه‌ها، با افزایش بده، ذرات درشت ( $d_{50}$ ) افزایش و در بعضی دیگر ذرات ریز کوچک‌تر از دو میکرون کاهش می‌یابند؛ در بعضی دیگر با افزایش بده ذرات درشت ( $d_{50}$ ) کاهش و ذرات ریز افزایش می‌یابند. در رخدادهای سیلابی ذرات درشت کاهش و ذرات ریز افزایش داشته‌اند؛ پس با نظریه‌ی سنتی هیدرولیک، مبنی بر افزایش اندازه‌ی ذرات با افزایش بده تناقض داشت؛ لذا این تغییرات را ناشی از ظرفیت انتقال نهر، میزان تنش برشی جریان و اندازه ذرات رسوبی منابع بالاست رودخانه ذکر نمودند. زو (۲۰۰۲) به بررسی ارتباط بین اندازه‌ی ذرات بار معلق، بده آب و غلظت بار معلق در رود زرد پرداخت و به این نتیجه رسید که در بده بیش‌تر از ۴۰ مترمکعب بر ثانیه، یا در غلظت رسوبات معلق بیش‌تر از ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، اندازه‌ی ذرات با بده آب و غلظت بار معلق افزایش یافته است. هم‌چنین لنزی و همکاران (۲۰۰۳)، تغییرات درون سالی رسوبات معلق و اندازه‌ی ذرات آنها را در حوزه آبخیز آلپ مورد بررسی قرار داده و از روابط بین بده و اندازه‌ی ذرات رسوب معلق به این نتیجه رسیدند که با افزایش بده اندازه‌ی ذرات درشت‌تر می‌شود و حد آستانه‌ی بده را ۸ تا ۸/۵ مترمکعب بر ثانیه بیان نمودند. ویلیامز و همکاران (۲۰۰۷) نیز ویژگی‌های اندازه‌ی ذرات بار معلق در رود اگز<sup>۴</sup> را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که توزیع اندازه‌ی بار معلق تحت شرایط عادی و سیلابی بسیار متفاوت می‌باشد و آشفتگی‌های ایجاد شده مثل بده در حوزه آبخیز طی رخداد رگبار بر میزان و توزیع اندازه‌ی بار معلق تأثیر بسزایی دارد. ویلیامز و همکاران (۲۰۰۸) نیز ویژگی‌های فیزیکی ذرات بار معلق مثل

<sup>3</sup> -Humber and Tweed

<sup>4</sup> -Exe

<sup>1</sup> -Garhwal

<sup>2</sup> -Bimodal

حوزه‌ی آبخیز کجور با مساحت حدود ۵۰۰۰۰ هکتار یکی از زیر حوضه‌ی‌های شماره‌ی ۴۶ البرز مرکزی در جنوب شرقی شهرستان نوشهر، و حد واسط طول‌های  $30^{\circ} 35' 0''$  تا  $51^{\circ} 51' 30''$  شرقی و عرض‌های  $13^{\circ} 36' 0''$  تا  $36^{\circ} 33' 0''$  شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). میانگین تراکم پوشش گیاهی در توده‌های جنگلی پایین دست و مناطق مرتعی به ترتیب ۷۵ و ۵۰ درصد تعیین شده است. ارتفاع متوسط منطقه ۱۸۳۰/۵ متر و شیب میانگین حوضه‌ی مورد مطالعه ۳۴ درصد می‌باشد. این حوزه‌ی آبخیز از شمال با دریای خزر و از جنوب با بخش کجور مجاور است. کم‌ترین و بیش‌ترین ارتفاع حوضه‌ی به ترتیب ۱۵۰ و ۲۶۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد. بخش عمده‌ای از سازندهای زمین‌شناسی حوضه‌ی مربوط به دوره‌ی دوّم زمین‌شناسی است. نوع خاک منطقه تکامل نیافته راندزین تا راندزین شسته‌شده، و خاک قهوه‌ای جنگلی با pH قلیایی و خاک قهوه‌ای شسته‌شده تا پسدوگلی و با بافت متوسط شنی ارزیابی شد (صادقی و سعیدی ۲۰۱۰).

