

# توصیف احتمالاتی انتقال بار بستر بعد از آستانه در یک بررسی آزمایشگاهی با استفاده از روش ردیابی سرعت ذره

حامد فرهادی<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup>، مانوسوس والیراکیس<sup>۳</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، farhadi.edu@gmail.com

\*۲- دانشیار سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، esmaili@um.ac.ir

۳- استادیار مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلنگو، گلنگو، اسکاتلند،

manousos.valyrakis@glasgow.ac.ir

۴- دانشیار سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع

طبیعی گرگان، گرگان، ایران، zahiri.areza@gmail.com

## چکیده

حرکت رسوب با اهمیت فراوانی که در مهندسی و علم هیدرولیک دارد فیزیک کاملاً شناخته شده‌ای ندارد. نادیده گرفتن حرکت نوسانی و طبیعت ناپیوسته انتقال بار بستر، کاربرد روابطی که بر این اساس برای تخمین بار انتقال رسوب ارائه شده‌اند را دچار چالش کرده است. این پژوهش سعی دارد حرکت غیر معلق (حرکت بار بستر) یک ذره با وزن‌های متفاوت را در شرایط مختلف جریان با استفاده از تکنیک‌های رهگیری ذره، مورد کاوش قرار دهد و آن را در قالب توابع توزیع احتمالاتی توصیف کند. با مشخص شدن رفتار آماری در رابطه با عامل یا عوامل مؤثر انتقال در رژیم‌های مختلف انتقال رسوب، می‌توان اظهار نظر دقیق‌تری داشت. در این راستا با استفاده از تکنیک رهگیری ذره (PTV)، موقعیت ذره در هر سری آزمایش مشخص شد. در نهایت با محاسبه سرعت لحظه‌ای ذره توابع توزیع احتمالاتی مختلف بر داده‌ها برازش داده شد تا بهترین تابع با توجه به معیار سنجش آماری کولموگروف-اسمیرنوف (در سطح اطمینان ۵ درصد) انتخاب شود. نتایج نشان داد که انتقال ذره در اعداد رینولدز پایین جریان از تابع توزیع لوگ-نرمال و در اعداد رینولدز جریان بالا از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند. همچنین به وسیله این مشاهدات در رابطه با عامل حرکت در شرایط مختلف رژیم انتقال رسوب بحث شد که با توجه به ویژگی‌های توابع توزیع احتمالاتی بدست آمده، انتقال رسوب در شرایط آستانه با عاملیت ارتباط ذره-بستر و در شرایط تعادلی تحت نیروهای سیال انجام می‌شود. در انتها با توجه به تفاوت رفتار حرکت رسوب در رژیم انتقال ضعیف و تعادلی می‌توان دو پارامتر آستانه معرفی کرد. با توجه به اهمیت کاربرد نتایج در مهندسی، به دلیل اینکه قالب پژوهش، قالب آماری و توصیف پدیده تصادفی بوده است می‌توان با در نظر گرفتن شرایط مختلف انتقال رسوب (با نمایندگی پارامتر عدد رینولدز ذره) احتمال وقوع سرعت ذرات را با استفاده از توابع توزیع ارائه شده، تخمین زد. همچنین نتایج این پژوهش در شرایط هیدرولیکی مشابه از جمله پژوهش‌های آکو-هیدرولیک و تونل باد قابل استفاده می‌باشد.

## کلمات کلیدی

انتقال رسوب، بار بستر، تابع توزیع احتمالاتی، ردیابی سرعت ذره، حرکت تصادفی ذرات.

بار بستر بخش مهمی از رسوب انتقالی است که در طول مسیر رودخانه یا هر نوع کانال روباز، با تماس مکرر با سطح بستر، به صورت غلطش، لغزش یا جهش حرکت می‌کند [۱]. هرچند پژوهش‌های زیادی در این زمینه تاکنون انجام شده است، لیکن حرکت بار بستر هنوز به دلیل پیچیدگی و داشتن طبیعت تصادفی<sup>۱</sup> مجهولات زیادی را باقی گذاشته است. تصادفی بودن حرکت ذرات بار بستر ناشی از ارتباط پیچیده ذره با سیال (آب)، ذره با ذرات دیگر و ذره با بستر رودخانه (یا کانال) می‌باشد [۲]. ذرات رسوب بستر که در یک جریان آشفته منتقل می‌شوند، حرکات پیچیده‌ای را در نتیجه نیروهایی که به آن‌ها وارد می‌شود تجربه می‌کنند. بنابراین، توصیف حرکت و انتقال ذره بار بستر در طول مسیر رودخانه یک مسئله چالش برانگیز است و از آنجا که مباحث کاربردی مبتنی بر آن (مانند فرسایش، طراحی پایه پل‌ها و آبشستگی) نیازمند دانش صحیحی از مشخصات حرکت رسوب در شرایط متفاوت می‌باشد، اهمیت آن را دوچندان کرده است. در این راستا در اختیار داشتن مشخصات فیزیکی-آماری سرعت ذرات بستر، به عنوان نماینده حرکت رسوب، برای توصیف احتمالاتی انتقال اهمیت دارد. زمانی که یک بستر فرسایشی در مواجهه با یک جریان برشی، مانند آب، قرار می‌گیرد ذرات بستر، تحت تأثیر نیروهای وارده شروع به حرکت می‌کنند (شروع فاز حرکت رسوب<sup>۲</sup>) و سپس آن ذرات توسط جریان آب منتقل می‌شوند که از آن به عنوان فرآیند انتقال رسوب<sup>۳</sup> نام برده می‌شود. اگر نتوان ادعا کرد همه، بسیاری از حرکات انتقال رسوب، نوسانی و تصادفی است که نشان‌دهنده خاصیت غیر پیوسته بودن آن است [۳-۵]. بنابراین در این شرایط (با توجه به تصادفی و نوسانی بودن فیزیک انتقال رسوب) تولید رابطه و فرموله کردن حرکت ذرات رسوبی در قالب یک محیط پیوسته درست به نظر نمی‌آید هر چند که تلاش‌های انجام شده در این زمینه با توجه به نتایج پیش‌بینی انتقال رسوب با خطای با مرتبه بزرگی یک تا چهار [۳، ۶، ۷] (ده تا ده هزار برابر)، تأیید کننده همین مطلب است. و در نهایت فرض اولیه برای بررسی این پدیده دیگر نمی‌تواند مانند گذشته در یک محیط پیوسته باشد و در این شرایط، روش منطقی در توصیف این پدیده مطالعه رفتار جمعی<sup>۴</sup> (در بر گیرنده همه پدیده‌های دخیل در انتقال ذرات) در مقابل رفتار پیوسته<sup>۵</sup> است. این مطلب مشهور است که حرکت ذرات زمانی آغاز می‌شود که نیروهای آشفتنگی لحظه‌ای جریان بر نیروهای مقاوم غلبه کند، که این نیروها نیز در طبیعت تصادفی و آماری هستند [۸].

بنابراین استفاده از زبان پدیده‌های تصادفی یعنی آمار در توصیف انتقال ذرات بستر منطقی می‌نماید. در یک مرور و جمع بندی کلی می‌توان گفت بحث انتقال رسوب در دو دیدگاه قطعی<sup>۶</sup> و تصادفی مطرح شده است. برای دیدگاه قطعی می‌توان از مطالعات پایه‌ای شیلدز (۱۹۳۶) مثال آورد که با در نظر گرفتن پارامترهای میانگین و تنش برشی آستانه، انتقال بار رسوب تخمین زده می‌شود (با پیروی از مطالعات دوبوی<sup>۷</sup> (۱۸۷۹) که انتقال رسوب را تابعی از تنش بستر می‌دانست [۳]) [۹]. اما هنگامی که در یک مقیاس زمانی مشخص حرکت ذره مورد مشاهده قرار گیرد، رفتار تصادفی آن قابل ملاحظه است. در نگاه قطعی، این موضوع که حرکت ذرات بستر در حقیقت یک پدیده غیر خطی تناوبی می‌باشد نادیده گرفته شده است [۱۰-۱۲]. برای محاسبه نرخ انتقال رسوب، در روابط تجربی، محققین اغلب از سرعت متوسط تمام ذرات استفاده کردند، با فرض اینکه سرعت متوسط، تنها به اندازه ذره و مشخصات جریان بستگی دارد. در نگرش قطعی که نگاه غالب بوده است، شکل ذره، نحوه آرایش و زبری بستر، نحوه در معرض بودن ذره نسبت به جریان و خصوصیات هیدرولیک و هیدرودینامیکی لحظه‌ای جریان و ذره بستر در نظر گرفته نشده است. همچنین آن دسته از محققین که با این دیدگاه حرکت بار بستر را بررسی کرده‌اند به ابزار اندازه‌گیری و منابع علمی امروز، دسترسی نداشته‌اند. بعد از نگرش‌های تجربی به موضوع رسوب و ارائه روابط انتقال بار بستر با در نظر گرفتن تنش برشی بستر (مطالعه دوبوی در قرن نوزدهم؛ مرور شده برای مثال در پژوهش هگر (۲۰۰۵) [۱۳])،

