

بررسی آزمایشگاهی کاربرد ذره‌ی هوشمند در توصیف احتمالاتی دینامیک انتقال رسوب بستر بعد از آستانه

حامد فرهادی (دانشجوی دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

دانشکده‌ی علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مانوسوس والیراکیس (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گلاسگو

عبدالرضا ظهیری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی آب و خاله، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (ص. ۳۳-۵۳، شماره ۲/۲، ص. ۳۸-۲)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۳۳-۵۳، (پژوهشی)

استفاده از حسگرهای برداشت پارامترهای دینامیک ذره می‌تواند به شناخت بیشتر از دینامیک ذرات در حال انتقال منتج شود. در پژوهش حاضر، از یک ذره‌ی کروی پیش‌ساخته (با چگالی‌های متفاوت) که با حسگرهای میکروالکترومکانیکال تجهیز شده است (ذره‌ی هوشمند)، برای برداشت داده‌های شتاب، چرخش و جهت ذره، هنگام انتقال در مجاورت بستر تحت جریان آب در فواصل زمانی بسیار کوتاه ($4/0^\circ$ ثانیه در پژوهش حاضر) استفاده شده است. در این راستا، یک سری آزمایش با دبی‌های مختلف که شرایط انتقال ضعیف (نزدیک آستانه) و انتقال قوی (بعد از آستانه با اعداد رینولدز به نسبت بزرگ‌تر) در آن پوشش داده شده است، انجام شده است. انرژی جنبشی ذره به عنوان انرژی تبادل یافته بین ذره با پیرامون (جریان آب، ارتباط ذره با ذرات بستر) بررسی شده است. بررسی میزان دریافت و هدررفت لحظه‌ی انرژی ذره نشان داد که تغییرات تبادل انرژی با افزایش عدد رینولدز ذره به صورت نمایی کاهش می‌یابد. توابع توزیع احتمالاتی حاکم بر انرژی جنبشی ذره تولید و براساس نتایج مشخص شد که تابع توزیع احتمالاتی ویبول در شرایط آستانه و تابع توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال در شرایط انتقال قوی‌تر و تعادلی، رفتار ذره را بهتر توصیف می‌کند.

farhadi.edu@gmail.com;mailto:shsh70@yahoo.com
esmaili@um.ac.ir
manousos.valyrakis@glasgow.ac.uk
zahiri.areza@gmail.com

واژگان کلیدی: انتقال رسوب، حرکت تصادفی ذرات بستر، دینامیک انتقال، ذره‌ی هوشمند، حسگر.

۱. مقدمه

چه صورتی منتقل می‌شود، فازهای مختلف انتقال رسوب را در بر می‌گیرد. شروع حرکت ذره، سرآغاز تمام فرایندهای انتقال رسوب است که برای مثال اگر ذره در اندازه‌های کوچک‌تر باشد، می‌تواند به صورت معلق و یا بارشسته و در صورت بزرگ بودن نسبی ذرات تشکیل دهنده، به حالت بار بستر انتقال پیدا کند. 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 که منجر به تشکیل یک بار دینامیک^۱ می‌شود. بار بستر از پراهمیت‌ترین انواع انتقال رسوب است؛ در حالی که علی‌رغم مطالعات متعدد، به دلیل پیچیدگی‌های فیزیکی آن، کمترین دانش از آن در دسترس است.^{۲،۵]}

بیش از یک قرن است که روش‌های مطالعه‌ی پدیده‌ی انتقال رسوب، به خصوص بار بستر، برای پاسخ به مسائل پیشامد در طراحی و اجرای سازه‌های هیدرولیکی،

انتقال رسوب باعث تغییرات در سطح سیاره‌ی زمین می‌شود. تغییرات مذکور یا با کنده شدن (فرسایش) یا جاماندن رسوب‌ها (رسوب‌گذاری)، سبب دگرگونی شکل سطح می‌شوند. تغییر مسیر رودخانه‌ها، جابه‌جایی ماسه‌ها، پوشاندن مراکز جمعیتی زیر توده‌های خاک‌های جابه‌جا شده از جمله مثال‌هایی است که اهمیت پدیده‌ی اخیر را در مقیاس بزرگ مشخص می‌کند. هنگامی که یک ذره‌ی بستر قابل فرسایش در معرض جریان یک سیال نیوتنی قرار می‌گیرد (سیال مذکور می‌تواند آب یا هوا باشد)، ذره‌ی بستر اشاره شده توسط نیروهای جریان می‌تواند شروع به حرکت کند.^{۱-۳]} اینکه جریان تا چه مدت توانایی انتقال رسوب (پس از شروع حرکت) را دارد و به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

DOI:10.24200/J30.2022.59457.3050

بیشتر به صورت روابط تجربی و نیمه تجربی ارائه شده است. طرح روابط مذکور و تولید فرمول برای انتقال بار بستر با فرض محیط پیوسته و نگرش قطعی به این پدیده بوده است. به دلیل پیچیدگی مسئله، چندان دور از باور نیست که روابط مطرح شده، توانایی توصیف پدیده‌ی انتقال رسوب، مخصوصاً در شرایطی متفاوت از شرایط تولید آن را نداشته باشند.^[۶] علاوه بر آن، روابط مذکور، حقیقت تصادفی پدیده‌ی انتقال بار بستر که یک فرایند غیرخطی است، را نادیده گرفته‌اند و یک پدیده‌ی غیرخطی نیاز به محیطی متفاوت از بستر قطعی مکانیک پیوسته برای توصیف دارد. یکی از دلایل اساسی که روابط و توصیف‌های اخیر، نتایج ضعیف ارائه کرده‌اند، این است که فیزیکی را که در روش خود از آن بهره گرفته‌اند، کاملاً اکتشافی^۲ است. برای مثال، تنش برشی میانگین سیال که بر بستر اعمال می‌شود یا سرعت برشی (پارامترهایی که در روابط تجربی کلاسیک استفاده شده‌اند)، عملاً هیچ اطلاعاتی از فیزیک پدیده‌ی انتقال رسوب را در بر ندارند.^[۵] شایان ذکر است که پژوهشگران در قرن بیستم (که عمده‌ی روابط تجربی در مدت زمان مذکور ارائه شده است)، دسترسی به روش‌های اندازه‌گیری و منابع علمی امروز نداشتند و این موضوع قابل قبول است که برای توصیف انتقال رسوب از پارامترهای ماکروسکوپی استفاده شده باشد. در عین حال، با شرایط امروز و در دسترس بودن امکانات آزمایشگاهی و علوم روز، بازگشت به نگرش قطعی و استفاده از پارامترهای ماکروسکوپی روابط تجربی چندان منطقی به نظر نمی‌آید و بد اقبالی است که امروزه پژوهشگران از علوم روز به‌خصوص در زمینه‌ی مکانیک آماری و از ابزارهای اندازه‌گیری که توانمندی رهگیری در مقیاس ذره را دارند، در مطالعه‌ی فیزیک پدیده‌ی انتقال رسوب چشم‌پوشی کنند. ذرات رسوب بستر که در یک جریان آشفته منتقل می‌شوند، حرکات نامنظم و غیرخطی را در نتیجه‌ی نیروهایی که به آن‌ها وارد می‌شود، تجربه می‌کنند. به بیان دیگر، رفتار غیرخطی و تصادفی بودن حرکت بار بستر ناشی از اندرکنش ذره با ذرات دیگر و ذره با سیال است.^[۸]

بنابراین، توصیف حرکت و انتقال ذره‌ی بار بستر در طول مسیر رودخانه، یک مسئله‌ی چالش‌برانگیز است و از آنجا که مباحث کاربردی مبتنی بر آن (مانند فرسایش، طراحی پایه‌ی پل‌ها و آبستگي) نیازمند دانش صحیحی از مشخصات حرکت رسوب در شرایط متفاوت است، اهمیت آن را دوچندان کرده است. با این توضیحات می‌توان به اهمیت استفاده از زبان پدیده‌های تصادفی، یعنی احتمالات، پی برد و از آن برای توصیف انتقال رسوب‌های بار بستر (رسوب‌های کف) استفاده کرد. دستاوردهای علمی و وسایل اندازه‌گیری جدید، این فرصت را به‌وجود آورده‌اند که حرکت غیرخطی انتقال رسوب، مجدداً ارزیابی شود. وسایل اندازه‌گیری که بتوانند در مقیاس ذره، حرکت رسوب‌ها را رهگیری و مکانیک و دینامیک آن‌ها را بررسی کنند، در دسترس هستند و با توجه به تصادفی بودن حرکت بار بستر، زبان احتمالاتی برای توصیف آن با در نظر گرفتن شرایط مختلف هیدرولیکی می‌تواند نه فقط فیزیک پدیده‌ی مذکور، بلکه پارامترهای دخیل در انتقال رسوب را مشخص کند. پیشرفت علم به‌خصوص در زمینه‌ی مکانیک‌های ناپیوسته و ریزمقیاس (میکروسکوپی) در کنار روش‌های جدید برای اندازه‌گیری، فرصتی را برای بازگشت و بررسی مجدد مسئله‌ی حرکت رسوب فراهم آورده است، که در پی آن، تمایل جدیدی برای بررسی مجدد حرکت رسوب از دیدگاه تصادفی در بین پژوهشگران ایجاد شده است.