#### – نمونه‌برداری بار معلق

برای انجام تحقیق، در مجموع تعداد ۶۰ نمونه در محل ایستگاه آب‌سنجی آبخیز، در حد واسط دوره‌ی زمانی  $1386/8/23$  تا  $1387/3/29$  جمع‌آوری شد. ابتدا نمونه‌برداری بار معلق از کرانه‌ی چپ رودخانه، به دلیل دسترسی آسان‌تر در شرایط معمولی و رخداد سیلاب به شیوه تلفیقی عمقی در امتداد قائم و با ظروف پلاستیکی شسته شده‌ی دو لیتری صورت پذیرفت (ادوارد و گلیسون، ۱۹۹۹). نمونه‌برداری وقایع برای رخداد  $1387/3/9$  به صورت ساعتی و برای دیگر رخدادها نیز تلاش‌های لازم برای اخذ نمونه در ابتدا، اوج و انتهای سیلاب صورت پذیرفت. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردیده و بعد از همگون‌سازی در بطری یک لیتری ریخته شد.

(اندازه، چگالی، تخلخل و شکل ذرات) را در دو حوضه‌ی مختلف دورست و دوون<sup>۱</sup> با استفاده از قانون استوکس<sup>۲</sup> و در شرایط مختلف مکانی و زمانی مورد بررسی قرار دادند. آنها پس از تحلیل داده‌ها و با استفاده از روابط وایزبی نشان دادند که اندازه‌ی ذرات رسوبی اثر تنظیم‌کننده‌ی بیش‌تری نسبت به وزن مخصوص، شکل و تخلخل در سرعت ته‌نشینی ذرات در شرایط مختلف دارد. هرتیشیا و همکاران (۲۰۱۰) نیز ویژگی‌های اندازه‌ی ذرات بار معلق منتقل شده با برفاب‌های ناشی از هیمالیای مرکزی، تغییرات مکانی و منشا اثر آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان دادند که مواد انتقالی در اندازه‌ی لای، ماسه و رس به ترتیب ۷۱، ۲۴ و ۵ درصد ترکیبات بار معلق را تشکیل می‌دهند؛ هم‌چنین آنها روابط بین اندازه‌ی ذرات رسوبات معلق را با بده بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که هیچ رابطه‌ی معنی‌داری بین آنها وجود ندارد و این نشان‌دهنده طبیعت غیرهیدرولیکی و تأثیر متغیرهای متفاوت دیگر مثل منشاء اثر مواد انتقالی، تاریخ انتقال، کارمایه انتقال و توانایی فرساینده‌ی، فرسایش‌پذیری و ته‌نشینی در اندازه‌ی ذرات بار معلق است.

نتایج بررسی تحقیقات نشان دادند که مطالعات مربوط به توزیع اندازه‌ی مواد انتقالی و به‌ویژه بار معلق به‌رغم اهمیت موضوعی آنها در ایران بسیار کم صورت پذیرفته است، لذا ضرورت انجام مطالعات گسترده را در این زمینه توجیه می‌نماید. از این‌رو، تحقیق حاضر به بررسی تأثیر بده‌ی جریان بر تغییرات توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق در رود کجور، آبخیزی با مساحت ۵۰۰۰۰ هکتار، از طریق اندازه‌ی‌گیری و نمونه‌برداری در مقیاس روزانه و رگبار در سه بخش، ماسه ریز (بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون)، لای (۲ تا ۶۳ میکرون) و رس (کوچک‌تر از ۲ میکرون)، به دلیل امکان دسترسی، داده‌برداری مناسب و برخورداری از اطلاعات پایه مدّ نظر قرار گرفت.

#### مواد و روش‌ها

##### – معرفی منطقه

<sup>1</sup> - Dorest and Devon

<sup>2</sup> -Stokes' law

## اندازه‌گیری توزیع اندازه‌ی بار معلق

نمونه‌های موجود در بطری به مدت ۴۸ ساعت به صورت یکنواخت قرار داده شدند تا ته‌نشینی مواد معلق صورت پذیرد. بعد از دو روز، آب روی نمونه‌ها را خالی کرده، باقی‌مانده‌ی ته‌نشست‌ها را با آب مقطر شسته، در داخل ظروفی آلومینیومی با وزن اولیه‌ی مشخص ریخته، سپس به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک کردیم (صادقی و سعیدی ۲۰۱۰). ته‌نشست‌های خشک همراه با ظروف آلومینیومی با استفاده از ترازوی رقومی با دقت یک هزارم گرم توزین و نهایتاً از وزن اولیه ظروف کسر و وزن رسوبات یادداشت شد.