<sup>1</sup> Stochastic

<sup>2</sup> Entrainment

<sup>3</sup> Sediment transport

<sup>4</sup> Collective behavior

<sup>5</sup> Continuum behavior

<sup>6</sup> Deterministic

<sup>7</sup> Du Boys

قدرت جریان<sup>۱</sup> (مطالعات شوکلیچ<sup>۲</sup> و بگنولد<sup>۳</sup> در قرن بیستم؛ مرور شده برای مثال در مطالعات دی و همکاران (۲۰۱۴) [۱۴])؛ مطالعات اینشتین (۱۹۳۷) [۱۵] را می‌توان آغاز نگرش تصادفی به حرکت بار رسوب دانست که پایه‌گذار مطالعات بعدی خود، که بر رفتار تصادفی ذره رسوب توجه داشت، محسوب می‌شود. از نظر اینشتین انتقال رسوب حاصل یک تعادل در جابجایی مومنتم بین فاز جامد (ذرات رسوبی) و مایع (سیال) نیست بلکه نتیجه تفاوت بین نرخ‌های جابجایی و رسوب‌گذاری ذرات رسوبی است، که خود تابعی از شرایط جریان و هندسه بستر می‌باشد. بعد از گذشت چند دهه، مجدداً نگاه ویژه‌ای به نگرش رفتار حرکتی ذرات بستر شده است که در این زمینه تحقیقات میدانی (به عنوان مثال تحقیقات حسن و همکاران (۲۰۱۳)، اولیند و جانسون (۲۰۱۵) و گرونز و همکاران (۲۰۱۶)؛ [۱۰-۱۲]، [۱۶]) و آزمایشگاهی (به عنوان مثال تحقیقات دیپلاس و همکاران (۲۰۰۸)، لاژونس و همکاران (۲۰۱۰)، رزبری و همکاران (۲۰۱۲)، فرییش و همکاران (۲۰۱۲)، والیراکیس و همکاران (۲۰۱۳) و انسی و هیمن (۲۰۱۴)، انسی و همکاران (۲۰۱۵)، فرییش و همکاران (۲۰۱۶)، هیمن و همکاران (۲۰۱۶)، شیم و دووان (۲۰۱۶) و شیم و دووان (۲۰۱۹)؛ [۵، ۱۷-۲۸]) انجام شده است. این تلاش‌ها اکثراً برای رسیدن به درک عمیق‌تر از فیزیک انتقال ذرات رسوبی و بعضاً تأثیر حرکت تصادفی رسوب بر تشکیل فرم بستر رودخانه بوده است. پیشرفت علم به خصوص در زمینه مکانیک‌های ناپیوسته و ریزمقیاس (میکروسکوپی) در کنار تکنیک‌های جدید برای اندازه‌گیری (از جمله تصویربرداری با سرعت بالا) فرصتی را برای بازگشت و بررسی مجدد مسئله حرکت رسوب فراهم آورده است که در پی آن، تمایل جدیدی برای بررسی مجدد حرکت رسوب از دیدگاه تصادفی در بین محققین ایجاد شده است [۲۱]. با ندهایی که به روش‌های پیشین در برخورد با آغاز حرکت رسوب شد (برای مثال در پژوهش بافینگتون و مونتگومری (۱۹۹۷) اعلام شد که معیار شیلدز تا مرتبه خطا به بزرگی یک (یعنی، ده برابر) شروع آستانه حرکت رسوب را نشان می‌دهد [۲۹])، با در نظر گرفتن ذات تصادفی حرکت رسوب انجام شده است، معیارهایی چون تکانه<sup>۴</sup> (در تحقیقات دیپلاس و همکاران (۲۰۰۸)، سلیک و همکاران (۲۰۱۰) و والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱) [۱۹، ۲۶، ۳۰] و انرژی (توسط والیراکیس و همکاران (۲۰۱۷) [۲۷]) برای شروع حرکت معرفی شدند. بررسی آستانه حرکت ذرات بستر در محدوده مطالعات این پژوهش نیست اما در بررسی حرکت رسوب در شرایط آستانه، سلیک و همکاران (۲۰۱۰) [۳۰]، تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال و والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱) تابع توزیع احتمالاتی ویبول را به عنوان توصیف کننده تکانه‌های ذرات بار بستر پیشنهاد دادند [۲۶]. دلیل تفاوت نتایج نیز محدوده مشاهدات بود به نحوی که در پژوهش سلیک و همکاران (۲۰۱۰) [۳۰] بر تمام مشاهدات حرکت ذرات قبل و بعد از آستانه (با معیار تکانه) و در پژوهش والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱) [۲۶] بر حرکت ذرات بعد از آستانه تمرکز شده است.

یکی از ابزارهای اندازه‌گیری، استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری است که قادر به برداشت مسیر حرکت ذره رسوبی با دقت بالا می‌باشد. برای مثال فرناندز لوک و فن بیک (۲۰۱۴)، تعداد میانگین ذرات و مسیر حرکت آن‌ها را در یک محدوده با استفاده از دوربین ۱۶ فریم بر ثانیه را محاسبه کردند [۳۱]. بریج و دومینیک (۱۹۸۴)، با استفاده از تکنیک تصویربرداری مسیر حرکت یک ذره را روی بستر زبر ثابت بررسی کردند [۳۲]. در روش‌های مبتنی بر تصویربرداری دو دیدگاه برای رهگیری حرکت ذره مورد استفاده قرار می‌گیرد، دیدگاه اولری<sup>۵</sup> (برای مثال تحقیقات [۳۳، ۳۴]) و دیدگاه لاگرانژی<sup>۶</sup> (برای مثال تحقیقات هوسه و لاژونس (۲۰۱۲) [۳۵] و هیس و همکاران (۲۰۱۴) [۳۶]). دیدگاه اولری که در قالب تکنیک تصویربرداری حرکت ذرات (PIV)<sup>۷</sup> اعمال می‌شود، برای محاسبه سرعت (یا به طور کلی مسیر حرکت) ذرات در یک حجم کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالیکه روش ردیابی ذرات (PTV)<sup>۸</sup> که روشی با برداشت از دیدگاه لاگرانژی است برای بررسی حرکت ذرات به صورت منفرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش (یعنی PTV) می‌توان حرکت ذرات بستر را در مسیر یک کانال پایش و نتایج آن را در تحلیل‌های آماری و احتمالاتی مورد استفاده قرار داد.

<sup>1</sup> Stream power

<sup>2</sup> Schoklitsch

<sup>3</sup> Bagnold

<sup>4</sup> Impulse

<sup>5</sup> Eulerian

<sup>6</sup> Lagrangian

<sup>7</sup> Particle Image Velocimetry (PIV)

<sup>8</sup> Particle Tracking Velocimetry (PTV)

در این راستا تحقیقات متعددی برای بررسی رفتار تصادفی حرکت ذرات رسوب به صورت بار بستر در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شده است (برای مثال تحقیقات رزبری و همکاران (۲۰۱۲) [۲۳]، انسی و هیمن (۲۰۱۴) [۱۸]، وو و همکاران (۲۰۲۰) [۳۷] و شیم و دووان (۲۰۱۷؛ ۲۰۱۹) [۲۴، ۳۸]). مطالعات رزبری و همکاران (۲۰۱۲) [۲۳]، فربیش و همکاران (۲۰۱۶) [۵] و شیم و دووان (۲۰۱۷) [۳۸]، تابع توزیع احتمالاتی نمایی<sup>۱</sup> را بهترین توصیف برای سرعت حرکت ذره در مسیر جریان اعلام کردند که البته این مطالعات در اعداد رینولدز به نسبت کوچک انجام شده بود. در تحقیقات دیگر همچون مطالعات مارتین و همکاران (۲۰۱۲) [۳۹] و انسی و هیمن (۲۰۱۴) [۱۸] که در اعداد رینولدز به نسبت بالاتر مطالعات را انجام داده بودند، توابع گوسین (نرمال) برای توصیف سرعت حرکت ذرات در مسیر جریان پیشنهاد شد. بعد از مشاهدات متفاوت توسط محققین، وو و همکاران (۲۰۲۰) [۳۷] در پژوهش خود با افزایش زمان مسافت<sup>۲</sup> ذرات بار بستر، جابجایی تابع توزیع انتقال از نمایی به یک تابع گوسین ناقص<sup>۳</sup> را مشاهده کردند. مطالعات فوق نشان دهنده رفتار متفاوت ذره در شرایط مختلف حاکم بر جریان و نحوه برداشت داده‌ها در رژیم‌های مختلف انتقال رسوب می‌باشد.

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از روش PTV داده‌های لازم برای توصیف آماری حرکت بعد از آستانه یک ذره کروی (به عنوان نماینده ذره بار بستر) با چگالی‌های متفاوت، در مسیر یک فلوم آزمایشگاهی با زبری مشخص تحت شدت جریان‌های متفاوت، فراهم شود. سپس با تکنیک‌های تصویربرداری سرعت لحظه‌ای رسوب را محاسبه و در نهایت تابع توزیع احتمالاتی مناسب که بیانگر رفتار سرعت ذره در آن شرایط باشد را با معیارهای سنجش آماری بدست آورد. با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت برای ذره مورد آزمایش می‌توان شرایط رژیم‌های متفاوت انتقال رسوب را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج این پژوهش به دلیل در نظر گرفتن دامنه بزرگتری از نمونه‌های مربوط به رژیم‌های انتقال رسوب (با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت ذرات و اعداد رینولدز ذره متفاوت برای ایجاد شرایط لازم جهت مشاهده کردن رژیم ضعیف تا رژیم متوسط انتقال رسوب)، منتهی به تصمیم‌گیری دقیق‌تری در رابطه با شکل تابع توزیع احتمالاتی مربوط به انتقال رسوب خواهد بود. همانطور که در مرور بر پژوهش‌ها ذکر شد دلایل مشاهده توابع گوناگون در توصیف انتقال رسوب مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و تغییر احتمالی آن با تغییر در رژیم انتقال رسوب مطالعه خواهد شد و جمع بندی نهایی در رابطه با تابع توزیع احتمالاتی مناسب برای توصیف انتقال رسوب انجام و دلایل مشاهدات گوناگون بررسی خواهد شد. همچنین این پژوهش کاربردهای مستقیم و غیر مستقیم در هیدرولیک و هیدرولیک محیط زیست خواهد داشت. بدین صورت که کاربرد مستقیم آن در فهم رفتار رژیم‌های انتقال رسوبات و همچنین به فیزیک انتقال آلاینده‌های پلاستیکی در رودخانه خواهد بود که اخیراً به دلیل ازدیاد پس مانده‌های پلاستیکی در طبیعت، بررسی رفتار حرکتی آن‌ها که به صورت چرخش و غلطش نزدیک بستر رودخانه‌ها می‌باشد (ماکروپلاستیک<sup>۴</sup>)، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۴۰] و به صورت غیر مستقیم در پژوهش‌هایی که به هر نحو، هیدرولیک انتقال را در محیط‌های دیگر غیر از جریان‌های باز مانند پژوهش‌های تونل باد<sup>۵</sup> انجام می‌شود، استفاده کرد. نتایج بدست آمده از توابع توزیع احتمالاتی در برابر عدد بی بعد رینولدز ذره نیز به عنوان رابطه آماری-فیزیکی پدیده انتقال رسوب ارائه شده است که در شرایط مختلف هیدرولیکی جریان بتوان با استفاده از تابع توزیع مناسب قضاوت و درک بهتری از نحوه انتقال رسوب در طبیعت داشت.