در پژوهش‌هایی که با در نظر گرفتن ذات تصادفی حرکت رسوب انجام شده است، معیارهایی چون تکانه (در مطالعات دیپلاس^۳ و همکاران (۲۰۰۸)،^[۹] سلیک^۴ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۰] و والیراکیس^۵ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] و انرزی (توسط والیراکیس و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۲]) برای شروع حرکت معرفی شده‌اند. در این راستا، پژوهش‌های متعددی برای بررسی رفتار تصادفی حرکت ذرات رسوب به صورت بار

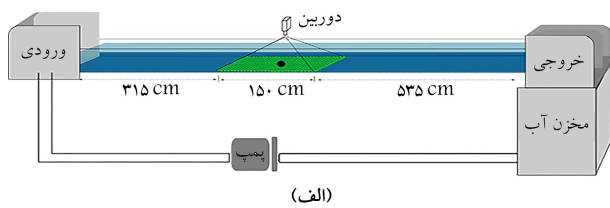
بستر در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شده است (برای مثال، مطالعات زربری^۶ و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] انسی و همین^۷ (۲۰۱۴)،^[۱۴] وو و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] و شیم و دووان^۸ (۲۰۱۷ و ۲۰۱۹)،^[۱۶]).

مطالعات زربری و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] فریبش^۹ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۸] و شیم و دووان (۲۰۱۷)،^[۱۷] تابع توزیع احتمالاتی‌نمایی را بهترین توصیف برای سرعت حرکت ذره در مسیر جریان اعلام کردند که البته مطالعات اخیر در اعداد رینولدز به نسبت کوچک انجام شده بود. در پژوهش‌های دیگری، همچون مطالعات مارتین و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] و انسی و همین (۲۰۱۴)،^[۱۴] 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 مشاهده‌های متفاوت توسط پژوهشگران، وو^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] در پژوهش خود با افزایش زمان مسافت ذرات بار بستر، جابه‌جایی تابع توزیع انتقال از نمایی به یک تابع گوسین ناقص را مشاهده کردند. مطالعات ایشان، نشان‌دهنده‌ی رفتار متفاوت ذره در شرایط مختلف حاکم بر جریان و نحوه‌ی برداشت داده‌ها در رژیم‌های مختلف انتقال رسوب بوده است. در بررسی حرکت رسوب در شرایط آستانه، سلیک^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۹] تابع توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال و والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] تابع توزیع احتمالاتی ویبول^{۱۲} را به عنوان توصیف‌کننده‌ی تکانه‌های ذرات بار بستر پیشنهاد دادند. دلیل تفاوت نتایج نیز محدوده‌ی مشاهده‌ها بود، به نحوی که در پژوهش سلیک و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۹] بر تمام مشاهده‌های حرکت ذرات نزدیک آستانه (با معیار تکانه) و در پژوهش والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] بر حرکت ذرات بعد از آستانه تمرکز شده است.

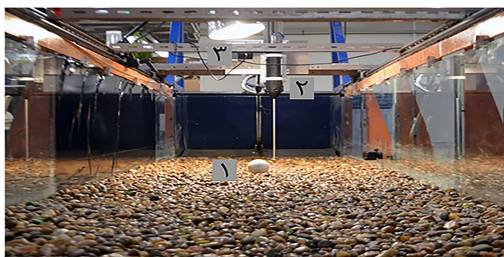
برای برداشت داده‌های دینامیکی ذرات بستر در حین انتقال، می‌توان از حسگرهای دینامیکی (برای مثال شتاب‌سنج و ژيروسکوپ) استفاده کرد. استفاده از ابزار ذکر شده، می‌تواند معایب استفاده از روش‌های دیگر، از جمله برداشت زمانی با فاصله‌های زمانی به نسبت زیاد که بیشتر برای کاربردهای اندازه‌گیری جریان میانگین است، را پوشش دهد. حتی روش‌های ردیابی ذره PTV^{۱۳} نیز قابلیت برداشت داده در ریزمقیاس را ندارد و اصولاً برداشت داده همانند حسگرها که در فواصل زمانی کوتاه انجام می‌شود، ممکن نیست. با توسعه‌ی روش‌های ساخت قطعات الکترونیکی، سیستم میکروالکترومکانیکال (MEMS)^{۱۴}، به عنوان ابزار جدیدی برای اندازه‌گیری در قبال قیمت مناسب محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. قطعات اشاره شده، در اصل یک ماشین مینیاتوری هستند که شامل اجزاء الکترونیکی و مکانیکی هستند. در این قطعات اجزاء مکانیکی (برای مثال، شتاب‌سنج و ژيروسکوپ) و اجزاء الکترونیکی (برای مثال، حافظه‌ی ذخیره و مدار الکترونیکی)، به عنوان یک واحد حسگر الکترونیکی کامل، در اندازه‌ی کوچک، ترکیب شده‌اند. با به‌کارگیری MEMS به همراه یک ذره‌ی ساخته شده، مانند یک ذره‌ی کروی (نماینده‌ی ذرات رسوبی) یا به هر شکل دیگر، مشخصات دینامیکی، هم‌زمان با حرکت و انتقال آن ذره قابل برداشت و اندازه‌گیری خواهد بود. بعضی از پژوهشگران، از حسگرهای MEMS در جهت رهگیری ذرات در هنگام جابه‌جایی بهره گرفته‌اند (آکیلا^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۰] کولارانتا^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۵)،^[۲۱]). هر چند حسگرهای استفاده شده در آزمایش‌های هیدرولیکی در مبحث رسوب مطالعه نشده است. آکیلا و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۰] اولین مجموعه‌ی اندازه‌گیری‌های مربوط به حرکت آغازین بار بستر را ارائه کرده‌اند. پژوهش حاضر، بیشتر در رابطه با حسگر استفاده شده و واسنجی آن بوده است. پژوهش فرنک^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۲] اولین کاربرد استفاده از حسگرها در نوسان‌های جریان مربوط به سواحل و اقیانوس و پژوهش هاردینگ (۲۰۱۴)،^[۲۳] تمرکز بر جریان‌های گل‌آلود بوده است. تا

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های انجام شده.

سری آزمایش	$Q (m^3/s)$	$H (mm)$	$U (m/s)$	Re	$\tau_c (N/m^2)$	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	۲۹۹۸۴۱	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



(الف)



(ب)

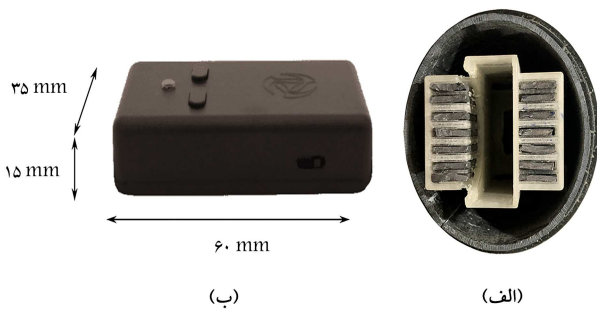
شکل ۱. الف) شکل شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی و ب) نمایی از موقعیت ذره مورد آزمایش (۱)، دستگاه ADV (۲) و دوربین فیلمبرداری از حرکت ذره (۳).

۲. مواد و روش

در پژوهش حاضر، به منظور تأمین شرایط مرزی کنترل شده و امکان برداشت اطلاعات صحیح یک مدل آزمایشگاهی برای رسیدن به اهداف پژوهش فراهم شده است. یک کانال با عرض ۹۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر در آزمایشگاه مهندسی آب دانشگاه گلنگو (شکل ۱) برای انجام آزمایش‌های مربوط به پژوهش حاضر فراهم شده است. در انتهای فلوم برای تنظیم عمق جریان از یک دریچه استفاده شده است. هر آزمایش با یک عمق ثابت آب در مخزن آغاز شد تا شرایط یکسانی برای همه سری آزمایش‌ها، که شامل ۱۳ بسامد پمپ (نماینده‌ی ۱۳ شدت جریان مختلف) است، برقرار باشد. شرایط هیدرولیکی و دیگر مشخصات آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. کانال مستطیلی با عرض ۹۰ cm، ظرفیت عبور جریان آب با ۷۰ لیتر بر ثانیه در عمق ۴۱ cm را دارد. جنس بستر توسط مهره‌های شیشه‌ی کروی با قطر ۱۵ mm جهت ایجاد زبری مشخص در مسیر جریان در طول ۱۵۰ cm (که محدوده‌ی

پیش از سال ۲۰۱۵، پژوهش‌های مربوط به استفاده از حسگرها در اندازه‌گیری مشخصه‌های مکانیکی و دینامیکی جریان و رسوب بیشتر مربوط به معرفی، واسنجی و مباحث الکتریکی حسگرها بوده است.^[۲۴] بعد از آن پژوهشگران از روش اخیر برای بهره‌گیری در برداشت دینامیک ذرات رسوبی (برای مثال والیراکیس و همکاران (۲۰۱۶)^[۲۵]، فرهادی و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۶]، فرهادی و والیراکیس (۲۰۲۱)^[۲۷] و العبیدی و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۸]، ارائه‌ی مفهوم سنگ هوشمند برای ارزیابی آبستنگی پایه‌ی پل (رادچنکو (۲۰۱۷)^[۲۹]، رهگیری و بررسی فیزیک زمین لغزش (ذست و همکاران (۲۰۲۰)^[۳۰]، دینی و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۱]، حرکت تته‌های درخت در رودخانه اسپرایترز^{۱۸} (۲۰۱۹)^[۳۲] و کاربردهای اکو - مورفولوژیکی (اکرلی و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۳]) بهره جستند. تفاوت پژوهش‌ها، بیشتر در نحوه‌ی ارائه‌ی جزئیات، محدوده‌ی هیدرولیکی مطالعه شده و حسگرهای استفاده شده بوده است.