برای دانه‌بندی بار معلق، ابتدا کربنات‌ها، نمک‌های محلول و مواد آلی (کیانی‌هرچگانی و صادقی ۲۰۱۱) به واسطه‌ی ترکیب قوی با رس (وودوارد و والینگ ۲۰۰۷)، و مسلماً تشکیل ذرات ترکیبی بزرگ‌تر از اندازه‌ی واقعی حذف شدند. در ادامه، پس از حذف اکسیدهای آهن و مواد معدنی اولیه (چادهری و همکاران، ۲۰۰۸)، آماده‌سازی نهایی نمونه‌ها برای تبعیت از قانون استوکس و شیوه پیپت اصلاح شده صورت گرفت. در نهایت، زمان نمونه برداری اول و دوم در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد با استفاده از قانون استوکس و طول جابه‌جایی (۲/۵ سانتی‌متر) در پیپت به ترتیب ۶ ثانیه و ۱۰۶ دقیقه برای اندازه‌ی ذرات لای و رس (۶۳ و ۲ میکرون) محاسبه شد (موسوی‌حرمی ۱۳۸۳، کیانی‌هرچگانی و صادقی ۲۰۱۱، والینگ و همکاران ۲۰۰۰ و ویلیامز و همکاران ۲۰۰۸). در ادامه نمونه‌های برداشت شده در درون ظروف آلومینیومی توزین شده ریخته و در کوره به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و دوباره توزین شدند (گاولاک و همکاران، ۲۰۰۳). از اختلاف وزن دو توزین صورت گرفته، وزن ماسه ریز و رس در ۲/۵ میلی‌لیتر نمونه به‌دست آمد. سپس با توجه به نسبت‌های حجمی مورد استفاده، درصد ماسه ریز، لای و رس در حجم ۴۰ میلی‌لیتر محاسبه گردید (کیانی‌هرچگانی و صادقی ۲۰۱۱).

## مدل‌سازی روابط

در ادامه تهیه روابط وایزلی بین بده (مترمکعب بر ثانیه) به‌عنوان متغیر مستقل ( $X$ )، و نیز توزیع اندازه‌ی ذرات ته‌نشستی (ماسه، لای و رس) به‌عنوان متغیر وابسته ( $Y$ ) در خروجی حوزه‌ی آبخیز جنگلی کجور با استفاده از انواع روابط وایزلی دومتغیره (خطی، معکوس، درجه دو، درجه سه، توانی، رشد، نمایی،  $S$  شکل و ترکیبی) و باتغییر شکل داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS 18 انجام پذیرفت. برای ارزیابی کارایی روابط تهیه شده از معیارهای ضریب تبیین و سطح معنی‌داری کم‌تر از پنج درصد، خطای تخمین<sup>۱</sup>، مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup>، ضریب کارایی<sup>۳</sup>، خطای معیار<sup>۴</sup> و ضریب همبستگی<sup>۵</sup> به‌صورت روابط ۱ تا ۵ استفاده شدند. در روابط فوق  $Y_o$  مقدار مشاهده‌ای متغیر وابسته،  $Y_E$  مقدار تخمینی متغیر وابسته،  $Y_A$  میانگین مقدار مشاهده‌ای متغیر وابسته و  $N$  تعداد داده‌ها می‌باشند.

برای تهیه و تحلیل روابط از تقسیم‌بندی داده‌ها به دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی به صورت تصادفی به نسبت دو سوم و یک سوم استفاده شد. در نهایت، روابط با خطای تخمین کم‌تر، مجذور میانگین مربعات خطای کم‌تر و ضریب کارایی مثبت و ترجیحاً بالای ۶۰ درصد به‌عنوان روابط برتر انتخاب گردیدند (کارآموز و عراقی‌نژاد ۱۳۸۴، آسلمن ۲۰۰۰، صادقی و سعیدی ۲۰۱۰، صادقی و همکاران، ۲۰۱۲).

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_o - Y_E}{Y_o} \right|}{N} \times 100 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_E)^2}{N}} \quad (2)$$

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_A)^2 - \sum_{i=1}^N (Y_o - Y_E)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_A)^2} \quad (3)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_A)^2}{N-1}} \quad (4)$$