## ۲- مواد و روش‌ها

به منظور تامین شرایط مرزی کاملاً کنترل شده و امکان برداشت اطلاعات صحیح از طریق تکنیک‌های تصویربرداری یک مدل آزمایشگاهی برای رسیدن به اهداف پژوهش آماده شد. آزمایش‌ها در یک کانال با عرض ۹۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر با شیب یک درصد در آزمایشگاه مهندسی آب دانشگاه گلاسگو<sup>۶</sup> انجام گردید (شکل ۱). برای تنظیم عمق جریان مورد نظر از یک دریچه در انتهای فلوم استفاده شد. هر آزمایش با یک عمق ثابت آب در مخزن آغاز شد تا شرایط یکسانی برای همه سری آزمایشات، که شامل ۱۳ فرکانس پمپ (نماینده ۱۳ شدت جریان مختلف) است، برقرار باشد. شرایط هیدرولیکی و دیگر مشخصات آزمایش در جدول ۱ قابل مشاهده است.

<sup>1</sup> Exponential

<sup>2</sup> Travel time

<sup>3</sup> Trauncated-Gaussian

<sup>4</sup> Macroplastic

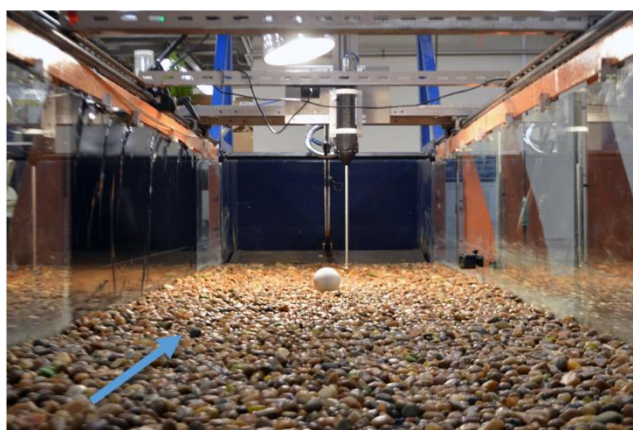
<sup>5</sup> Aeolian

<sup>6</sup> Glasgow

کانال مستطیلی با عرض ۹۰ سانتی‌متر ظرفیت عبور جریان آب با ۷۰ لیتر بر ثانیه در عمق ۴۱ سانتی‌متر را داراست. دلیل انتخاب این ابعاد برای کانال این بود که ذره در فاز انتقال علاوه بر داشتن آزادی کافی برای حرکت (رهگیری جحرکت تصادفی ذره) در عرض و طول کانال را داشته باشد و همچنین قابلیت فراهم آوردن محدوده دبی‌های استفاده شده را داشته باشد. جنس بستر توسط مهره‌های شیشه‌ای کروی با قطر ۱۵ mm جهت ایجاد زبری مشخص در مسیر جریان در طول ۱۵۰ cm (که محدوده مورد آزمایش است) در کانال تعبیه شد. چیدمان و آرایش به صورت چندضلعی بود که ذرات بستر در حرکت نباشند. این آرایش و زبری جهت ثابت بودن زبری جریان و جلوگیری از بروز عدم قطعیت‌های بیشتر بوده است.



ب



الف

شکل ۱ نمای کلی از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در مطالعه حاضر (الف و ب؛ جهت جریان در اشکال الف و ب مشخص شده است)

از گوی کروی با ۴ چگالی متفاوت ( $\rho_1=1380/33$ ,  $\rho_2=1500/60$ ,  $\rho_3=1619/76$ ,  $\rho_4=1997/28$  کیلوگرم بر مترمکعب) برای تحلیل حرکت رسوب مورد استفاده قرار گرفت. این مقادیر از یک طرف شرایط انتقال رسوب در نزدیک و بعد از آستانه را بدون نیاز به ایجاد سرعت‌های زیاد مهیا کرد و از طرفی می‌توان از نتایج این پژوهش در حرکت آلاینده‌های پلاستیکی که با وزن کمتر از رسوبات کوارتزی ( $\rho=2650$  کیلوگرم بر مترمکعب) به صورت غلطش و چرخش نزدیک بستر حرکت می‌کنند بهره گرفت. شرایط آزمایش‌ها به گونه‌ای بود که حرکت ذرات در رژیم انتقال کم<sup>۱</sup> (شرایط نزدیک و بعد از آستانه) قرار داشته باشد. در هر آزمایش مقدار دبی به صورت تدریجی افزایش پیدا کرد تا ذره در شرایط انتقال قرار گیرد هر چند معیار دقیقی برای تشخیص شرایط آستانه وجود ندارد [۲۹] و آن هم پدیده‌های تصادفی و آماری می‌باشد [۴۱]. در این راستا اولین سری آزمایش با شرایط هیدرولیکی تعریف شده در جدول ۱ (سری آزمایش ۱) هیچ گونه حرکتی در ذرات در همه مقادیر چگالی برای ذرات دیده نشد و به عنوان شرایط آستانه ثبت شد. برای اطمینان از یکنواخت بودن جریان، انتهای فلوم مجهز به یک دریچه قابل تنظیم برای ایجاد عمق ثابت به ازای هر فرکانس پمپ بود، همچنین مهره‌های کروی بستر به صورت همسطح در بستر کانال چیده شدند تا تلاطم حاصل از چیدمان نامنظم بستر باعث تغییرات زیاد در سطح آب نشود. دبی‌های هر آزمایش (جدول ۱) با تغییر فرکانس پمپ (توسط دستگاه اینورتر<sup>۲</sup>) تولید شد. سرعت ورودی جریان توسط دستگاه دبی‌سنج<sup>۳</sup> که روی فلوم نصب شده بود اندازه‌گیری و با توجه به اینکه آب ورودی به کانال توسط یک لوله ۶ اینچ (در ابتدای کانال) انجام می‌شد دبی ورودی تولید شده توسط پمپ با فرکانس مشخص در هر آزمایش کالیبره شد. همچنین به ازای هر فرکانس (دبی) با اندازه‌گیری مدرج روی تانک، تغییرات عمق آب با افزایش فرکانس قرائت و ضبط شد. سرعت جریان در هر آزمایش با دستگاه سرعت سنج ADV<sup>۴</sup> سه بعدی (که نحوه نصب آن در شکل ۱ ب نشان داده شده است) اندازه‌گیری و سرعت متوسط جریان با مقادیر

<sup>1</sup> Low transport regime

<sup>2</sup> Pump inverter

<sup>3</sup> Flowmeter

<sup>4</sup> Acoustic Doppler Velocimetry

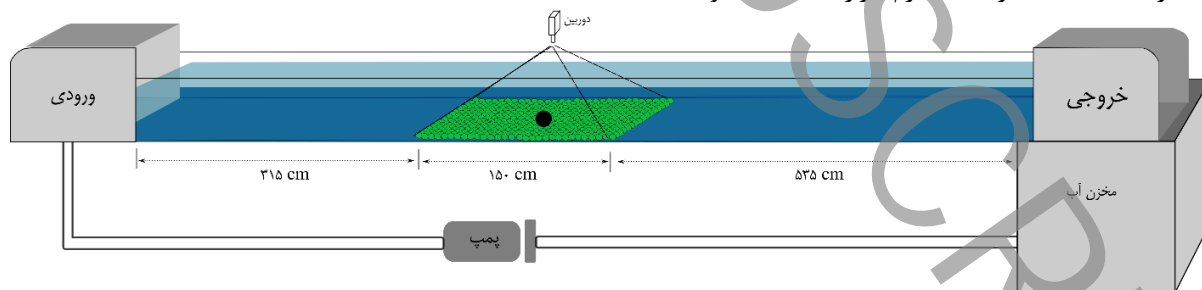
قرائت شده از دبی دسج و بدست آمده با در نظر گرفتن لوله ۶ اینچ مقایسه و صحت سنجی شد. قرائت‌ها توسط دستگاه فوق (ADV) در مدت زمان ۴ دقیقه (برای اطمینان از برداشت داده کافی) با فرکانس نمونه برداری ۲۵ هرتز انجام شد. برای محاسبه تنش برشی با برداشت سرعت جریان، از تراز ۲ میلیمتری تا ۸۰ میلیمتری بالای ذرات بستر (محاسبات به دلیل شرایط بستر زبر، با در نظر گرفتن خط فرضی دیوار تئوری<sup>۱</sup> انجام شد) توسط دستگاه ADV سه بعدی و با محاسبه سرعت برشی ( $u^*$ ) که از برازش خطی نمودار نیمه لگاریتمی عمق-سرعت متوسط بدست آمد، استفاده شد ( $\tau = \sqrt{\frac{u^*}{\rho}}$ ).

