



دانشگاه گولستان علوم کشاورزی و منابع طبیعی گولستان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد هفدهم، شماره چهارم، ۱۳۸۹
www.gau.ac.ir/journals

بررسی آزمایشگاهی چرخش طولی ذره رسوبی هنگام جهش در نزدیکی بستر کانال

*سیدسجاد مهدیزاده محلی^۱ و سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری^۲

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

^۲ استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۱

چکیده

در این پژوهش، میزان چرخش تک‌ذره رسوبی در خلال حرکت جهشی خود در یک جریان آشفته با استفاده از سیستم تصویربرداری سرعت بالا اندازه‌گیری شده است. این مشخصه در ۵ مرحله از یک گام جهش با تغییر در شرایط هیدرولیکی جریان، قطر و چگالی ذره و با سرعت ۲۵۰ فریم بر ثانیه به دست آمده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش آشفتگی جریان سرعت زاویه‌ای ذره روند افزایشی را طی خواهد نمود و برای شرایط هیدرولیکی یکسان، ذرات با اندازه بزرگ‌تر و چگالی ویژه بیشتر، سریع‌تر خواهند چرخید.

واژه‌های کلیدی: نرخ چرخش، سرعت زاویه‌ای، جریان آشفته، جهش تک‌ذره، تنش بستر

*مسئول مکاتبه: sa.mehdizadeh@gmail.com

مقدمه

حرکت ذرات رسوبی در آب به صورت غلتش یا لغزش^۱، جهش^۲ و یا به صورت بار معلق انجام می‌گیرد. هنگامی که سرعت برشی بستر جریان از مقدار بحرانی خود فراتر رود، حرکت رسوبات به صورت غلتش آغاز می‌شود. با افزایش این سرعت، ذرات رسوبی در طول بستر با ایجاد جهش به حرکت خود ادامه داده و زمانی که سرعت برشی بستر از سرعت سقوط ذرات بیش‌تر گردد، این ذرات از جای خود بلند شده و نیروهای ناشی از آشفتگی بر نیروی غوطه‌وری غلبه خواهند کرد و سبب معلق شدن این ذرات می‌گردد. در اغلب موارد، حرکت رسوبات به شیوه غلتشی و جهشی، انتقال بار بستر و حرکت ذرات به صورت معلق، انتقال بار معلق نامیده می‌شود. محققان بسیاری مانند اینشتین (۱۹۴۲) و وایبرگ و اسمیت (۱۹۸۷) نشان داده‌اند که بیش‌تر حرکت رسوبات بستر به صورت جهش می‌باشد (هو و هویی، ۱۹۹۶). بنابراین آگاهی از مشخصه‌های جهش ذرات بستر و چگونگی ارتباط آن‌ها با شرایط جریان در قانونمند کردن حرکت بار بستر بسیار مؤثر است.

به‌خاطر تأثیرات ناشی از زبری بستر و گرادیان سرعت، ذره در خلال جهش، چرخش نیز خواهد داشت. این چرخش سبب تولید نیروی بالابری (لیفت) اضافی شده و بنابراین بر طول و ارتفاع جهش می‌افزاید. چیپیل (۱۹۴۵) با مشاهده لکه‌های تاریک و روشن در تصاویر برداشت شده از ذرات در خلال جهش به تخمینی از نرخ چرخش ذره پرداخت و نشان داد که این نرخ برای ذرات در هوا در دامنه ۱۰۰۰-۲۰۰ دور بر ثانیه می‌باشد. وایت و شولتز (۱۹۷۷) نیز با استفاده از یک دوربین سرعت بالا این نرخ را برای ذرات جهش‌کننده در هوا در دامنه ۳۰۰-۱۰۰ دور بر ثانیه دانسته‌اند. هو و هویی (۱۹۹۶) با انجام آزمایش‌هایی در کانال آزمایشگاهی این نرخ را در آب حدود ۴۰ دور بر ثانیه به‌دست آورده بودند. لی و هسو (۱۹۹۴) نیز نرخ چرخش تک‌ذره را اندازه گرفته و از آن در حل عددی خود استفاده نمودند. از پژوهش‌های انجام شده در دهه اخیر نیز می‌توان به مدل عددی-آزمایشگاهی زو و همکاران (۲۰۰۷) اشاره نمود. این محققان برای ذرات ماسه با دامنه قطر ۰/۳-۰/۲ میلی‌متر به اندازه‌گیری سرعت چرخشی ذره و همچنین نیروی به‌دست آمده از اثر چرخش در تونل باد پرداخته و نشان دادند که سرعت چرخشی ذرات ماسه در هوا برای سرعت‌های برشی مختلف (۰/۶۷، ۰/۸۳ و ۰/۸۷ متر بر ثانیه) از ۲۰۰-۸۰۰ دور در ثانیه متغیر بوده است و با افزایش ارتفاع جهش بر میزان آن افزوده خواهد شد.