<sup>1</sup> - Relative error

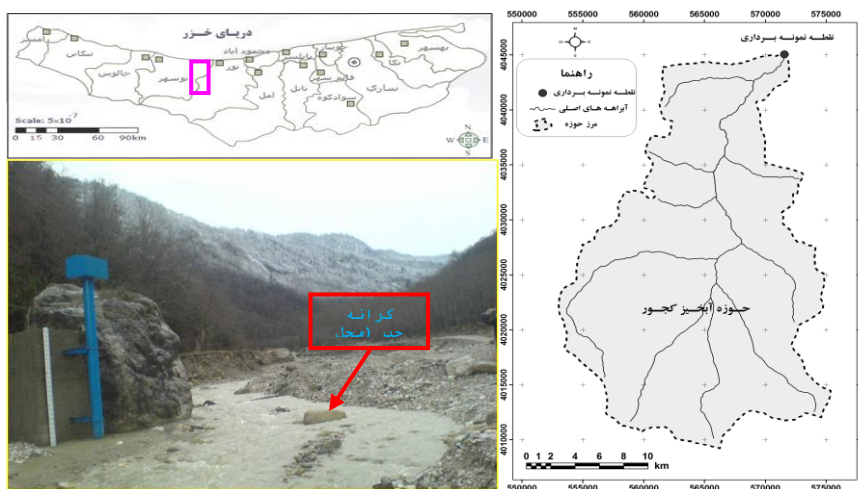
<sup>2</sup> - Root mean square of error

<sup>3</sup> - Coefficient of efficiency

<sup>4</sup> - Standard error of estimate

<sup>5</sup> - Correlation coefficient

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_O - Y_E)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_O - Y_A)^2}} \quad (5)$$



شکل ۱- موقعیت خروجی حوزه‌ی آبخیز کجور در استان مازندران و کشور.

تغییرات بده، غلظت بار معلق با درصد وزنی ماسه، لای و رس در دوره‌ی عادی و رگباری در رود کجور در اشکال ۳ تا ۶ نشان داده شده‌اند. دقت در اشکال ۳ و ۴ نشان می‌دهد که در شرایط عادی بده و غلظت بار معلق دارای حد آستانه‌ی مشخص در راستای تغییر در توزیع اندازه‌ی ذرات رسوبات معلق نمی‌باشند، اما در بده‌های بیش‌تر از ۰/۳ مترمکعب بر ثانیه در شرایط رگباری (شکل ۵)، روند افزایشی برای ماسه و رس و روند کاهش‌ی برای لای و رس مشاهده گردید. هم‌چنین، در غلظت بار معلق بیش‌تر از ۱۳ گرم در لیتر در شرایط رگباری (شکل ۶)، روند کاهش‌ی در ذرات ماسه و رس و روند افزایش در ذرات لای و رس مشاهده شد.

#### نتایج حاصل از مدل‌سازی

نتایج حاصل از انتخاب بهترین روابط و ایازی دو متغیره بین بده‌ی (مترمکعب بر ثانیه) و درصد وزنی ماسه، لای و رس بار معلق در جدول (۲) ارائه شده‌اند. بررسی نتایج مدل‌سازی و عدم امکان تهیه‌ی رابطه مناسب برای کل داده‌ها، در ابتدای امر دلالت بر ضرورت دسته‌بندی داده‌ها در دسته‌های مشابه و متناسب با شرایط حاکم بر آنها دارد. دقت در روابط نهایی برآزش داده شده به داده‌های مورد بررسی

#### نتایج و بحث

##### نتایج حاصل از آماره‌های توصیفی

کلیه‌ی ۶۰ نمونه جمع‌آوری شده طی دوره‌ی مطالعاتی و مربوط به جریان عادی و سیلابی به‌منظور بررسی تغییرات بده و توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق در رود کجور، تحلیل و نتایج توصیفی حاصل از انجام آزمایش‌ها در جدول (۱) و الگوی تغییرات بده و درصد وزنی رس، لای و ماسه در دوره‌ی عادی و رگباری در رود کجور در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