جدول ۱ پارامترهای هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های انجام شده

سر آزمایش	$Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$H (mm)$	$U \left(\frac{m}{s}\right)$	$Re$	$\tau_0$	$Re^*$
۱	۰/۰۱۲۰	۱۳۵	۰/۷۶	۱۲۵۸۷۶	۰/۲۱	۲۳۲/۹۷
۲	۰/۰۱۴۱	۱۳۷	۰/۸۹	۱۴۷۰۹۲	۰/۲۹	۲۷۷/۱۰
۳	۰/۰۱۶۸	۱۴۰	۱/۰۶	۱۷۵۳۷۸	۰/۳۲	۲۸۵/۴۵
۴	۰/۰۱۸۴	۱۴۵	۱/۱۶	۱۹۰۹۳۹	۰/۳۸	۳۱۴/۴۷
۵	۰/۰۲۰۱	۱۴۹	۱/۲۷	۲۰۹۳۲۳	۰/۴۲	۳۳۲/۷۹
۶	۰/۰۲۳۱	۱۵۳	۱/۴۵	۲۳۹۰۲۴	۰/۵۶	۳۸۴/۱۲
۷	۰/۰۲۶۵	۱۶۰	۱/۶۸	۲۷۴۳۸۲	۰/۷۶	۴۴۷/۳۰
۸	۰/۰۲۹۱	۱۶۴	۱/۸۳	۲۹۹۱۴۱	۰/۴۳	۴۴۹/۷۰
۹	۰/۰۳۲۴	۱۶۹	۲/۰۴	۳۳۳۷۸۵	۰/۷۷	۴۵۴/۰۳
۱۰	۰/۰۳۵۰	۱۷۲	۲/۲۱	۳۵۹۲۴۳	۰/۷۸	۵۲۴/۳۷
۱۱	۰/۰۳۷۶	۱۷۵	۲/۳۷	۳۸۶۱۱۶	۱/۱	۵۳۶/۶۷
۱۲	۰/۰۴۰۰	۱۷۸	۲/۵۲	۴۱۰۱۵۹	۱/۱۵	۵۴۸/۸۲
۱۳	۰/۰۴۳۳	۱۸۲	۲/۷۳	۴۴۴۱۰۴	۱/۲۲	۵۶۵/۰۴

$Q$  شدت جریان،  $H$  ارتفاع آب،  $U$  سرعت جریان،  $Re$  عدد رینولدز جریان،  $\tau_0$  تنش برشی بستر ( $N/m^2$ ) و  $Re^*$  عدد رینولدز ذره می‌باشد.

حرکت ذره بر بستر کانال از نمای بالا توسط دوربین گوبرو<sup>۲</sup> با دقت تصویر  $1920 \times 1080$  پیکسل و سرعت فریم  $60 \text{ fps}$  در محدوده تقریبی به طول  $150$  سانتیمتر ثبت شد (شکل ۲). برای محاسبه سرعت از فیلم‌های گرفته شده، ابتدا فریم‌های فیلم استخراج شدند. با تکنیک‌های پردازش تصویر می‌بایست هر نوع اعوجاج در فریم‌های ثبت شده را برطرف کرد (شکل ۳) که برای کالیبره کردن تصاویر از اندازه‌های معلوم (عرض کانال، طول محاسبه و اندازه مواد بستر) استفاده شد. با مشخص کردن مرکز جرم ذره در هر فریم، موقعیت و جابجایی آن قابل شناسایی است. سرعت لحظه‌ای هر فریم نیز به کمک الگوی عددی تفاضل مرکزی بدست آمد (رابطه ۱). مجموع این تکنیک‌ها در قالب یک کد در محیط نرم افزار MatLab نوشته شد.



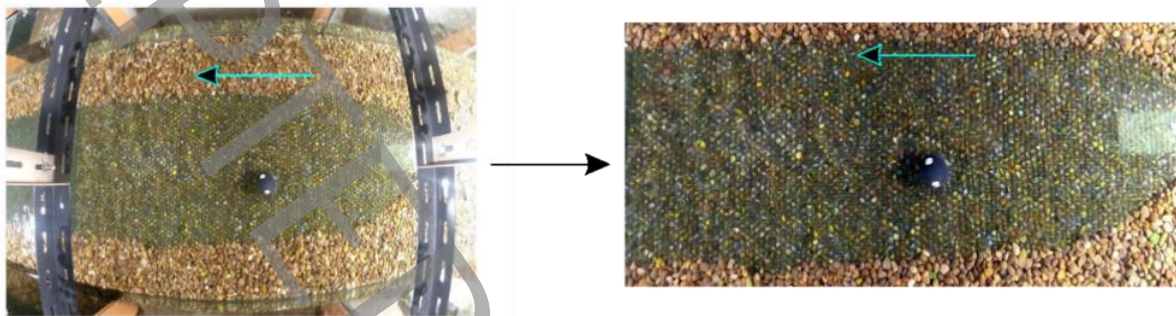
شکل ۲ تصویر شماتیک تجهیزات آزمایشگاه، برداشت تصاویر توسط دوربین GoPro از نمای بالای حرکت ذره (گوی کروی مشکی در شکل) در بازه  $90 \times 150$  سانتیمتر (عرض فلوم  $90$  سانتی‌متر)

<sup>1</sup> Theoretical wall

<sup>2</sup> GoPro

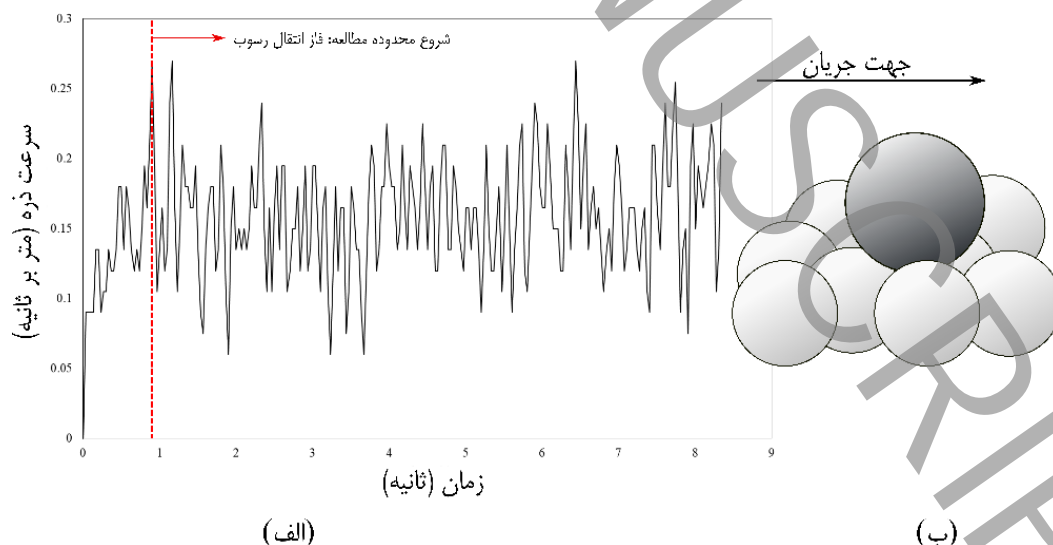
$$vx_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t}, vy_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta t} \quad (1)$$

که در آن  $vx_i$  و  $vy_i$  به ترتیب سرعت‌های لحظه‌ای طولی و عرضی ذره در فریم  $i$ ،  $x_{i+1}$ ،  $x_{i-1}$  و  $y_{i+1}$ ،  $y_{i-1}$  به ترتیب موقعیت مکانی طولی و عرضی ذره در فریم‌های  $i+1$  و  $i-1$  و  $\Delta t$  تفاوت زمانی بین هر فریم (یعنی  $\frac{1}{60}$  ثانیه) می‌باشد. ابتدا به صورت چشمی، آغاز و پایان حرکت ذره در فیلم‌های ضبط شده مورد ارزیابی قرار گرفت و سرعت حرکت آن با توجه به تغییر شدت جریان و چگالی ذره مورد ارزیابی قرار گرفت. این نتایج اولیه دید مناسبی برای تحلیل‌های PTV مخصوصاً برای جدایی حرکت ذره بعد از آستانه و در زمان آستانه در اختیار قرار می‌دهد، که با توجه به شکل ۴ فاز انتقال رسوب مشخص و بررسی‌های این پژوهش منحصرأ به این قسمت (یعنی فاز انتقال رسوب) محدود شد. با این روش با اطمینان از قرارگیری حرکت ذره در بازه انتقال تعداد داده‌های مورد نیاز برای تحلیل در اختیار قرار گرفت.



شکل ۳ تصحیح عکس از (الف) حالت خام به (ب) عکس معتبر شده و قابل استفاده برای تحلیل بعد از اصلاح. جهت جریان آب از راست به چپ در شکل

در ادامه بعد از آماده‌سازی فریم‌ها از فیلم‌های تهیه شده در آزمایش و اعمال روش PTV به توصیف حرکت ذرات رسوب پرداخته شد. در این قسمت با برازش توابع توزیع احتمال مختلف بر داده‌های سرعت لحظه‌ای حرکت ذره در مسیر جریان، سعی در انتخاب تابع مناسب شد. در ادامه برای تحلیل دقیق‌تر تابع توزیع احتمالاتی انتخاب شده، تغییر پارامترهای آماری آن تابع نسبت به تغییرات عدد رینولدز ذره  $Re^*$  در آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. توابع توزیع احتمالاتی متعددی، همانند توابع نرمال (رابطه ۲)، گاما (رابطه ۳)، نمایی، ویبول (رابطه ۴)، لوگ-نرمال (رابطه ۵)، که در تحقیقات پیشین (مرور شده در قسمت قبل) در مشاهدات مختلف گزارش شده است، بر داده‌های سرعت لحظه‌ای ذره برازش داده شد و با معیار کولموگروف-اسمیرنوف (رابطه ۶) مورد سنجش و رتبه‌بندی قرار گرفتند.



شکل ۴ جداسازی داده‌های مربوط به فاز انتقال رسوب و (ب) ذره مورد بررسی و در معرض جریان آب

$$N(x) = \frac{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$G(x) = \frac{(x)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha(\alpha-1)!} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad (3)$$

$$w(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (4)$$

$$L(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_l}{\sigma_l}\right)^2\right)}{x\sigma_l\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

که  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس توابع توزیع احتمالاتی گاما ( $G(x)$ )، ویبول ( $w(x)$ )، و  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب میانگین و انحراف از معیار داده‌ها استفاده شده در تابع توزیع نرمال ( $N(x)$ ) و  $\mu_l$  و  $\sigma_l$ ، به ترتیب میانگین لگاریتم توزیع ( $\mu_l = \ln\left(\frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}}\right)$ ) و پارامتر شکل ( $\sigma_l = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)}$ ) تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال  $L(x)$  می‌باشد.

$$D_{m,n} = \max |F_m(x) - G_n(x)| \quad (6)$$

که در آن  $F_m(x)$ ، تابع توزیع احتمالاتی تجمعی مشاهداتی با تعداد  $m$  نمونه،  $G_n(x)$  تابع توزیع احتمالاتی تجمعی محاسبه شده با تعداد  $n$  نمونه و  $D_{m,n}$  مقدار آماری پارامتر کولموگروف-اسمیرنوف می‌باشد. در آزمون فوق فرض صفر بر این پایه است که توابع توزیع احتمالاتی نمونه مشاهداتی (که به صورت هیستوگرام نشان داده شده است) و نمونه تجربی (تابع برازش شده) مطابقت دارند. اگر مقدار  $D_{m,n}$  در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، از یک سطح اطمینان (در این مطالعه ۵ درصد) بیشتر شود این فرض مردود است که به معنی عدم تطابق دو نمونه از تابع توزیع احتمالاتی مورد نظر می‌باشد.