در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از یک ذره‌ی هوشمند (ذره‌ی پیش‌ساخته که مجهز به حسگرهای MEMS)، داده‌های لازم برای توصیف آماری دینامیک ذره بعد از آستانه با چگالی‌های متفاوت، در مسیر یک فلوم آزمایشگاهی با زبری مشخص تحت شدت جریان‌های متفاوت فراهم شود. با روش‌های تصویربرداری، می‌توان سرعت لحظه‌ی ذره‌ی هوشمند، را محاسبه و در نهایت تابع توزیع احتمالاتی مناسب که بیانگر رفتار سرعت ذره در آن شرایط باشد، را با معیارهای سنسجس آماری به دست آورد. با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت برای ذره‌ی مورد آزمایش، می‌توان شرایط رژیم‌های متفاوت انتقال رسوب را ارزیابی کرد. با استخراج داده‌های ذره‌ی هوشمند، انرژی جنبشی ذره ارزیابی شده است. نتایج پژوهش حاضر به دلیل در نظر گرفتن دامنه‌ی بزرگ‌تری از نمونه‌های مربوط به رژیم‌های انتقال رسوب (با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت ذرات و اعداد رینولدز ذره $Re^* = (u^*d)/v$) که در آن u^* سرعت برشی (m/s)، d قطر ذره (m) و v لزجت دینامیکی سیال (m^2/s) است، 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. دلایل مشاهده‌ی توابع گوناگون در توصیف انتقال رسوب، تحلیل و تغییر احتمالی آن با تغییر در رژیم انتقال رسوب بررسی شده است.



شکل ۲. الف) برش از نیمه ذره کروی پیش ساخته با محفظه حسگر که حاوی قسمت‌های سربی برای تنظیم چگالی ذره را دارد و ب) ابعاد محفظه حسگرهای MEMS که حاوی شتاب سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس سنس می‌باشد.

کوچک قابل استفاده برای اندازه‌گیری لحظه‌ی پارامترهای دینامیکی هستند. داده‌های حسگرهای MEMS توسط یک ریزکنترل‌گر^{۲۱} برداشت و در حافظه‌ی خارجی ذخیره می‌شوند. حافظه‌ی خارجی ظرفیت کافی در یک فضای محدود را فراهم می‌کند که شامل یک کارت حافظه (SD) است که به راحتی قابل استفاده است.^[۲۶] هر حسگر یک ولتاژ آنالوگ متناسب با شتاب و یا چرخش محاسبه شده تولید می‌کند. ضرورت دارد که داده‌های خروجی به دلیل نویز (سیگنال اضافی) و یا اختلال در اندازه‌گیری توسط روش‌های پردازش سیگنال ارزیابی شوند.

در پژوهش حاضر، برداشت داده‌های دینامیکی در بسامد ۲۵۰ هرتز انجام شده است. بسامدهای بالاتر، علیرغم دقت بالای برداشت داده، تولید خطای بیشتری نیز دارند و بسامد کمتر از آن نیز ماهیت برداشت لحظه‌ی را دچار چالش می‌کند. حسگرهای استفاده شده در آزمایش‌های پژوهش حاضر از حسگرهای Yost Labs ۳ – Space data – logger در ابعاد ۳۵×۶۰×۱۵ میلی‌متر با وزن ۲۸ گرم بوده است (شکل ۲). شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس استفاده شده در پژوهش حاضر، قابلیت برداشت داده در محدوده‌ی مقیاس $\pm 6g$ ، $\pm 2000^\circ/sec$ و $\pm 1/3 G uass$ را دارند. داده‌های خروجی از حسگر (خوانش‌های شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس برای سه محور مختصاتی) پس از انجام یک سری اقدام‌های پس‌پردازشی قابل استفاده خواهند بود. تمام روش‌های استفاده شده در فاز پس‌پردازش در محیط متلب به صورت آفلاین انجام شده است. در جدول ۱، Q شدت جریان، H ارتفاع آب، U سرعت جریان، Re عدد رینولدز جریان، τ تنش برشی بستر و Re^* عدد رینولدز ذره هستند.

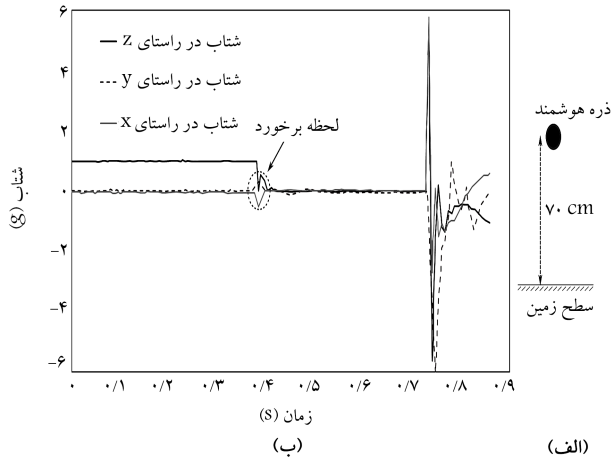
علاوه بر فیلترهایی که برای جدا کردن سیگنال اضافی از اطلاعات واقعی قابل استفاده هستند، سیستم مختصات داده‌های برداشت شده باید برای استفاده به سیستم مختصات مرجع تبدیل شوند. به عبارت دیگر، داده‌های استخراج شده از حسگرها به دلیل حرکت در جریان آب در سیستم مختصات بدنه هستند و قالب لاگرانژی دارند، که باید برای استفاده به مختصات مرجع در قالب اویلری تبدیل شوند. تبدیل سیستم لاگرانژی به اویلری، توسط روش‌هایی همچون ماتریس‌های کوسینوس، زوایای اویلر و چهارگان‌ها (کواترنیون‌ها) قابل انجام است که در پژوهش حاضر از روش زوایای اویلر استفاده شده است. ماتریس کسینوس^{۲۲} ماتریس انتقال از یک سیستم مختصات اولیه (A) به سیستم مختصات هدف (B) است. با این تعریف، ماتریس انتقال بردارهای محور مختصات A به بردارهای محور مختصات B (یعنی ماتریس کسینوس DCM) به صورت رابطه‌ی ۱ است. که در آن، θ ، φ و ψ زوایای اویلر (زوایای تبدیل) هستند.