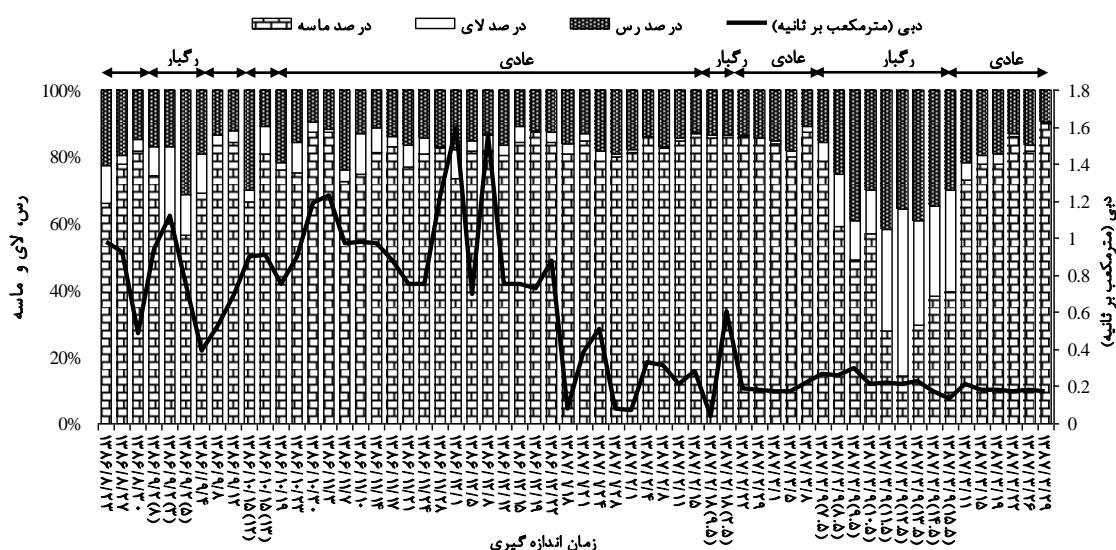
با توجه به نتایج جدول (۱) و دقت در شکل (۲)، میانگین بده و درصد وزنی ماسه در دوره‌ی رگباری نسبت به دوره‌ی عادی کاهش یافته، در حالی که میانگین غلظت بار معلق و درصد وزنی لای و رس افزایش یافته است که با یافته‌های والینگ و همکاران (۲۰۰۰)، والینگ و مورهد (۲۰۰۴) و کیانی‌هرچگانی و صادقی (۲۰۱۱)، مبنی بر انتقال ذرات ریز ناشی از فرسایش حوضه‌ای در طول رگبار هم‌خوانی دارد.

##### نتایج حاصل از تعیین حد آستانه بده و غلظت بار معلق

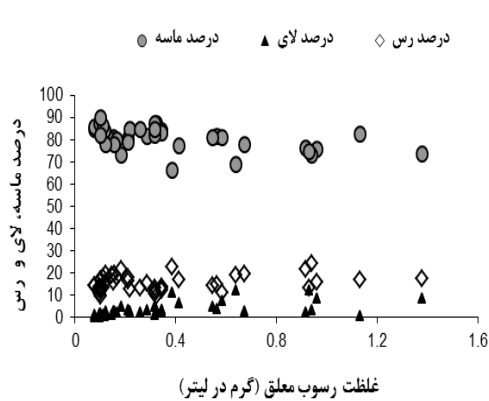
نتایج مدل‌سازی بین بده جریان با توزیع اندازه‌ی ذرات بیان‌گر انتقال ذرات در اندازه‌ی لای (۲-۶۳ میکرومتر) در جریان عادی و انتقال ذرات بار معلق در سه توزیع ماسه، لای و رس در شرایط رگباری است که بیان‌گر اهمیت و نقش بده در انتقال انتخابی بار معلق در مقیاس زمانی دارد که با یافته‌های ثاین و همکاران (۱۹۹۹)، زو (۲۰۰۲)، لنزی و همکاران (۲۰۰۳) و ویلیامز و همکاران (۲۰۰۷) هم‌خوانی دارد و با نظر والینگ و همکاران (۲۰۰۰) و هرتیشیا و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر نبود ارتباط یا ارتباط بسیار ضعیف بین بده و انتقال توزیع اندازه‌ی ذرات مطابقت ندارد. البته از دقت در روابط ۱۰ تا ۱۲، با توجه به خطای تخمین و تأیید و هم‌چنین ضریب کارایی این روابط نسبت به روابط ۵ تا ۹ می‌توان به ارتباط بهتر لای و رس نسبت به ماسه در طول وقایع رگباری اشاره نمود، که با نظر والینگ و همکاران (۲۰۰۰) مبنی بر ته‌نشینی ذرات درشت ناشی از فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه و انتقال ذرات ریز ناشی از فرسایش حوضه‌ای در طول رگبار و هم‌چنین نظر ویلیامز و همکاران (۲۰۰۸) مبنی بر نقش تنظیمی اندازه‌ی ذرات بار معلق در سرعت ته‌نشینی مطابقت دارد.

(جدول ۲) نشان می‌دهد که اشکال غیر خطی (لگاریتمی، ترکیبی، توانی، رشد، درجه دو، S شکل، و نمایی) معادلات، در مجموع از عمل‌کرد بهتری برخوردار بودند، که با تأکیدات سینگ (۱۹۹۲) در رابطه با غلبه‌ی روابط غیر خطی بین متغیرهای آشناسی همسو است.