### ۳- نتایج

در جدول ۲، با توجه به معیار آماری (یعنی روش کولموگروف-اسمیرنوف؛ رابطه ۶) مقایسه توابع توزیع مشاهده شده در سری‌های آزمایش و توابع توزیع تجربی، نتایج بهترین تابع توزیع احتمالاتی توصیف کننده حرکت ذره در شرایط آستانه و بعد از آستانه انتقال رسوب ارائه شده است (با تغییر در چگالی ذره). همچنین در شکل ۴، هیستوگرام (مشاهدات) و توابع توزیع احتمالاتی برازش شده (روابط تجربی ۳ تا ۶) قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در رژیم انتقال رسوب نزدیک به آستانه (پایین بودن نسبی عدد رینولدز جریان و ذره) سرعت ذره از تابع لوگ نرمال و با افزایش پارامترهای مرتبط با هیدرولیک جریان (عدد رینولدز جریان و همچنین ذره)، از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کند. با توجه به مطالعاتی که در رابطه با تغییرات لحظه‌ای تنش برشی توسط چنگ و لو (۲۰۰۳) [۴۲] و چنگ (۲۰۰۶) [۴۳] انجام شده است، مشخص شد که پارامتر تنش برشی لحظه‌ای از تابع توزیع لوگ نرمال تبعیت می‌کند که به دلیل تشابه رفتاری سرعت ذرات بستر و تنش برشی می‌توان گفت که حرکت ذرات در شرایط انتقال رژیم کم وابسته به ارتباط ذره-بستر می‌باشد. به طور کلی همانطور که در تحقیقات موری و همکاران (۲۰۰۹) [۴۴] و لیمپرت و همکاران (۲۰۰۱) [۴۵] ذکر شده است، رفتار لوگ-نرمال در پدیده‌ها ناشی از تأثیر مرکب پارامترهای دخیل در فرآیندهای تصادفی است (که در ذات پدیده‌های جریان‌های آشفته می‌باشد). در مقابل، با افزایش مقادیر هیدرولیکی جریان (عدد رینولدز جریان و ذره) با توجه به رفتار گوسین (نرمال) سرعت ذرات، می‌توان نتیجه گرفت که در این شرایط، انتقال رسوب (که در رژیم تعادلی انتقال رسوب قرار گرفته است) بستگی به پارامترهای مجموع حاکم بر جریان دارد.



این نتیجه می‌تواند مؤید این نکته باشد که با توجه به افزایش عدد رینولدز، آشفتگی بر جریان حاکم شده و اثرات ذره-بستر که بیشتر در رژیم‌های انتقال ضعیف (جریان‌های ویسکوز) دیده می‌شود کاهش می‌یابد و انتقال ذرات بستر تحت پارامترهای دخیل در آشفتگی جریان خواهد بود. در عین حال ضروریست پارامترهای دینامیکی جریان برای جمع بندی نهایی مد نظر قرار گیرد به دلیل اینکه پارامترهای نیرو (نیروهای موضعی پسا و برا) و انرژی جنبشی ذره تابعی از مجذور سرعت لحظه‌ای ذره  $u^2$  می‌باشد که بررسی رفتار این پارامتر در یک مطالعه دیگر باید گنجانده شود. آن دسته از محققین که تابع توزیع احتمالاتی نمایی را به عنوان توصیف کننده سرعت لحظه‌ای ذرات بستر ارائه کرده‌اند (ذکر شده در مروری بر تحقیقات؛ به عنوان مثال تحقیقات شی و دیپلاس (۲۰۱۸) [۴۶] و رزبری و همکاران (۲۰۱۲) [۲۳]) تعداد آزمایش‌های کم با ذرات ریز (۰/۵ میلی‌متر) و اعداد رینولدز جریان به نسبت کم ( $Re < 6000$ ) استفاده کردند. که در پژوهش وو و همکاران (۲۰۲۰) [۳۷] نشان داده شد که با افزایش پنجره و زمان برداشت (یا افزایش زمان طی مسافت) تابع توزیع به سمت نرمال میل پیدا می‌کند. این تأیید کننده این موضوع است که برداشت نمونه‌ها در تحقیقات پیشین در محدوده رژیم انتقالی حرکت ذرات بستر (یعنی پیش از حالت تعادلی انتقال رسوب که محدوده برداشت پژوهش حاضر بوده است؛ رجوع شود به شکل ۴) بوده است.

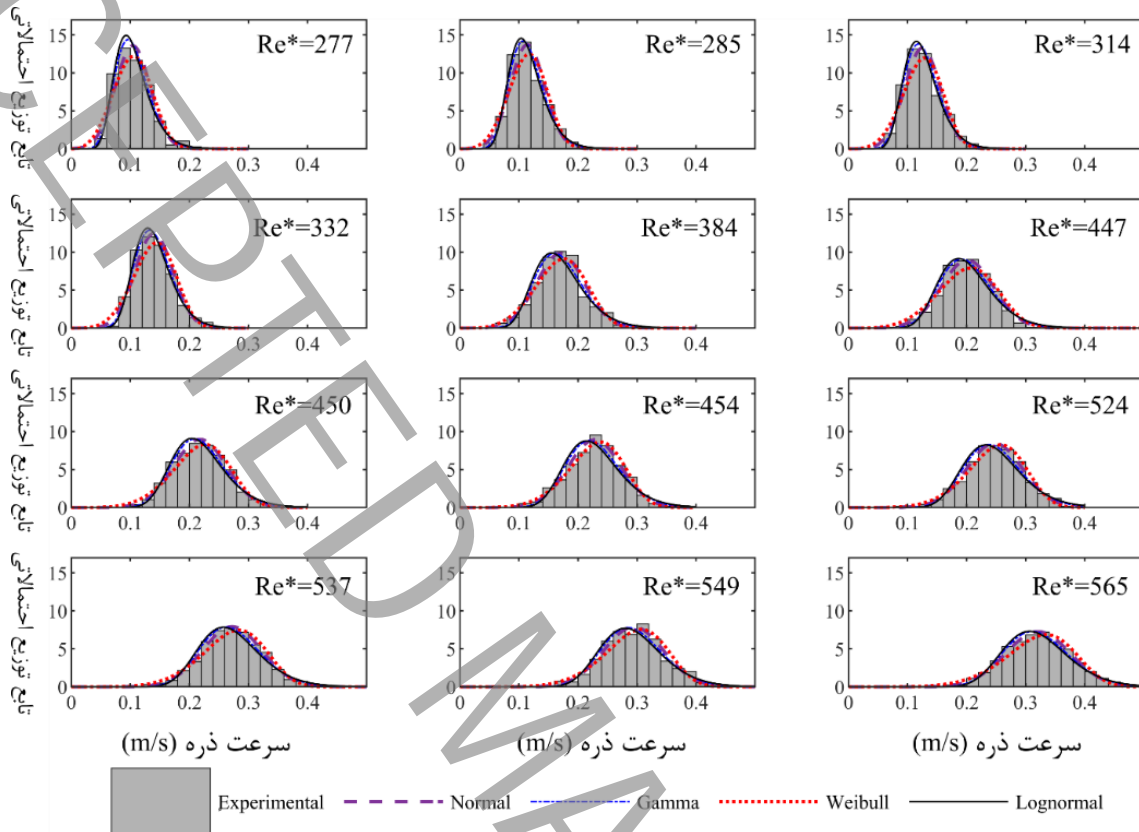
جدول ۲ مقادیر آماری کولموگروف-اسمیرنوف (رابطه ۶) برای بهترین تابع توزیع احتمالاتی ( $D_{m,n}/N$ ) برای تابع نرمال و  $D_{m,n}/LN$  برای تابع لوگ-نرمال؛ علامت "-" نشان دهنده عدم حرکت ذره در آن آزمایش می‌باشد

$Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$	$Re^*$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$
۰/۰۱۲۰	۲۳۲/۹۷	-	-	-	-
۰/۰۱۴۱	۲۷۷/۱۰	$D_{m,n}/LN = 0.03267$	-	-	-
۰/۰۱۶۸	۲۸۵/۴۵	$D_{m,n}/LN = 0.02772$	-	-	-
۰/۰۱۸۴	۳۱۴/۴۷	$D_{m,n}/LN = 0.02562$	$D_{m,n}/LN = 0.03475$	-	-
۰/۰۲۰۱	۳۳۲/۷۹	$D_{m,n}/LN = 0.02532$	$D_{m,n}/LN = 0.03796$	-	-
۰/۰۲۳۱	۳۸۴/۱۲	$D_{m,n}/N = 0.02617$	$D_{m,n}/LN = 0.03527$	-	-
۰/۰۲۶۵	۴۴۷/۳۰	$D_{m,n}/N = 0.03716$	$D_{m,n}/LN = 0.02359$	$D_{m,n}/LN = 0.02368$	-
۰/۰۲۹۱	۴۴۹/۷۰	$D_{m,n}/N = 0.02410$	$D_{m,n}/N = 0.02179$	$D_{m,n}/LN = 0.04423$	-
۰/۰۳۲۴	۴۵۴/۰۳	$D_{m,n}/N = 0.02576$	$D_{m,n}/N = 0.02291$	$D_{m,n}/LN = 0.03112$	-
۰/۰۳۵۰	۵۲۴/۳۷	$D_{m,n}/N = 0.02619$	$D_{m,n}/N = 0.01803$	$D_{m,n}/LN = 0.02341$	$D_{m,n}/LN = 0.02663$
۰/۰۳۷۶	۵۳۶/۶۷	$D_{m,n}/N = 0.02843$	$D_{m,n}/N = 0.02928$	$D_{m,n}/N = 0.02057$	$D_{m,n}/LN = 0.02996$
۰/۰۴۰۰	۵۴۸/۸۲	$D_{m,n}/N = 0.03594$	$D_{m,n}/N = 0.03043$	$D_{m,n}/N = 0.02283$	$D_{m,n}/LN = 0.02948$
۰/۰۴۳۳	۵۶۵/۰۴	$D_{m,n}/N = 0.04161$	$D_{m,n}/N = 0.02368$	$D_{m,n}/N = 0.02189$	$D_{m,n}/N = 0.02700$

به طور کلی شکل تابع توزیع احتمالاتی بستگی به فرکانسی که ذرات در ارتباط با بستر و نیروهای نوسانی جریان، که بر ذره اعمال می‌شود دارد. بدین صورت که شکل تابع در ارتباط ذره-بستر با فرکانس بالا، به صورت لوگ نرمال می‌شود و ارتباطات با فرکانس کمتر به دلیل تجربه طولانی‌تر نیروهای سیال توسط ذره به سمت نرمال سوق پیدا می‌کند.