مورد آزمایش است) در کانال تعبیه شد. برای اطمینان از عدم حرکت ذرات کف کانال که به عنوان ایجاد زبری تعبیه شده‌اند، چیدمان و آرایش به صورت چندضلعی انتخاب شده است. آرایش مذکور و زبری جهت ثابت بودن زبری جریان و جلوگیری از بروز عدم قطعیت‌های بیشتر بوده است. از ذره‌ی کروی (این ذره‌ی کروی، مجهز به حسگرهای هوشمند بود که در بخش ۱.۲ در مورد آن توضیح داده شده است) با چگالی متفاوت ($\rho^1 = 1380/23 kg/m^3$ ، $\rho^2 = 1500/60 kg/m^3$ ، $\rho^3 = 1619/76 kg/m^3$ ، $\rho^4 = 1997/28 kg/m^3$) برای تحلیل حرکت رسوب استفاده شده است. مقادیر اخیر از یک طرف شرایط انتقال رسوب در نزدیک و بعد از آستانه را بدون نیاز به ایجاد سرعت‌های زیاد مهیا کرده‌اند و از طرفی دیگر، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر در حرکت آلاینده‌های پلاستیکی که با وزن کمتر از رسوب‌های کوارتزی ($\rho = 2650 kg/m^3$) به صورت غلطش و چرخش نزدیک بستر حرکت می‌کنند، بهره گرفت. شرایط آزمایش‌ها به گونه‌ی بود که حرکت ذرات در رژیم انتقال ضعیف (شرایط نزدیک و بعد از آستانه) و رژیم انتقال قوی‌تر قرار داشته باشد. در هر آزمایش مقدار دبی به صورت تدریجی افزایش پیدا کرده است تا ذره در شرایط انتقال قرار گیرد، هر چند معیار دقیقی برای تشخیص شرایط آستانه وجود ندارد،^[۲۴] و آن هم پدیده‌ی تصادفی و آماری است.^[۲۵] در این راستا، اولین سری آزمایش با شرایط هیدرولیکی تعریف شده در جدول ۱ (سری آزمایش ۱) هیچ‌گونه حرکتی در ذرات در همه‌ی مقادیر چگالی برای ذرات مشاهده نشد و به عنوان شرایط آستانه (برای آزمایش‌های کوچک‌ترین ذره، یعنی ρ) ثبت شده است. برای اطمینان از یکنواخت بودن جریان، انتهای فلوم مجهز به یک دریچه‌ی قابل تنظیم برای ایجاد عمق ثابت به ازاها هر بسامد 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 بسامد پمپ (توسط دستگاه اینورتر^{۱۹}) تولید شد. سرعت ورودی جریان توسط دستگاه دبی‌سنس که روی فلوم نصب شده بود، اندازه‌گیری و با توجه به اینکه آب ورودی به کانال توسط یک لوله‌ی ۶ اینچی (در ابتدای کانال) انجام می‌شد، دبی ورودی تولید شده توسط پمپ با بسامد مشخص در هر آزمایش کالیبره شد. همچنین به ازاها هر بسامد (دبی) با اندازه‌گیری مدرج روی تانک، تغییرات عمق آب با افزایش بسامد قرائت و ضبط شد. سرعت جریان در هر آزمایش با دستگاه سرعت‌سنس ADV^{۲۰} سه‌بعدی (که نحوه‌ی نصب آن در شکل ۱ ب نشان داده شده است) اندازه‌گیری و سرعت متوسط جریان با مقادیر قرائت شده از دبی‌سنس به دست آمده با در نظر گرفتن لوله‌ی ۶ اینچ مقایسه و صحت‌سنجی شد. قرائت‌ها توسط دستگاه سرعت‌سنس (ADV) در مدت زمان ۴ دقیقه (برای اطمینان از برداشت داده‌ی کافی) با بسامد نمونه‌برداری ۲۵ هرتز انجام شد. برای محاسبه‌ی تنش برشی با برداشت سرعت جریان، از تراز ۱۰ تا ۸۰ میلی‌متری بالای ذرات بستر (محاسبات به دلیل شرایط بستر زبر، با در نظر گرفتن خط فرضی دیوار تئوری انجام شده است) توسط دستگاه ADV سه‌بعدی و با محاسبه‌ی سرعت برشی ($u^*/m/s$) که از برازش خطی نمودار نیمه‌لگاریتمی عمق - سرعت متوسط به دست آمده است، استفاده شد $\tau = u^* \rho$ که در آن ρ چگالی ذره (kg/m^3) و τ تنش برشی (N/m^2) است.

۱.۲. ذره‌ی هوشمند

حسگرهای MEMS عموماً شامل یک شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس سه‌بعدی هستند که به صورت ترکیبی در قالب یک قطعه‌ی الکترونیکی در ابعاد

$$DCM = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$



شکل ۳. الف) شمای آزمایش سقوط آزاد ب) شتاب لحظه‌یی اصلاح شده‌ی آزمایش مرتبه دوم سقوط آزاد ذره‌ی هوشمند از ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر.

که در رابطه با حسگر شتاب‌سنج از وضعیت پرتاب آزاد بهره برده است. اگر حسگر بدون چرخش از یک ارتفاع رها شود، شتاب قائم آن همان شتاب ثقل خواهد بود و مولفه‌های شتاب در راستاهای دیگر همدیگر را خنثی می‌کنند. متوسط فاصله (h) را می‌توان از قانون حرکت خطی نیوتن (مطابق رابطه‌ی ۳) تخمین زد:

$$h_N = h + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (3)$$

که در آن، h_N ، v_0 ، t ارتفاع نهایی، سرعت ابتدایی و زمان مسافت بین h و h_N است. با ننگ داشتن حسگر (ذره‌ی هوشمند که در قسمت بعد نحوه‌ی آماده‌سازی آن توضیح داده شده است شکل ۳ الف)، ذره از ارتفاع $h = 70 \text{ cm}$ آزاد و به دلیل اینکه سرعت اولیه ندارد، رابطه به صورت $h = \frac{1}{2} g t^2$ خواهد بود. این آزمایش سه بار انجام شده و مقادیر متوسط ارتفاع با استفاده از داده‌های خروجی از حسگر ۷۱ سانتی‌متر به دست آمده است (زمان سقوط در آزمایش دوم که در شکل ۳ ب مشاهده می‌شود، $t = 0.375 \text{ s}$ است که با استفاده از رابطه‌ی اخیر $h = 0.699 \text{ m}$ محاسبه شده است). شتاب‌سنج به صورت عمود رها شد، به این دلیل که تغییرات در جهت‌گیری در طول سقوط آزاد کمترین باشد. در عین حال مقدار کمی تغییر جهت در آغاز سقوط آزاد منجر به ایجاد خطا در محاسبات شده است (۱/۷٪ خطا). برای واسنجی ژيروسکوپ از رها سازی ذره‌ی هوشمند بر یک سطح شیب‌دار استفاده شده است (شکل ۴). در این نوع آزمایش انرژی جنبشی ذره با انرژی پتانسیل (mgh) که در آن h سطح شیب‌دار است)، معادل است (رابطه‌ی ۴)، استفاده شده است.

$$mgh = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (4)$$

که در آن، v ، m ، ω و $I = \frac{2}{5} m r^2$ به ترتیب: جرم، سرعت خطی، سرعت زاویه‌یی ذره و ممان اینرسی ذره‌ی هوشمند (کروی) با شعاع $r = 0.375 \text{ m}$ است. با در نظر گرفتن چرخش محض (یعنی $v = r\omega$) رابطه‌ی ۴ به صورت

۲.۲. نحوه‌ی آماده‌سازی ذره‌ی هوشمند

ذره‌ی هوشمند، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ذره‌یی است که به حسگرهای MEMS که برای برداشت خصوصیات هیدرودینامیکی ذره هنگام انتقال در جریان آب مناسب هستند، مجهز است. ذره‌ی هوشمند، یک ذره‌ی کروی توخالی است که توسط دستگاه پرینتر سه‌بعدی و رزین بی‌رنگ ساخته شده است. شکل نهایی ذره‌ی کروی بعد از رنگ‌آمیزی و آب‌بندی برای استفاده آماده شده است. حسگر MEMS در ذره‌ی مذکور تعبیه شده است. ساختمان داخلی ذره‌ی هوشمند به شکلی تهیه شده است که حسگر داخل آن قرار گیرد (شکل ۲ الف). همچنین برای تغییر چگالی ذره از تکه‌های سربی استفاده شده است که برای چگالی دلخواه تکه‌های سربی داخل محفظه‌های مخصوص خود قرار گیرد. جنس ذره‌ی هوشمند از ماده‌ی پلاستیکی با سختی مناسب به نحوی است که در مقابل نیروهای وارده بر آن مقاومت داشته باشد. خشک بودن داخل محفظه‌ی ذره‌ی هوشمند (آب‌بندی مناسب) و وارد نشدن هیچ‌گونه فشار به حسگرها بسیار حائز اهمیت است، که در همین راستا آب‌بندی توسط آب‌بند توسط اورینگ و محفظه‌ی قرارگیری حسگر کاملاً درون محفظه قفل می‌شود و هیچ‌گونه نوسانی در هنگام حرکت متوجه حسگر نمی‌شود. حسگر باید در وسط ذره و با یک جهت از پیش تعیین شده‌ی مشخص در محفظه قرار گیرد که هم توزیع یکنواخت در جرم ذره و هم پیش‌فرض واقع شدن نیروها در مرکز ذره‌ی کروی تحقق یابد.