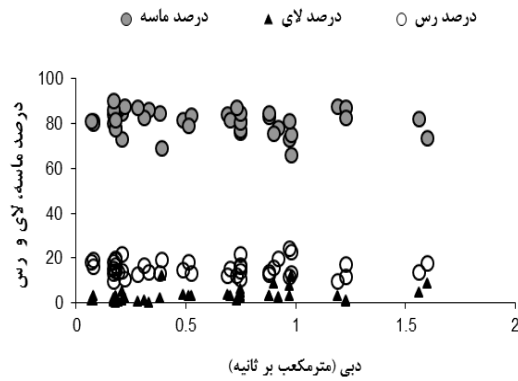
از مقایسه‌ی کلی عمل‌کرد روابط به‌دست آمده بین بده آب و توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق (ماسه، لای و رس) در شرایط عادی در خروجی رود کجور (جدول ۲) با استفاده از کلیه‌ی شاخص‌های ارزیابی، نشان‌گر ارتباط بهتر بده‌ی آب با لای با ضریب همبستگی ۴۶ درصد در سطح معنی‌داری کمتر از پنج درصد بوده است؛ در حالی که بین بده آب با ماسه و رس ارتباطی وجود نداشت. هم‌چنین بررسی روابط برازش داده شده بر ارتباطات حاکم بین بده و توزیع اندازه‌ی بار معلق در شرایط رگباری در خروجی رود کجور، دلالت بر ارتباط بهتر بده آب به‌ترتیب با ماسه (ضریب همبستگی ۷۰ درصد و سطح معنی‌داری کمتر از پنج درصد)، لای (ضریب همبستگی بالای ۸۰ درصد و سطح معنی‌داری یک درصد) و رس (ضریب همبستگی ۶۳ درصد و سطح معنی‌داری کمتر از پنج درصد) دارد.



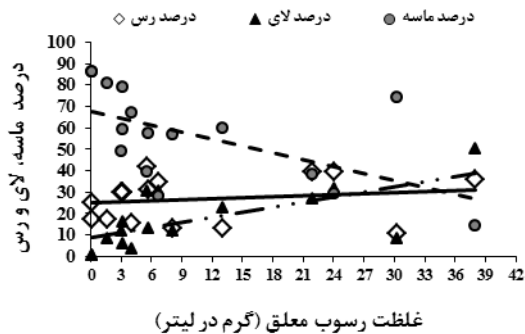
شکل ۲- الگوی تغییرات بده و درصد وزنی رس، لای و ماسه در دوره‌ی عادی و رگباری در رود کجور.



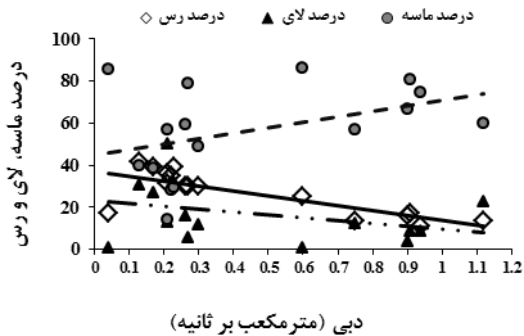
شکل ۴- تغییرات غلظت رسوبات معلق و درصد ماسه، لای و رس در دوره‌ی عادی.



شکل ۳- تغییرات بده و درصد ماسه، لای و رس در دوره‌ی عادی.



شکل ۶- تغییرات غلظت رسوبات معلق و درصد ماسه، لای و رس در دوره‌ی رگباری.



شکل ۵- تغییرات بده و درصد ماسه، لای و رس در دوره‌ی رگباری.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی غلظت و توزیع اندازه‌ی ذرات بار معلق و بده‌ی در رود کجور.