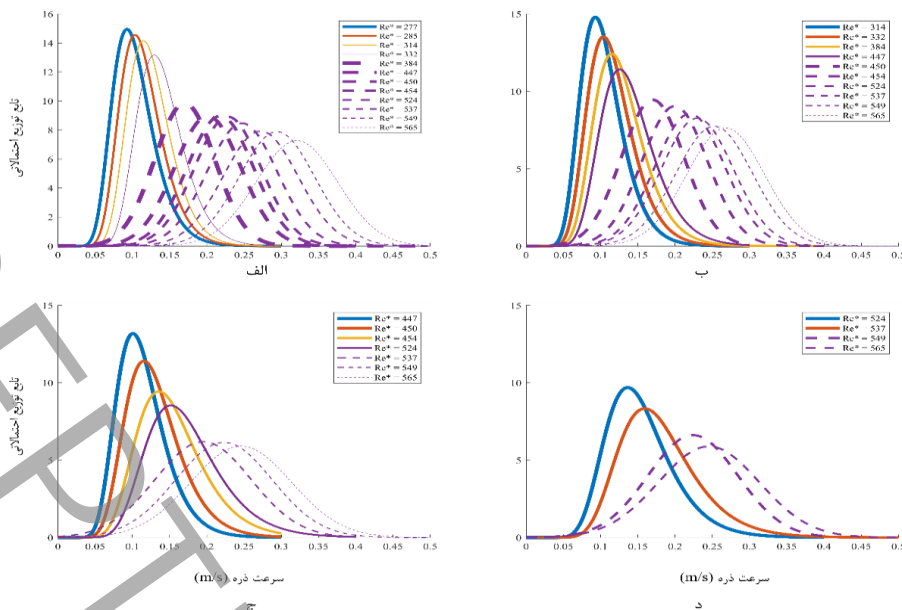
با توجه به جدول ۲، با اندازه‌گیری سرعت جریان در مجرای روباز و به تبع آن محاسبه عدد رینولدز ذره می‌توان احتمال سرعت حرکت ذرات بستر را در اوزان مختلف تخمین زد. نتایج این پژوهش با قالب دید تصادفی حرکت ذرات رسوبی می‌تواند در نهایت با پیوند با قالب دید قطعی، برای تخمین دبی انتقال رسوب نیز اعمال شود. در این راستا تلاش‌هایی در زمینه تولید روابط بار بستر با نگاه تصادفی بودن حرکت رسوبات بستر انجام شده است (مطالعات شی و دیپلاس (۲۰۱۸) [۴۶] و انسی و پاسکال (۲۰۲۰) [۴۷]). اما آزمایشات انجام شده در این تحقیقات محدود به شرایط خاص جریان و پیش فرض‌هایی می‌باشد که برای بررسی صحت آن‌ها نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتری می‌باشد. نتایج این پژوهش به دلیل بررسی محدوده بیشتری از شرایط هیدرولیکی جریان و رژیم انتقال رسوب می‌تواند برای قضاوت بهتر در رابطه با فیزیک انتقال، مکمل این قبیل مطالعات باشد. در بررسی حرکت مواد پلاستیکی در رودخانه‌ها که اخیراً بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است و همچنین پژوهش‌های مشابه شرایط آزمایش‌های این پژوهش (مانند تونل باد) نیز قابل استفاده

است. در شکل ۵ نحوه تغییر نوع تابع توزیع و دامنه گسترش آن با توجه به شرایط آزمایش با توجه به چگالی‌های متفاوت ذره بستر، قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز پیک تابع توزیع عموماً کاهش و شکل تابع پهن تر می‌شود و سوق به تابع توزیع نرمال پیدا می‌کند که همانطور که پیش تر توضیح داده شد رفتار انتقال رسوبات (با قرار گیری تدریجی در رژیم تعادلی انتقال) بیشتر تحت تأثیر نیروهای سیال قرار گرفته است. همچنین در شکل ۶، نحوه تغییرات توابع توزیع احتمالاتی در چگالی‌های  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  نشان داده شده است.



شکل ۵ مقایسه تابع توزیع احتمالاتی مشاهداتی (هیستوگرام) با توابع توزیع احتمالاتی تجربی (نرمال، گاما، ویبول و لوگ نرمال) سرعت لحظه‌ای ذره برای چگالی  $\rho_1$

تغییر شکل تابع توزیع از لوگ-نرمال به نرمال در شکل به وضوح مشخص است (خط‌های ممتد مربوط به تابع توزیع لوگ-نرمال و خط ناپیوسته مربوط به تابع توزیع نرمال می‌باشند).

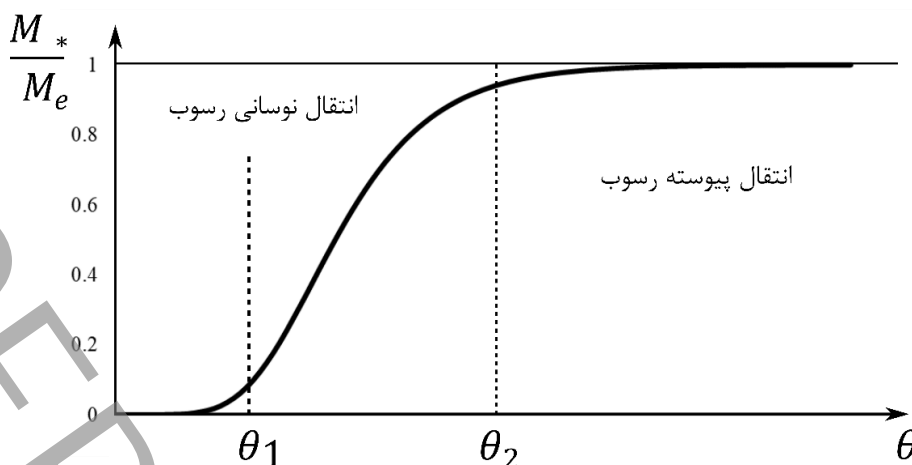


شکل ۶ تغییرات تابع توزیع احتمالاتی نرمال در آزمایش‌های انجام شده برای چهار ذره با چگالی‌های الف)  $\rho_1$ ، ب)  $\rho_2$ ، ج)  $\rho_3$  و د)  $\rho_4$

نکته حائز اهمیت نتیجه این تحقق، مشاهده تغییر تابع توزیع احتمالاتی در شرایط مختلف جریان و رژیم انتقال رسوب است. تغییر در شکل تابع توزیع احتمالاتی از لوگ-نرمال به تابع توزیع نرمال، با تغییر در وضعیت قرارگیری شرایط آزمایش در رژیم انتقال رسوب می‌باشد که این نتیجه پاسخگوی تعدد نتایج تحقیقات پیشین می‌باشد که زمانی که رژیم انتقال رسوب در شرایط بعد از آستانه قوی‌تر شده است تابع توزیع گوسین (نرمال) بهترین تابع توصیف کننده حرکت بار ستر خواهد بود.

با توجه به نتایج، تابع توزیع احتمالاتی گاما بعد از تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال بهترین توصیف کننده انتقال رسوب در شرایط رژیم ضعیف انتقال می‌باشد. این تابع توزیع احتمالاتی (یعنی گاما) در مطالعات رزبری و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده شد [۲۳]. همچنین در رژیم تعادلی انتقال رسوب تابع توزیع احتمالاتی ویبول بعد از تابع توزیع نرمال، بهترین توصیف کننده انتقال رسوب می‌باشد. این تابع در پژوهش فرهادی و والبراکیس (۲۰۱۹) که با استفاده از سنورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ دینامیک جریان را مورد تحلیل قرار دادند برای ارزیابی سرعت رسوب در یک سری آزمایش تابع ویبول را بررسی کردند و توصیف کننده مناسبی برای حرکت رسوب گزارش کردند [۴۸]. با توجه به مشاهدات پژوهش‌های پیشین می‌توان چنین جمع بندی نمود که توابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال و گاما برای توصیف حرکت ذره رسوبی در شرایط ضعیف رژیم انتقال رسوب و توابع توزیع احتمالاتی نرمال و ویبول در شرایط رژیم تعادلی بهترین توصیف کننده برای انتقال رسوب می‌باشد.

مشاهدات فوق را می‌توان در نمودار ارائه شده در پژوهش پاتز و همکاران (۲۰۲۰) [۴۹] نیز بررسی کرد (شکل ۷). پاتز و همکاران (۲۰۲۰) در این پژوهش اطلاعات موجود در رابطه با آغاز حرکت و سپس حرکت رسوبات در جریان‌های آبی و بادی (مطالعات تونل باد) جمع آوری کردند و در قسمتی از پژوهش برای تمایز رژیم‌های انتقال رسوب دو شرایط آستانه را تعریف کردند که یکی مربوط به همان آستانه‌ای است که در مطالعات شیلدز (۱۹۳۶) ارائه شده است ( $\theta_1$ ) و دیگری آستانه‌ای است که مربوط به شرایط تعادلی (به دلیل قرار گرفتن در معرض نیروهای سیال جریان) می‌باشد.