ذره‌ی هوشمند به صورت برش از نیمه (شکل ۲ الف) توسط دستگاه پرینتر سه‌بعدی از جنس پلاستیک سخت (پلاستیک ABS) تهیه شده است. محفظه‌ی تغییر چگالی ذره نیز توسط پرینتر سه‌بعدی تهیه شده است، که با در نظر گرفتن اسلات‌هایی برای افزایش چگالی بتوان به نسبت‌های دلخواه چگالی در آزمایش‌های پژوهش حاضر دست یافت. برای استفاده‌ی کاربردی از حسگر شتاب‌سنج در مطالعات، به دلیل خروجی داده‌های حسگر شتاب‌سنج در مختصات بدنه (سیستم در حال حرکت)، علاوه بر تبدیل آن به محور مختصات ثابت، ضروری است واسنجی انجام و داده‌ها راستی‌آزمایی شوند. برای شتاب‌سنج، ثقل موضعی، زمانی که حسگر در حالت ایستاست، باید از داده‌ها حذف شود (رابطه‌ی ۲):

$$a_E(t) = DCM(t) a_b(t) - g_E \quad (2)$$

که در آن $a_E(t)$ ، $a_b(t)$ ، $DCM(t)$ و g_E به ترتیب شتاب خطی (m/s^2) که به مختصات اولبری منتقل شده است، شتاب خروجی حسگر (m/s^2)، ماتریس کسینوس هادی (ماتریس انتقال به مختصات اولبری)، و ثابت شتاب ثقل

$$g_E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{bmatrix} m/s^2 \text{ است.}$$

۳.۲. واسنجی حسگر MEMS

واسنجی حسگر با استفاده از قوانین ساده‌ی فیزیکی انجام شده است، بدین صورت

(۱) است. متوسط زمان دریافت و هدررفت انرژی ذره در آزمایش‌های پژوهش حاضر به دست آمده و نمودار تغییرات آن در مقابل عدد رینولدز ذره رسم شده است (شکل ۷). مطابق شکل ۷، متوسط زمان دریافت و هدررفت انرژی، با افزایش عدد رینولدز ذره به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. کاهش مقادیر با روند نمایی، نشان دهنده‌ی کم‌رنگ شدن تأثیر عدد رینولدز ذره‌ی بالا در زمان تبادل انرژی ذره با محیط پیرامون است (بستر و سیال) است. همچنین با افزایش عدد رینولدز ذره، زمان تبادل انرژی (دریافت و هدررفت انرژی) در هر چهار چگالی ذره‌ی استفاده شده به یک همگرایی رسیده است که نشان می‌دهد کاهش تأثیر چگالی ذره در مدت زمان تبادل انرژی در رژیم‌های تعادلی انتقال است. در شرایط تعادلی رژیم انتقال، ذره مدت زمان بیشتری در معرض نیروهای سیال قرار می‌گیرد، [۳۷] و علی‌رغم داشتن مقادیر بیشتر انرژی (شکل ۸)، نوسان مقادیر آن در مدت زمان‌های کوتاه‌تر انجام می‌شود که نشان می‌دهد بسامد بیشتر در تبادل انرژی ذره است. در اعداد رینولدز پایین، برخلاف شرایط با مقادیر بزرگ‌تر (شرایط تعادلی)، زمان تبادل انرژی طولانی‌تری بین ذره و پیرامون اتفاق افتاده است، که نشان‌دهنده‌ی نیاز بیشتر ذره برای حفظ شرایط انتقال است؛ اما در شرایط تعادلی (براساس شواهد)، این نیاز برای انتقال ذره کاهش پیدا کرده و ذره در یک شرایط به نسبت تعادلی در جریان آب توسط نیروهای وارده بر آن کشیده شده است که نشانگر تغییرات تأثیر ارتباط ذره - بستر و ذره - سیال در شرایط مختلف جریان (رژیم انتقال رسوب) در انتقال ذره است. در رژیم‌های انتقال ضعیف، مقادیر پیک مثبت (یعنی مقادیر انرژی دریافتی) و مقادیر پیک منفی (یعنی مقادیر انرژی از دست داده شده) بیشتر از رژیم‌های به نسبت قوی‌تر انتقال است (شکل ۸) که این نیز شواهد زمان دریافت انرژی (شکل ۷) را در دو شرط مذکور تصدیق می‌کند.

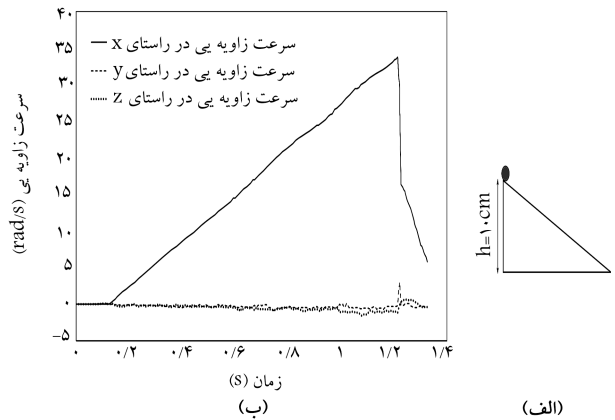
۲.۳. رفتار احتمالاتی انرژی جنبشی ذره

توابع توزیع احتمالاتی تجربی متعددی بر هیستوگرام (توزیع) مشاهداتی مربوط به انرژی جنبشی ذره برازش داده شد و از این بین توابع لوگ - نرمال، و بیول و گاما، به دلیل عملکرد بهتر و مشاهده‌های برخی پژوهشگران پیشین مقایسه شدند. با استفاده از معیار کولموگوروف - اسمیرنوف ($D_{m,n}$ ، رابطه‌ی ۶) و معیار اندرسون دارلینگ (AD در رابطه‌ی ۷)، بهترین تابع توزیع احتمالاتی برازش شده بر داده‌های مشاهداتی انتخاب شد.

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

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \cdot [\ln F(x) + \ln(1 - G(x))] \quad (7)$$

که در آن، $F_m(x)$ تابع توزیع احتمالاتی تجمعی مشاهداتی با تعداد m نمونه و $G_n(x)$ تابع توزیع احتمالاتی تجمعی محاسبه شده با تعداد n نمونه است. در جدول ۲، نتایج آماری معیارهای کولموگوروف - اسمیرنوف (رابطه‌ی ۶) و اندرسون دارلینگ (رابطه‌ی ۷) برای شرایط انتقال ضعیف (نزدیک و بعد از آستانه با اعداد رینولدز به نسبت پایین‌تر؛ در پژوهش حاضر: سری آزمایش ۲ با توجه به جدول ۱) و شرایط انتقال تعادلی (بعد از آستانه و با اعداد رینولدز به نسبت بالاتر؛ در پژوهش حاضر: سری آزمایش ۱۳ با توجه به جدول ۱)، برای توابع توزیع احتمالاتی و بیول و لوگ نرمال ارائه شده است (به ترتیب $D_{m,n}/LN$ و $D_{m,n}/W$ نتایج معیار آماری کولموگوروف - اسمیرنوف برای توابع و بیول و لوگ - نرمال و AD_W و AD_{LN} نتایج معیار آماری اندرسون دارلینگ برای توابع و بیول و لوگ - نرمال هستند). نتایج مذکور



شکل ۴. الف) شمای آزمایش انجام شده برای واسنجی ژيروسکوپ (ب) نمودار سرعت زاویه‌ی برای آزمایش مرتبه سوم چرخش ذره هوشمند بر سطح شیب‌دار با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر.

قابل استفاده است. آزمایش مذکور ۳ مرتبه انجام و سرعت زاویه‌ی متوسط آزمایش‌های اخیر برداشت شده از حسگر ژيروسکوپ برابر با $31/82 \text{ rad/s}$ شده است. خطای متوسط نتایج در مقایسه با سرعت زاویه‌ی محاسبه شده از طریق رابطه‌ی ۴ ($31/60 \text{ rad/s}$)، ۷٪ درصد به دست آمده است. این خطا به دلیل در نظر نگرفتن هدررفت انرژی در مسیر چرخش ذره روی سطح شیب‌دار قابل قبول است.