تعداد داده‌ها	رس (درصد)	لای (درصد)	ماسه (درصد)	بده (مترمکعب بر ثانیه)	غلظت بار معلق (گرم در لیتر)	متغیرهای مورد بررسی	
						بیش‌ترین	کم‌ترین
۶۰	۴۱/۷	۵۰/۴	۸۹/۹	۱/۶۰	۳۷/۹	بیش‌ترین	کل دوره مورد مطالعه
	۱۸/۳±۸	۷±۹/۶	۷۴/۶±۱۶	۰/۵۴	۱۳/۷±۸	میانگین	
	۹/۴	۰/۱	۱۴/۳	۰/۰۴	۰/۰۸	کم‌ترین	
۴۴	۲۴/۱	۱۲	۸۹/۹	۱/۶۰	۱/۴	بیش‌ترین	دوره‌ی عادی
	۱۵/۵±۳/۵	۳/۴±۳/۱	۸۱/۱±۵	۰/۵۸	۰/۴±۰/۳	میانگین	
	۹/۴	۰/۱	۶۶/۱	۰/۰۷	۰/۰۸	کم‌ترین	
۱۶	۴۱/۷	۵۰/۴	۸۶/۴	۱/۱۲	۳۷/۹	بیش‌ترین	دوره‌ی رگباری
	۲۶/۵±۱۰/۵	۱۷/۰±۱۳/۹	۵۶/۵±۲۲	۰/۴۳	۱۰/۵±۱۱/۶	میانگین	
	۱۰/۹	۰/۳	۱۴/۳	۰/۰۴	۰/۰۹	کم‌ترین	

جدول ۲- نتایج حاصل از انتخاب بهترین روابط وایازی دو متغیره‌ی برازش داده شده بین بده (مترمکعب بر ثانیه) و درصد وزنی توزیع اندازه‌ی ذرات رسوب معلق در رود کجور.

دوره مورد مطالعه	شماره رابطه	Y: درصد وزنی توزیع اندازه‌ی ذرات X: بده (مترمکعب بر ثانیه)	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری	خطای معیار	درصد خطا تخمین	مجذور میانگین ضریب مربعیات خطا کارایی
رابطه‌ی معنی‌داری برقرار نشد.							
رابطه‌ی معنی‌داری برقرار نشد.							
	ماسه						
	۱	$Y = 1.02(3.02^X)$	۰/۴۴	۰/۰۲	۱/۰۱	۱۲۸/۶۷	۴۸/۹۵
	۲	$Y = 3.26X^{0.61}$	۰/۴۶	۰/۰۱	۰/۹۹	۱۲۹/۳۶	۴۶/۰۰
عادی	لای						
	۳	$Y = e^{0.02(1.12X)}$	۰/۴۴	۰/۰۲	۱/۰۱	۱۲۸/۸۰	۴۸/۹۷
	۴	$Y = 1.02e^{1.12X}$	۰/۴۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۱۲۸/۷۸	۴۸/۹۷
رابطه‌ی معنی‌داری برقرار نشد.							
	رس						
	۵	$Y = 75.02 + 18.85Ln(X)$	۰/۶۵	۰/۰۳	۱۶/۵۲	۲۵/۰۱	۶۹/۷۸
	۶	$Y = 38/94(1.92^X)$	۰/۶۰	۰/۰۵	۰/۳۴	۲۵/۸۹	۶۱/۲۷
	۷	$Y = e^{4.46 + (-0.15/X)}$	۰/۷۰	۰/۰۲	۰/۳۰	۲۳/۱۷	۷۳/۵۳
	۸	$Y = e^{3.66(0.65X)}$	۰/۶۰	۰/۰۵	۰/۳۴	۲۵/۸۵	۶۱/۰۴
	۹	$Y = 38/94e^{0.65X}$	۰/۶۰	۰/۰۵	۰/۳۴	۲۵/۸۸	۶۱/۲
رگباری	لای						
	۱۰	$Y = 49/87 - 156.08X + 118.58X^2$	۰/۸۰	۰/۰۱	۷/۳۵	۸۰/۶۰	۲۳۲/۱۹
	۱۱	$Y = 37.07(0.43^X)$	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۴	۳۲/۶۶	۴۹/۸۱
	۱۲	$Y = e^{3.61(-0.84X)}$	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۴	۳۲/۶۵	۴۹/۶۱
	۱۳	$Y = 37.07e^{-0.84X}$	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۴	۳۲/۶۶	۴۹/۸۱
	رس						

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر مبنی بر دست‌یابی به رابطه‌ی بین بده جریان و لای در شرایط عادی و بده جریان و ماسه، لای و رس در شرایط رگباری، به دلیل ته‌نشینی ذرات درشت ناشی از فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه و انتقال ذرات ریز ناشی از فرسایش حوضه‌ای در طول رگبار، ضمن تأکید بر تغییرپذیری توزیع اندازه‌ی ذرات رسوب معلق، با شایستگی یا توان جریان در مقیاس زمانی می‌توان بر اهمیت افزایش اطلاعات، پایش و مدل‌سازی بار معلق و توزیع اندازه‌ی ذرات آن‌ها، آگاهی از پویایی انتقال و ته‌نشینی رسوبات و تغییرات مکانی و زمانی آن‌ها در رودها تأکید نمود. این موضوع از نظر مدیریتی، و مسائل کیفیت و مدیریت آب از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. هم‌چنین، یافته‌های این تحقیق مشخصاً بر انجام مطالعات مشابه در دامنه‌ی گسترده و تهیه‌ی اطلاعات در نقطه تنظیم کننده‌ی مورد نظر تأکید دارد، اگرچه انجام تحقیقات مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز، و حتی با روش‌های جدیدتر و با دقت بالاتر در حوزه آبخیز مشابه برای دست‌یابی به نتایج جامع و امکان ارائه‌ی جمع‌بندی نهایی مشخصاً تأکید می‌شود.