شکل ۷ خلاصه شرایط آستانه با معیار عدد شیلدز ( $\theta$ ) با توجه به نسبت ظرفیت انتقال رسوب ( $\frac{M_*}{M_e}$ ) توسط پاتز و همکاران (۲۰۲۰)

در این پژوهش نیز با توجه به مشاهده دو تابع توزیع احتمالاتی در دو رژیم انتقال، می‌توان دو آستانه برای انتقال رسوب در نظر گرفت که با توجه به نوع تابع که نشان‌دهنده نوع رفتار رسوب است قرار گرفتن در فاز نوسانی حرکت رسوب (تابع توزیع لوگ نرمال، که بیشتر ارتباط ذره-بستر در انتقال رسوب حاکم است) و فاز تعادلی حرکت رسوب (تابع توزیع نرمال که نشان‌دهنده وضعیت تعادلی جریان حول پارامترهای میانگین است و نشان‌دهنده در معرض بودن ذره تحت نیروهای سیال است) می‌باشد. در شکل ۷، دو آستانه  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برای نشان دادن تغییر در رژیم انتقال رسوب معرفی شده است (بر اساس مطالعه پاتز و همکاران (۲۰۲۰) [۴۹]). همچنین ظرفیت انتقال رسوب، معرفی شده در مطالعات پاتز و دوران (۲۰۱۸) [۵۰]، به صورت  $M_* = M_e \propto (\theta - \theta_1)$  ارائه شده است که  $M_e$  نیز تابعی از تنش برشی بستر است. نتایج پژوهش حاضر با این تعریف همخوانی دارد که دو شرایط آستانه برای هر رژیم انتقال رسوب قابل تعریف است و تابع توزیع احتمالاتی برای هر یک از رژیم‌های انتقال رسوب ارائه شد.

#### ۴- نتیجه گیری

مباحثی همچون فرسایش و پایداری کانال‌ها منجر به ارائه روابط تجربی و نیمه تجربی شد که از آن به عنوان نگاه قطعی به مسئله حرکت رسوب می‌توان یاد کرد. نگاه قطعی را می‌توان نگرش مهندسی به مسئله حرکت رسوب دانست که با توجه به خطای زیاد در محاسبه و تخمین به دلیل چشم‌پوشی از ذات تصادفی آن ضروری است مجدداً مورد ارزیابی قرار داد. این پژوهش به توصیف احتمالاتی حرکت رسوب از طریق بررسی سرعت لحظه‌ای شرایط حرکت بار بستر بعد از آستانه می‌پردازد. در این راستا مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک فلوم با شدت جریان‌های مختلف و ذرات با چگالی متفاوت انجام شد. ردیابی ذره از طریق تکنیک ضبط تصاویر در قالب روش PTV انجام شد. بعد از استخراج فریم‌ها و اصلاح تصاویر، موقعیت ذره در هر فریم مشخص، سرعت لحظه‌ای ذره برداشت شد. هیستوگرام‌های سرعت لحظه‌ای ذره، مربوط به هر کدام از آزمایش‌ها محاسبه و توابع توزیع احتمالاتی مختلف توسط معیار آماری کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی بهترین برازش مورد ارزیابی قرار گرفت. با تغییرات در مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه (شدت جریان و چگالی ذره)، توابع توزیع احتمالاتی متفاوتی برای بهترین برازش توزیع احتمالاتی سرعت ذره گزارش شد که نشان‌دهنده رفتار متفاوت حرکت ذره در شرایط مختلف است. بر اساس تغییرات نوع تابع توزیع احتمالاتی در شرایط مختلف جریان می‌توان بیان کرد رفتار حرکت ذره به صورت تابع توزیع لوگ-نرمال در مقادیر پایین عدد رینولدز قابل توصیف و متناسب با افزایش این مقدار با تابع توزیع احتمالاتی نرمال قابل توصیف است. بررسی‌های احتمالاتی رفتار پیچیده حرکت رسوب، که ناشی از عوامل متعدد (از جمله آشفتگی جریان، نحوه آرایش ذرات) می‌باشد، مسیر را برای توصیف این پدیده هموار می‌کند و رفتار حرکت ذرات و تبادل انرژی با محیط اطراف از طریق این تحلیل میسر خواهد بود. با توجه به مشاهدات پژوهش‌های پیشین که تنش برشی لحظه‌ای با تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال توصیف شده است، می‌توان اظهار کرد که با توجه به مشاهده تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال در اعداد رینولدز پایین انتقال رسوب تحت تأثیر ارتباطات ذره-بستر می‌باشد (شرایط رژیم ضعیف انتقال؛ نزدیک اما بعد از آستانه). همچنین با توجه به افزایش عدد رینولدز، رفتار انتقال

رسوب توسط تابع توزیع نرمال قابل توصیف است که نشان‌دهنده پیروی انتقال رسوب از شرایط تعادلی انتقال رسوب در جریان است. در این وضعیت رژیم انتقال رسوب به یک حالت تعادلی رسیده است و با توجه به نرمال بودن توزیع مشاهدات، نشانگر این است که نیروهای سیال وارد بر ذره مسئول حرکت ذره هستند و به حالت تعادلی رسیده است و حرکت به صورت پیوسته ادامه دارد. بدین شکل که در این شرایط، ذره زمان کافی برای تحت تأثیر بودن نیروهای سیال می‌باشد. نتیجه این تحقیقات برای یک جمع بندی کلی از فرکانس سرعت ذرات و تغییرات شکل توابع توزیع احتمالاتی در شرایط مختلف رژیم انتقال رسوب کاربرد دارد که با توجه به عدد رینولدز ذره می‌توان حرکت ذرات را در قالب احتمالاتی و تصادفی (که ذات حرکت رسوبات بستر) می‌باشد توصیف کرد. همچنین برای انتقال رسوب دو آستانه حرکت پیشنهاد شد که مربوط به دو رژیم انتقال رسوب در وضعیت حرکت نوسانی و رژیم انتقال رسوب در وضعیت تعادلی است. نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد و نشان داد که دلیل تفاوت نتایج در پژوهش‌های پیشین مربوط به زمان و محدوده برداشت داده‌ها دارد که در این پژوهش با داشتن محدوده مناسب برای در نظر گرفتن شرایط متفاوت رژیم انتقال رسوب به یک جمع بندی نهایی رسیده شد. این پژوهش در راستای شناسایی بیشتر رفتار انتقال رسوب در شرایط مختلف هیدرولیکی است که با در دسترس داشتن علوم آماری و ابزارهای اندازه‌گیری امروزی توانایی برداشت داده‌ها با جزئیات زمانی شرایط را برای تحلیل عمیق‌تر رفتار نوسانی رسوب فراهم کرده است. پژوهش‌های گذشته در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت و توابع توزیع احتمالاتی مناسب در شرایط مختلف رژیم انتقال رسوب مورد ارزیابی قرار گرفت و دلایل مشاهدات نتایج پژوهش‌های گذشته ارائه شد. اطلاعاتی که از نتایج این پژوهش بدست آمد، برای تهیه مدل‌های تصادفی-آماري انتقال رسوبات می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و همچنین برای رسیدن به یک قالب فیزیک محور، می‌توان با توجه به رابطه عدد رینولدز ذره  $Re^*$  با توابع توزیع احتمالاتی گزارش شده، در قالب فیزیکی، نیز انتقال رسوبات در شرایط واقعی (رودخانه) نتایج این پژوهش را ارائه کرد. همچنین نتایج این پژوهش در موضوعات اکو-هیدرولیک جهت بررسی ماکروپلاستیک‌ها که همانند بار بستر در رودخانه منتقل می‌شوند، قابل استناد می‌باشد. در این راستا، برای مطالعات دینامیک انتقال رسوب، برداشت اطلاعات همچون شتاب و سرعت‌های زاویه‌ای برای تحلیل حرکت ذرات بار بستر می‌تواند کمک قابل توجهی در شناخت حرکت رسوبات باشد. ترکیب مکانیک و دینامیک حرکت ذره می‌تواند برای تعمیم و گسترش اطلاعات در رودخانه‌های طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

##### ۵- فهرست علائم

$D_{m,n}$	مقدار آماری معیار کولموگروف-اسمیرنوف
$D_{m,n}/LN$	مقدار آماری معیار کولموگروف-اسمیرنوف برای تابع توزیع لوگ-نرمال

مقدار آماری معیار کولوموگروف-اسمیرنوف برای تابع توزیع نرمال	$D_{m,n}/N$
تابع توزیع احتمالاتی تجمعی مشاهداتی با تعداد $m$ نمونه	$F_m$
تابع توزیع احتمالاتی تجمعی محاسبه شده با تعداد $n$ نمونه	$G_n$
ارتفاع آب	$H$
نرخ جریان (دبی)	$Q$
عدد رینولدز جریان	$Re$
عدد رینولدز ذره	$Re^*$
سرعت متوسط جریان	$U$
سرعت برشی	$u^*$
سرعت در راستای جریان ذره در سیال	$vx_i$
سرعت در عرض ذره در سیال	$vy_i$
نمونه	$x$
موقعیت ذره در راستای مکانی افقی	$x_i$
موقعیت ذره در راستای مکانی قائم	$y_i$
پارامتر شکل تابع توزیع احتمالاتی گاما	$\alpha$
پارامتر مقیاس تابع توزیع احتمالاتی گاما	$\beta$
تفاضل زمانی (مدت زمان بین دو فریم)	$\Delta t$
انحراف از معیار	$\sigma$
پارامتر شکل تابع توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال	$\sigma_l$
تنش برشی	$\tau$
تنش برشی بستر	$\tau_0$
میانگین نمونه‌ها	$\mu$
پارامتر موقعیت تابع توزیع احتمالاتی نرمال	$\mu_l$

## ۶- منابع

- [1] M.S. Yalin, Mechanics of sediment transport, Pergamon press, Newyork, 2013.
- [2] N. Fan, D. Zhong, B. Wu, E. Foufoula-Georgiou, M. Guala, A mechanistic-stochastic formulation of bed load particle motions: From individual particle forces to the Fokker-Planck equation under low transport rates, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(3) (2014) 464-482.
- [3] C. Ancey, Bedload transport: a walk between randomness and determinism. Part 1. The state of the art, Journal of Hydraulic Research, 58(1) (2020) 1-17.
- [4] C. Ancey, Bedload transport: a walk between randomness and determinism. Part 2. Challenges and prospects, Journal of Hydraulic Research, 58(1) (2020) 18-33.
- [5] D.J. Furbish, S.L. Fathel, M.W. Schmeeckle, Particle motions and bed load theory: The entrainment forms of the flux and the Exner equation, Gravel-bed Rivers: Processes and Disasters, (2016).
- [6] J. Heyman, F. Mettra, H. Ma, C. Ancey, Statistics of bedload transport over steep slopes: Separation of time scales and collective motion, Geophysical Research Letters, 40(1) (2013) 128-133.
- [7] A. Recking, An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(3) (2013) 1264-1281.
- [8] J.W. Kirchner, W.E. Dietrich, F. Iseya, H. Ikeda, The variability of critical shear stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediments, Sedimentology, 37(4) (1990) 647-672.
- [9] A. Shields, Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement, Soil Conservation Service, 1936.