۳. نتایج

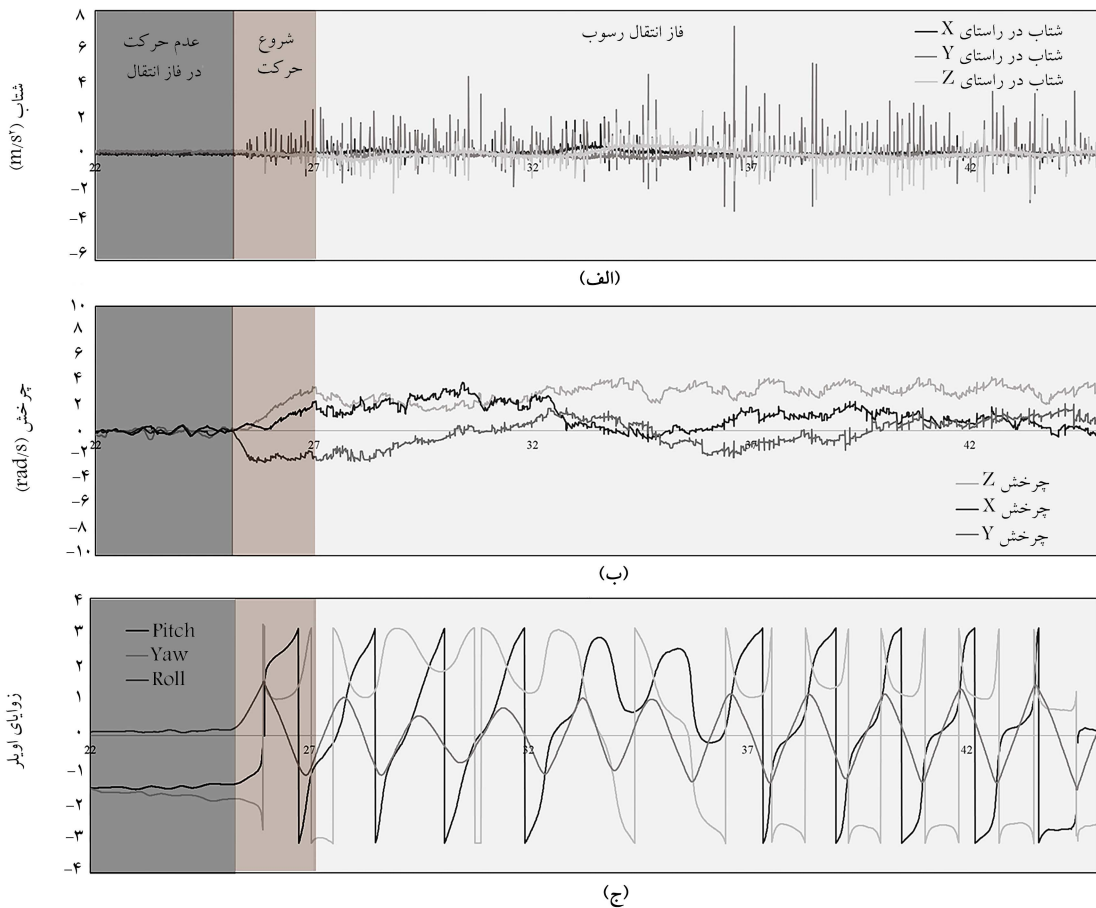
داده‌های خام برداشت شده از ذره‌ی هوشمند (حسگر MEMS) پس از اصلاحات و تبدیل مختصات (از مختصات بدنه به مختصات اولبری) با استفاده از روابط ۱ و ۲، به صورت سری زمانی، رسم و آماده‌ی استفاده برای مطالعه‌ی دینامیک ذره شده است (شکل ۵).

۱.۳. تبادل انرژی ذره با محیط

برای تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های ذره‌ی هوشمند، انرژی جنبشی لحظه‌ی ذره (رابطه‌ی ۵)، $k(t)$ ، زول به عنوان انرژی تبادل یافته بین ذره و بستر در جریان آب (با نرخ‌های جریان مختلف) بررسی شده است.

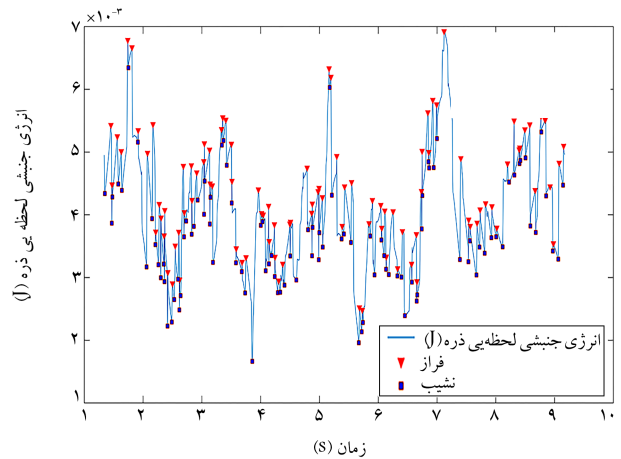
$$k(t) = \frac{1}{2}mv(t)^2 + \frac{1}{2}mw(t)^2 \quad (5)$$

که در آن، m ، $v(t)$ و $w(t)$ به ترتیب جرم (kg)، سرعت خطی (m/s) و سرعت زاویه‌ی ذره (rad/s) است. سرعت خطی ذره با استفاده از رهگیری ذره توسط روش‌های تصویربرداری PTV تخمین سرعت با مقایسه‌ی موقعیت ذره در تصاویر گرفته شده در قبل و بعد) و سرعت زاویه‌ی از حسگر ژيروسکوپ استفاده شده است. برای هر آزمایش (رجوع شود به جدول ۱)، فراز و نشیب‌های سیگنال‌های انرژی جنبشی به عنوان پیک مثبت و منفی ذره دریافت شده است. بدین صورت که انتقال از یک پیک منفی (نشیب) به پیک مثبت (فراز)، نشان‌دهنده‌ی دریافت انرژی و انتقال از یک پیک مثبت به پیک منفی، نشان‌دهنده‌ی هدررفت انرژی ذره در مسیر جریان است. بدین‌وسیله زمان و مقدار انرژی به دست آمده/هدررفته قابل محاسبه است. شکل ۶، نمونه‌ی از سیگنال انرژی جنبشی ذره در آزمایش سری ۱۰ (جدول



شکل ۵. سری زمانی داده‌های خروجی از ذره‌ی هوشمند؛ شتاب اصلاح شده و تبدیل شده به مختصات اویلری توسط رابطه‌ی ۲ در راستای مختصات x, y, z .

(متناظر با اعداد رینولدز ذره به تناسب کوچک‌تر) به رژیم‌های انتقال تعادلی (متناظر با اعداد رینولدز ذره به تناسب بزرگ‌تر) دستخوش تغییر در شکل و نوع تابع توزیع احتمالاتی شده است. با افزایش عدد رینولدز ذره، شکل تابع پهن‌تر شده (به دلیل کم شدن احتمال وقوع انرژی‌های با مقادیر بیشینه) و در تغییر رژیم انتقال از ضعیف به تعادلی از تابع توزیع ویبول به لوگ - نرمال تغییر ماهیت داده است که نشانگر آستانه‌ی مشخص برای تغییر رژیم انتقال است. در همپوشانی اخیر، دامنه‌ی تابع توزیع، اهمیت دارد و نه بدنه‌ی تابع توزیع. به همان تناسب که ظرفیت انتقال با بزرگ شدن نیروهای محرک افزایش پیدا می‌کند، همپوشانی مذکور بیشتر شده و بدنه‌ی تابع توزیع احتمالاتی نیروهای محرک با تابع توزیع احتمالاتی نیروهای مقاوم برخورد کرده است. بنابراین، از این منظر نیز تابع ویبول که برای توصیف پدیده‌های حدی مناسب است، به دلیل اهمیت دنباله‌ی تابع آن، توصیف‌کننده‌ی منطقی برای وضعیت رژیم انتقال ضعیف است. همچنین دلیل آنکه انرژی جنبشی و تکانه از توابع توزیع یکسانی پیروی می‌کنند، وابسته بودن دو پارامتر مذکور به مجذور سرعت ذره (u^2) است.



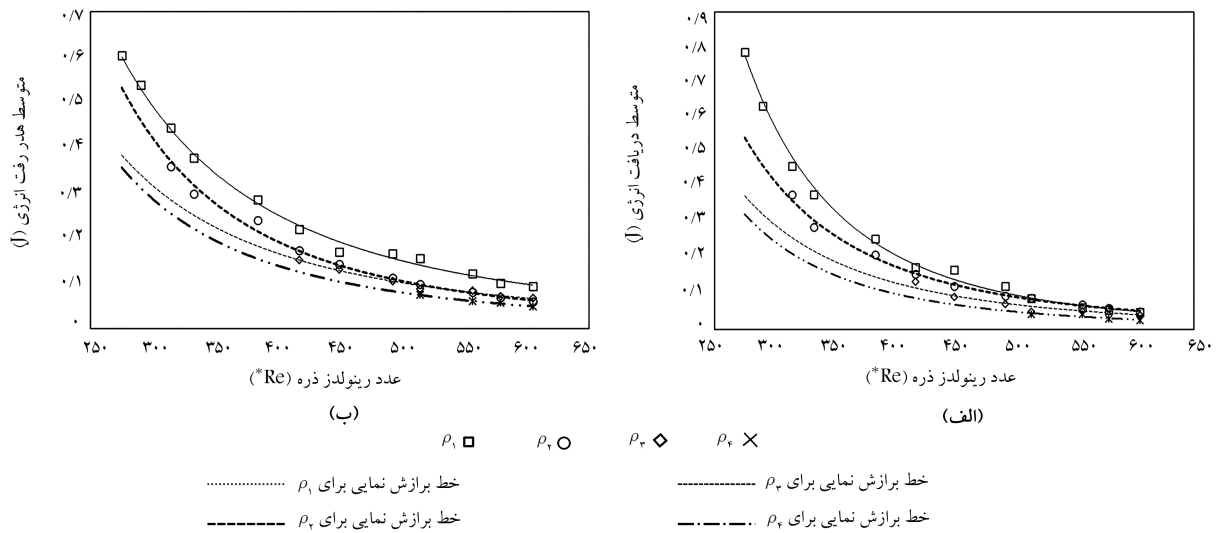
شکل ۶. نمونه‌ی سیگنال انرژی جنبشی ذره (اصلاح شده) به همراه مشخص شدن پیک‌های مثبت (فراز) و منفی (نشیب) انرژی (مربوط به سری ۱۰ آزمایش‌ها).