## منابع

۱. کارآموز م، عراقی-نژاد ش، ۱۳۸۴. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۴۶۴ ص.
۲. کیانی هرچگانی م، صادقی، س ح ر، ۱۳۸۹. خصوصیات اندازه ذرات رسوبات معلق انتقالی در جریان پایه و سیلابی رودخانه. مجله آب و فاضلاب. ۱: ۱۱۴-۱۱۷.
۳. موسوی حرمی ر، ۱۳۸۳. رسوب‌شناسی. انتشارات آستان قدس رضوی. ۴۷۹ ص.
4. Asselman, N. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. J. Hydrol. 234: 228-248.
5. Chaudhari, S. K., R. Singh, and D. K. Kundu. 2008. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties. Soil Sci. Soc Am. J. 72: 431-441.
6. Edwards, T. K., and Glysson, G. D.. 1999. Field methods for measurement of fluvial sediment, USGS Open-file Report Book 3 (Chapter 2):1-97.
7. Gavlok, R., Horneck, D., Miller, R. O. and Kotuby-Amacher, J. 2003. Soil, plant and water reference methods for



- and deposition, and distribution the particle size characteristics of fluvial suspended sediment an overview. *Hydrobiologia*. 176-177:25-149.
15. Walling, D. E., Owens, Ph. N., Waterfall, B. D., Leeks, J. L. G. and Wass, P. D. 2000. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *Sci.Total Environ.* 251/252: 205-222.
  16. Williams, N. D., Walling, D. E., and Leeks, J. L. G. 2007. High temporal resolution in situ measurement of the effective particle size characteristics of fluvial suspended Sediment. *J. Water Res.* 41: 1081–1093.
  17. Woodward, J. C., Walling, and D. E. 2007. Composite suspended sediment particles in river systems: their incidence, dynamics and physical characteristics. *Hydrol. Process.* 21: 3601–3614.
  18. Williams, N. D., Walling, D. E. and Leeks, G. J. L. 2008. An analysis of the factors contributing to the settling potential of fine fluvial sediment. *Hydrolo. Process.* 22: 4153–4162.
  19. Xu, J. 2000. Grain-size Characteristics of suspended load sediment of the Yellow River, China. *Catena*. 43: 176–186.
  20. Xu, J. 2002. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin, China. *Catena*. 49: 289– 307.
  - the Western Region. WREP 125. 2<sup>nd</sup> Edition WCC-103 Publication (<http://cropandsoil.oregonstate.edu/wera103/Methods/WCC-103-Manual-2003-Soil%20Sand-Silt-Clay.PDF>).
  8. Haritashya, U. K., Kumar, A. and Singh, P. 2010. Particle size characteristics of suspended sediment transported in melt water from the Gangotri Glacier, central Himalaya — an indicator of subglacial sediment evacuation. *Geomorph.* 122: 140–152.
  9. Lenzi, M. A., Mao, L., and Comiti, F. 2003. Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. *Hydrol. Sci. J.* 48 (6): 899–915.
  10. Sadeghi S. H. R., and Kiani Harchegani, M., and Younesi, H. A. 2012. Suspended sediment concentration and particle size distribution, and their relationship with heavy metal content. *J. Earth. Syst. Sci.* 121: 63–71.
  11. Sadeghi, S. H. R., and Saeidi, P. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *J. Hydrol. Sci.* 55: 821-831.
  12. Singh, V. P. 1992. Elementary hydrology, Eastern Economy Edition. New Delhi, India, 973pp.
  13. Thayyen, R. J., Gergan, J. T. and Dobhal, D. P. 1999. Particle size characteristics of suspended sediments and subglacial hydrology of Dokriani Glacier, Garhwal Himalaya, India. *Hydrol. Sci.* 44: 47-61.
  14. Walling, D. E., and Moorehead, P. W.. 2004. Sediment dynamics, transport