- [10] O. Gronz, P.H. Hiller, S. Wirtz, K. Becker, T. Iserloh, M. Seeger, C. Brings, J. Aberle, M.C. Casper, J.B. Ries, Smartstones: A small 9-axis sensor implanted in stones to track their movements, *Catena*, 142 (2016) 245-251.
- [11] M.A. Hassan, H. Voepel, R. Schumer, G. Parker, L. Fraccarollo, Displacement characteristics of coarse fluvial bed sediment, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1) (2013) 155-165.
- [12] L. Olinde, J.P. Johnson, Using RFID and accelerometer-embedded tracers to measure probabilities of bed load transport, step lengths, and rest times in a mountain stream, *Water Resources Research*, 51(9) (2015) 7572-7589.
- [13] W.H. Hager, Du Boys and sediment transport, *Journal of Hydraulic Research*, 43(3) (2005) 227-233.
- [14] S. Dey, *Fluvial hydrodynamics*, Springer, 2014.
- [15] H.A. Einstein, Bedload transport as a probability problem, *Sedimentation* (reprinted in 1972). Water Resources Publications, Colorado, (1937) 105-108.
- [16] H. Habersack, A. Kreisler, Sediment transport processes, in: *Dating torrential processes on fans and cones*, Springer, 2013, pp. 51-73.
- [17] C. Ancey, P. Bohorquez, J. Heyman, Stochastic interpretation of the advection-diffusion equation and its relevance to bed load transport, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(12) (2015) 2529-2551.
- [18] C. Ancey, J. Heyman, A microstructural approach to bed load transport: mean behaviour and fluctuations of particle transport rates, *Journal of Fluid Mechanics*, 744 (2014) 129-168.
- [19] P. Diplas, C.L. Dancy, A.O. Celik, M. Valyrakis, K. Greer, T. Akar, The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions, *Science*, 322(5902) (2008) 717-720.
- [20] D.J. Furbish, P.K. Haff, J.C. Roseberry, M.W. Schmeeckle, A probabilistic description of the bed load sediment flux: 1. Theory, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3) (2012).
- [21] J. Heyman, P. Bohorquez, C. Ancey, Entrainment, motion, and deposition of coarse particles transported by water over a sloping mobile bed, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, (2016).
- [22] E. Lajeunesse, L. Malverti, F. Charru, Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4) (2010).
- [23] J.C. Roseberry, M.W. Schmeeckle, D.J. Furbish, A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3) (2012).
- [24] J. Shim, J. Duan, Experimental and theoretical study of bed load particle velocity, *Journal of Hydraulic Research*, 57(1) (2019) 62-74.
- [25] J. Shim, J.G. Duan, Experimental study of bed-load transport using particle motion tracking, *International Journal of Sediment Research*, (2016).
- [26] M. Valyrakis, P. Diplas, C.L. Dancy, Entrainment of coarse grains in turbulent flows: An extreme value theory approach, *Water Resources Research*, 47(9) (2011).
- [27] M. Valyrakis, P. Diplas, C.L. Dancy, Entrainment of coarse particles in turbulent flows: An energy approach, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1) (2013) 42-53.
- [28] M. Valyrakis, P. Diplas, C.L. Dancy, K. Greer, A.O. Celik, Role of instantaneous force magnitude and duration on particle entrainment, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F2) (2010).
- [29] J.M. Buffington, D.R. Montgomery, A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers, *Water Resources Research*, 33(8) (1997) 1993-2029.
- [30] A.O. Celik, P. Diplas, C.L. Dancy, M. Valyrakis, Impulse and particle dislodgement under turbulent flow conditions, *Physics of Fluids*, 22(4) (2010) 046601.

- [31] R. Fernandez Luque, R. Van Beek, Erosion and transport of bed-load sediment, *Journal of hydraulic research*, 14(2) (1976) 127-144.
- [32] J. Bridge, D. Dominic, Bed load grain velocities and sediment transport rates, *Water Resources Research*, 20(4) (1984) 476-490.
- [33] A. Keshavarzy, J. Ball, An application of image processing in the study of sediment motion, *Journal of hydraulic research*, 37(4) (1999) 559-576.
- [34] A. Radice, S. Malavasi, F. Ballio, Solid transport measurements through image processing, *Experiments in fluids*, 41(5) (2006) 721-734.
- [35] M. Houssais, E. Lajeunesse, Bedload transport of a bimodal sediment bed, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F4) (2012).
- [36] K. Heays, H. Friedrich, B. Melville, R. Nokes, Quantifying the dynamic evolution of graded gravel beds using particle tracking velocimetry, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7) (2014) 04014027.
- [37] Z. Wu, D. Furbish, E. Foufoula-Georgiou, Generalization of hop distance-time scaling and particle velocity distributions via a two-regime formalism of bedload particle motions, *Water Resources Research*, 56(1) (2020) e2019WR025116.
- [38] J. Shim, J.G. Duan, Experimental study of bed-load transport using particle motion tracking, *International Journal of Sediment Research*, 32(1) (2017) 73-81.
- [39] R.L. Martin, D.J. Jerolmack, R. Schumer, The physical basis for anomalous diffusion in bed load transport, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1) (2012).
- [40] D. Liu, M. Valyrakis, Preliminary investigation of the transport of small plastic litter along a vegetated riverbank, in: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, pp. 14788.
- [41] G. Maniatis, T. Hoey, R. Hodge, D. Rickenmann, A. Badoux, Inertial drag and lift forces for coarse grains on rough alluvial beds measured using in-grain accelerometers, *Earth Surface Dynamics*, 8(4) (2020) 1067-1099.
- [42] N.-S. Cheng, A.W.-K. Law, Fluctuations of turbulent bed shear stress, *Journal of engineering mechanics*, 129(1) (2003) 126-130.
- [43] N.-S. Cheng, Influence of shear stress fluctuation on bed particle mobility, *Physics of Fluids*, 18(9) (2006) 096602.
- [44] H. Mouri, A. Hori, M. Takaoka, Large-scale lognormal fluctuations in turbulence velocity fields, *Physics of Fluids*, 21(6) (2009) 065107.
- [45] E. Limpert, W.A. Stahel, M. Abbt, Log-normal distributions across the sciences: keys and clues: on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize log-normal distributions, which can provide deeper insight into variability and probability—normal or log-normal: that is the question, *BioScience*, 51(5) (2001) 341-352.
- [46] W. Shih, P. Diplas, A unified approach to bed load transport description over a wide range of flow conditions via the use of conditional data treatment, *Water Resources Research*, 54(5) (2018) 3490-3509.
- [47] C. Ancey, I. Pascal, Estimating mean bedload transport rates and their uncertainty, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(7) (2020) e2020JF005534.
- [48] H. Farhadi, M. Valyrakis, Exploring particle transport dynamics at a range of flow conditions above threshold, in: *Geophysical Research Abstracts*, 2019.
- [49] T. Pähtz, A.H. Clark, M. Valyrakis, O. Durán, The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments, *Reviews of Geophysics*, 58(1) (2020) e2019RG000679.
- [50] T. Pähtz, O. Durán, Universal friction law at granular solid-gas transition explains scaling of sediment transport load with excess fluid shear stress, *Physical Review Fluids*, 3(10) (2018) 104302.



# Probabilistic description of coarse particle motion above threshold by particle tracking velocimetry method in an experimental study

Hamed Farhadi<sup>a</sup>, Kazem Esmaili<sup>a\*</sup>, Manousos Valyrakis<sup>b</sup>, Abdolreza Zahiri<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Water science and engineering department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>b</sup> School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom

<sup>c</sup> Water and soil engineering faculty, Water engineering department, Gorgan University of agricultural sciences and natural resources, Gorgan, Iran

## ABSTRACT

Sediment motion behavior plays an important role in the sediment and hydraulic engineering, though its physics is still not fully understood. Ignoring the stochastic nature of the sediment transport leads to various equations for bedload transport which are now being challenged due to their results. In this study, the non-suspended particle motion (bedload transport) in different hydraulic conditions was assessed by a particle tracking technique called the Particle Tracking Velocimetry (PTV). The results of the PTV were applied to describe the particle behavior throughout the probability distribution functions. Knowing the particle motion behavior would be a guidance to learn more about the parameter/s governing the particle transport in different sediment transport regimes. After calibrating and validating the frames (resulted from the PTV), the instantaneous particle velocity was measured. Different probability distribution functions were assessed with Kolmogorov-Smirnov criterion (in 5 percent of the level of confidence) to find the best function which fits the collected data (i.e. the particle velocity). Furthermore, an analysis of the governing parameter for particle entrainment in different transport regimes were conducted. It was found that in weak transport regime the particle-bed and in higher transport regime, the particle-flow interrelations were the governing factor which make the particle moves. It was shown that the probability distribution function is Log-Normal for lower particle Reynolds number and on the other hand, in the higher particle Reynolds number, the Normal distribution is best describing the particle velocity. The results of this research also could be applied in similar hydraulic conditions in eco-hydraulic field, specifically macro-plastic movement as bedload in river courses, and Aeolian research.

## KEYWORDS

Bedload, Intermittent particle motion, Particle Tracking Velocimetry, Probability distribution function, Sediment transport.