در سطح اطمینان ۰.۵٪، بهترین توابع توزیع احتمالاتی توصیف‌کننده‌ی انرژی جنبشی لحظه‌ی ذره در شرایط ذکر شده است.

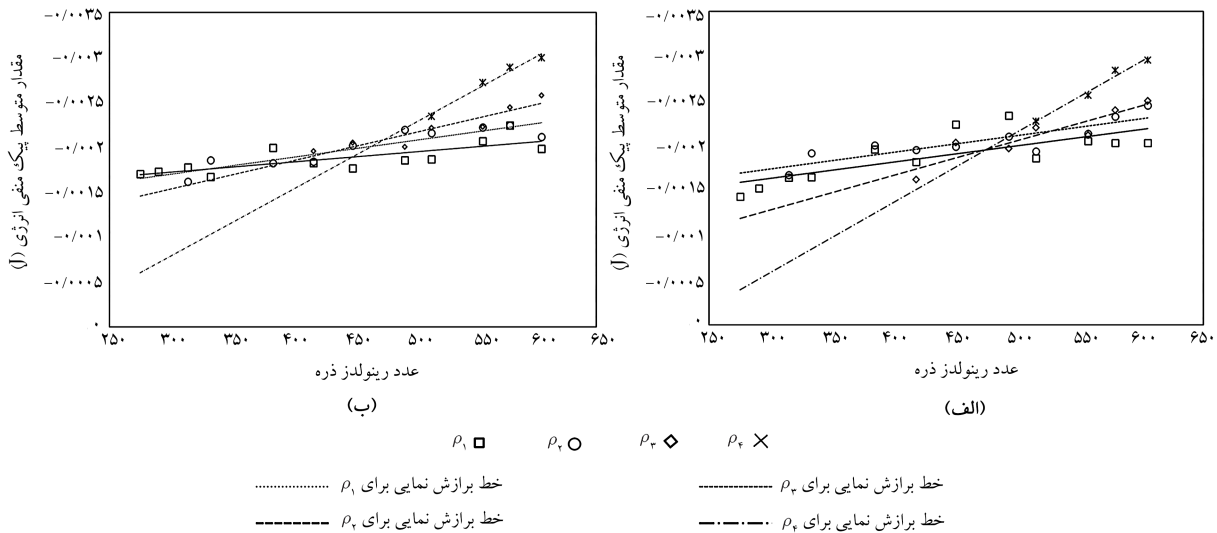
در شکل ۹، توابع توزیع احتمالاتی تجربی و مشاهداتی انرژی جنبشی ذره با چگالی ρ_1 در مقابل یکدیگر برای شرایط ضعیف (شکل ۹ الف) و تعادلی (شکل ۹ ب) مشاهده می‌شود که مطابق آن تابع توزیع احتمالاتی در گذار از رژیم‌های انتقال ضعیف

۴. نتیجه‌گیری

پیشرفت در نحوه‌ی اندازه‌گیری آزمایشگاهی در مقیاس‌های کوچک‌تر، شرایط را برای مطالعه و پژوهش مجدد در فیزیک پدیده‌های انتقال ذره‌های رسوبی بستر فراهم کرده است. از آنجایی که حرکت بار بستر، یک پدیده‌ی خطی نیست و عوامل دخیل



شکل ۷. الف) متوسط دریافت و ب) هدررفت انرژی با تغییر عدد رینولدز با چگالی‌های ذره ρ_1 ، ρ_2 ، ρ_3 و ρ_4 .



شکل ۸. تغییرات متوسط مقدار انرژی الف) دریافت شده و ب) هدررفت، متناسب با عدد رینولدز برای ذره با چگالی‌های ذره ρ_1 ، ρ_2 ، ρ_3 و ρ_4 .

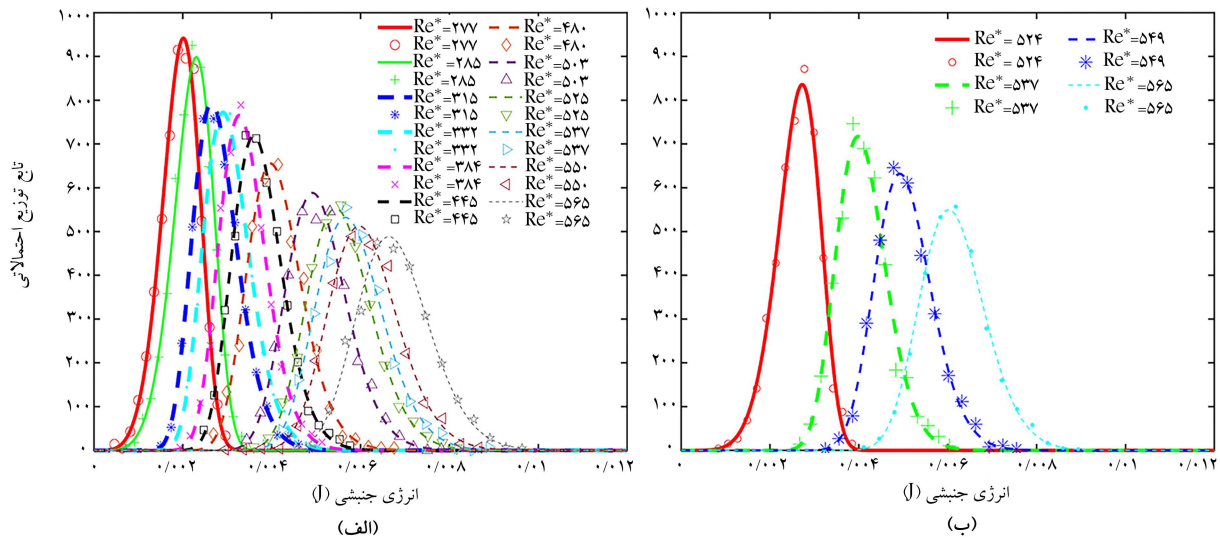
جدول ۲. نتایج معیار آماری کولهوگروف - اسمیرنوف و اندرسون دارلینگ در شرایط ضعیف و تعادلی انتقال (بعد از آستانه) برای ذره با چگالی‌های ρ_1 ، ρ_2 ، ρ_3 و ρ_4 .

ρ_4		ρ_3		ρ_2		ρ_1		شرایط انتقال
$D_{m,n}/w = 0/0.342$	$D_{m,n}/w = 0/0.265$	$D_{m,n}/w = 0/0.274$	$D_{m,n}/w = 0/0.228$	ضعیف				
$AD_w = 0/0.537$	$AD_w = 0/0.424$	$AD_w = 0/0.452$	$AD_w = 0/0.402$					
$D_{m,n}/LN = 0/0.205$	$D_{m,n}/LN = 0/0.241$	$D_{m,n}/LN = 0/0.308$	$D_{m,n}/LN = 0/0.312$	تعادلی				
$AD_{LN} = 0/0.403$	$AD_{LN} = 0/0.426$	$AD_{LN} = 0/0.462$	$AD_{LN} = 0/0.484$					

برداشت شود. داده‌های خروجی از حسگر هوشمند، بعد از یک سری واسنجی و راستی‌آزمایی، اصلاح و تبدیل مختصات قابل بهره‌برداری بوده است (اصلاح شتاب نقل و تبدیل از مختصات بدنه به مختصات مرجع). در ادامه، نتایج پژوهش حاضر به صورت فهرست ارائه شده است:

• استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی نوین، از جمله حسگرهای MEMS (اینجا

در آن در شرایط مختلف رژیم انتقال متفاوت و غیرخطی است، می‌توان با استفاده از حسگرهای هوشمند، پارامترهای دینامیکی ذره بستر را در حالت انتقال به صورت لحظه‌یی در فواصل زمانی کوتاه برداشت کرد. در پژوهش حاضر سعی شده است که با در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی در حالت رژیم انتقال ضعیف تا رژیم انتقال تعادلی و قوی (با تغییر در عدد رینولدز ذره)، تا پارامترهای دینامیک انتقال یک ذره (که حاوی حسگرهای شتاب‌سنج،ژیروسکوپ و مغناطیس‌سنج سه‌بعدی است)



شکل ۹. نمودار برازش بهترین توابع توزیع احتمالاتی تجربی (ویبول، با خطوط مستد) توصیف‌کننده‌ی شرایط نزدیک بعد از آستانه) و لوگ - نرمال با خطوط ناپیوسته (توصیف‌کننده‌ی شرایط بعد از آستانه) نشان داده شده‌اند) بر داده‌های مشاهده‌ی انرژی جنبشی لحظه‌ی (نشانه‌ها) در سری آزمایش با چگالی‌های: الف) ρ_1 و ب) ρ_2 با اعداد رینولدز ذره متفاوت در دو حالت بعد از آستانه و شرایط آستانه.

ذره‌ی هوشمند) می‌تواند برای توصیف پدیده‌ی انتقال رسوب در قالب تصادفی استفاده شود.

- بررسی تبادل انرژی ذره بستر در حالت انتقال با ذرات دیگر و جریان (انرژی جنبشی لحظه‌ی ذره) نشان داد که متوسط هدررفت و استفاده از وسایل اندازه‌گیری مینیاتوری (در پژوهش حاضر، حسگرهای MEMS) می‌تواند با هزینه‌ی به نسبت کمتر، رفتار ذره در شرایط انتقال در حالت بستر را پیش‌بینی کند.
- رفتار ذره در شرایط مختلف انتقال تغییر کرده و همچنین به دلیل استفاده از ذرات با چگالی نسبی کوچک‌تر از ذرات کوآرتزی، می‌توان نتایج پژوهش حاضر را در زمینه‌ی حرکت ماکرو - پلاستیک‌ها (که چالش اکو - هیدرولیکی جدیدی را پیش روی پژوهشگران آورده است)، در بستر رودخانه تعمیر داد.

ذره‌ی هوشمند) می‌تواند برای توصیف پدیده‌ی انتقال رسوب در قالب تصادفی استفاده شود.

- شکل تابع توزیع احتمالاتی انرژی جنبشی ذره از نتایج حاصل از ذره‌ی هوشمند (از ویبول به لوگ - نرمال)، نشان‌دهنده‌ی تغییر رفتار اندرکنش ذره - بستر و تبادل انرژی در رژیم‌های مختلف انتقال است.
- مدت زمان دریافت و هدررفت انرژی جنبشی ذره با افزایش عدد رینولدز به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است.
- با استفاده از ذره‌ی هوشمند، مقدار دریافت و هدررفت لحظه‌ی ذره در مسیر

پانویس‌ها

1. Dynamic load
2. Heuristic
3. Diplas
4. Celik
5. Valyrakis
6. Roseberry
7. Heyman & Ancey
8. Shim & Duan
9. Furbish
10. Wu
11. Celik
12. Weibull distribution
13. particle tracking velocimetry (PTV)
14. microelectro mechanical systems (MEMS)
15. Akeila
16. Kularatna

17. Frank
18. Spreitzer
19. Inverter
20. acoustic doppler velocimetry (ADV)
21. Micro controller
22. direct cosine matrix

منابع (References)

1. Abbott, J. and Francis, J.R.D. "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **284**(1321), pp. 225-254 (1977).
2. Dey, S. "Fluvial hydrodynamics", Springer (2014).

3. Bagnold, R.A. "The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **332**(1591), pp. 473-504 (1973).
4. Ancey, C. "Bedload transport: A walk between randomness and determinism Part 1. The state of the art", *Journal of Hydraulic Research*, **58**(1), pp. 1-17 (2020).
5. Furbish, D.J., Roering, J.J., Doane, T.H. and et al. "Rarefied particle motions on hillslopes: 1. Theory", *Earth Surface Dynamics Discussions*, **9**(3), pp. 1-63 (2020).
6. Ancey, C. and Heyman, J. "A microstructural approach to bed load transport: Mean behaviour and fluctuations of particle transport rates", *Journal of Fluid Mechanics*, **744**, pp. 129-168 (2014).
7. Ancey, C. and Pascal, I. "Estimating mean bedload transport rates and their uncertainty", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **125**(7), e2020JF005534 (2020).
8. Fan, N., Singh, A., Guala, M. and et al. "Exploring a semimechanistic episodic Langevin model for bed load transport: Emergence of normal and anomalous advection and diffusion regimes", *Water Resources Research*, **52**(4), pp. 2789-2801 (2016).
9. Diplas, P., Dancey, C.L., Celik, A.O. and et al. "The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions", *Science*, **322**(5902), pp. 717-720 (2008).
10. Celik, A.O., Diplas, P., Dancey, C.L. and et al. "Impulse and particle dislodgement under turbulent flow conditions", *Physics of Fluids*, **22**(4), 046601 (2010).
11. Valyrakis, M., Diplas, P. and Dancey, C.L. "Entrainment of coarse grains in turbulent flows: An extreme value theory approach", *Water Resources Research*, **47**(9) (2011).
12. Valyrakis, M., Diplas, P. and Dancey, C.L. "Entrainment of coarse particles in turbulent flows: An energy approach", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **118**(1), pp. 42-53 (2013).
13. Roseberry, J.C., Schmeeckle, M.W. and Furbish, D.J. "A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**(F3) (2012).
14. Ancey, C., Bohorquez, P. and Heyman, J. "Stochastic interpretation of the advection-diffusion equation and its relevance to bed load transport", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **120**(12), pp. 2529-2551 (2015).
15. Wu, Z., Furbish, D. and Fofoula-Georgiou, E. "Generalization of hop distance-time scaling and particle velocity distributions via a two-regime formalism of bedload particle motions", *Water Resources Research*, **56**(1), pp. e2019WR025116 (2020).
16. Shim, J. and Duan, J. "Experimental and theoretical study of bed load particle velocity", *Journal of Hydraulic Research*, **57**(1), pp. 62-74 (2019).
17. Shim, J. and Duan, J.G. "Experimental study of bedload transport using particle motion tracking", *International Journal of Sediment Research*, **32**(1), pp. 73-81 (2017).
18. Furbish, D.J., Haff, P.K., Roseberry, J.C. and et al. "A probabilistic description of the bed load sediment flux: 1. Theory", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**(F3), pp. (2012).
19. Valyrakis, M. and Farhadi, H. "Investigating coarse sediment particles transport using PTV and "smart-pebbles" instrumented with inertial sensors", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2017).
20. Akeila, E., Salcic, Z. and Swain, A. "Smart pebble for monitoring riverbed sediment transport", *IEEE Sensors Journal*, **10**(11), pp. 1705-1717 (2010).
21. Kularatna, N., Melville, B., Akeila, E. and et al. "Implementation aspects and offline digital signal processing of a smart pebble for river bed sediment transport monitoring", *SENSORS*, 2006 IEEE (2006).
22. Frank, D., Foster, D., Sou, I.M. and et al. "Lagrangian measurements of incipient motion in oscillatory flows", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**(1), pp. 244-256 (2015).
23. Harding, M., Fussell, B.K., Gullison, M. "Design and testing of a debris flow smart rock", *Geotechnical Testing Journal*, **37**(5), pp. 769-785 (2014).
24. Maniatis, G. "On the use of IMU (inertial measurement unit) sensors in geomorphology", *Earth Surface Processes and Landforms*, **46**(11), pp. 2136-2140 (2021).
25. Valyrakis, M., Alexakis, A.-T., Maniatis, G. and et al. "New techniques for environmental monitoring and risk assessment in water surface systems", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2016).
26. Farhadi, H., Esmaili, K., Zahir, A. and et al. "Monitoring particle transport at above threshold flow conditions", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2018).
27. Farhadi, H. and Valyrakis, M. "Exploring probability distribution functions best-fitting the kinetic energy of coarse particles at above threshold flow conditions", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2021).
28. Al-Obaidi, K. and Valyrakis, M. "A sensory instrumented particle for environmental monitoring applications: Development and calibration", *IEEE Sensors Journal*, **21**(8), pp. 10153-10166 (2021).
29. Radchenko, A. "Smart rocks for bridge scour monitoring: Design and localization using electromagnetic techniques and embedded orientation sensors (Publication number 2570)", Doctoral Dissertations, Missouri University of Science and Technology (2017).
30. Dost, J.B., Gronz, O., Casper, M.C. and et al. "The potential of Smartstone probes in landslide experiments: how to read motion data", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **20**(12), pp. 3501-3519 (2020).
31. Dini, B., Bennett, G.L., Franco, A. and et al. "Development of smart boulders to monitor mass movements via the internet of things: A pilot study in Nepal", *Earth Surface Dynamics*, **9**(2), pp. 295-315 (2021).
32. Spreitzer, G., Gibson, J., Tang, M. and et al. "Smart-Wood: Laboratory experiments for assessing the effectiveness of smart sensors for monitoring large wood movement behaviour", *Catena*, **182**, 104145 (2019).

33. Curley, E.A., Thomas, R., Adams, C.E. and et al. "Behavioural and metabolic responses of Unionida mussels to stress", *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* (2021).
34. Buffington, J.M. and Montgomery, D.R. "A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers", *Water Resources Research*, **33**(8), pp. 1993-2029 (1997).
35. Maniatis, G.; Hoey, T.; Hodge, R. and et al. "Inertial drag and lift forces for coarse grains on rough alluvial beds measured using in-grain accelerometers", *Earth Surface Dynamics*, **8**(4), pp. 1067-1099 (2020).
36. Valyrakis, M., Alexakis, A. and Pavlovskis, E. "Smart pebble" designs for sediment transport monitoring", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2015).
37. Pahtz, T., Clark, A.H., Valyrakis, M. and et al. "The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments", *Reviews of Geophysics*, **58**(1), e2019RG000679 (2020).