1- Rolling or Sliding

2- Saltation

در تعیین ضخامت لایه‌ای از جریان که بار بستر را شامل می‌شود می‌توان از ارتفاع جهش ذرات استفاده نمود و نرخ انتقال بار بستر را به صورت تابعی از طول و ارتفاع جهش ذره بیان کرد. بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی یا عددی برای ردیابی حرکت ذرات در نزدیکی بستر و مشخص شدن ارتباط این مشخصه‌ها با شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان امری ضروری می‌باشد. از آنجایی که در مدل‌سازی لاگرانژی حرکت ذره، محاسبه نیروی بالابری چرخشی و سرعت زاویه‌ای ذره الزامی است، بنابراین هدف اصلی این پژوهش محاسبه این سرعت و بیان جزئیات بیش‌تر چرخش ذره در آب جاری و در خلال انتقال بار بستر و همچنین ارتباط آن با سایر پارامترهای مؤثر در جهش می‌باشد. مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که اگرچه بیش‌تر محققان به اقتضای شرایط زمان مطالعه، مواردی را برای تکمیل نتایج آزمایشگاهی و پیشرفت در توسعه مدل عددی خود پیشنهاد نموده‌اند، اما تأثیر چرخش ذره کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است و در بیش‌تر شبیه‌سازی‌های انجام شده، یک رابطه کلی که شامل هر دو نوع نیروی بالابری (برشی و چرخشی) می‌باشد، بیان شده است. در حال حاضر با توجه به توسعه تکنولوژی و تجهیزات آزمایشگاهی و استفاده از تجهیزات جدید موجود می‌توان گام‌های جدیدی را در راستای شناخت این پدیده برداشت تا در نهایت بتوان تخمین دقیق‌تری از میزان دبی رسوبی بستر به دست آورد.

مواد و روش‌ها

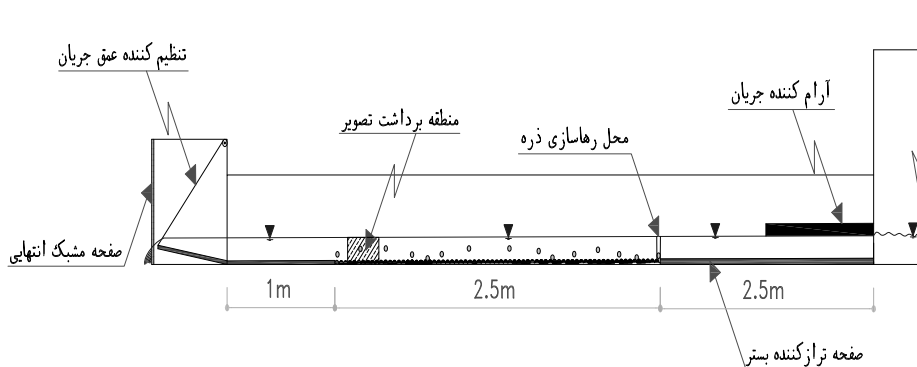
تجهیزات آزمایشگاهی: کانال مورد استفاده در این پژوهش دارای عرض ۰/۴۴۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و طول ۶ متر می‌باشد. شیب بستر کانال ۰/۰۲۴ و جنس دیواره‌ها و کف از شیشه پلکسی^۱ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. برای رسیدن به یک جریان یکنواخت با توجه به سرعت بالای جریان و میزان آشفتگی آن باید به اندازه کافی از بالادست و ورودی کانال فاصله گرفت تا لایه مرزی به بیش‌ترین رشد خود رسیده و شرط توسعه‌یافتگی جریان ارضا گردد. این فاصله در این پژوهش با توجه به نبود تغییرات پروفیل طولی سرعت (شرط توسعه‌یافتگی) ۵ متر در نظر گرفته شده است. محل رها نمودن تک ذره و آغاز حرکت آن در ۲ متری بالادست منطقه تصویربرداری قرار داشته است. ذره توسط یک لوله باریک به داخل آب برده شده و بر روی کف قرار گرفته و رها شده است (شکل ۱). برای برداشت چرخش ذره از دوربین سرعت بالایی^۲ استفاده شده که قابلیت برداشت تصاویر با ۲۵۰ فریم بر ثانیه و

1- Plexiglass

2- Super 10kc Fastcam Photron Company

وضوح 512×480 پیکسل را داراست. شکل ۲ نحوه تصویربرداری از ذره را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان چرخش، دو نوار عمود بر هم بر محیط ذره چسبانده شده و مطابق شکل ۳ تغییر زوایا و نرخ چرخش (n_i) با محاسبه دو زاویه α و β به صورت تعداد دور در ثانیه و برای ۵ مرحله از حرکت ذره شامل لحظه برخاستن از بستر (n_{re})، ناحیه بلندشدگی (n_{rs})، لحظه رسیدن به ارتفاع بیشینه (n_{mh})، ناحیه فرود (n_{ds}) و لحظه برخورد به بستر (n_{im}) به صورت رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\Delta\theta = \alpha - \beta \quad n_i = \frac{\Delta\theta}{\Delta t \times 360} \quad (1)$$



شکل ۱- جزئیات کانال مورد استفاده در آزمایش‌ها.



شکل ۲- نحوه تصویربرداری از جهش تک‌ذره.

برای آگاهی از شرایط آشفتگی جریان و محاسبه تنش بستر، از روش PIV^1 استفاده شده است. دستگاه PIV دستگاهی است که سرعت میدان جریان را در یک محدوده مکانی به صورت هم‌زمان برداشت می‌کند. به دست آوردن سرعت میدان جریان توسط این دستگاه در ۴ مرحله انجام می‌شود. این مراحل به ترتیب عبارتند از: ریختن دانه‌های به‌خصوص^۲ درون آب، روشن کردن میدان جریان موردنظر توسط لیزر، ضبط کردن مکان اولیه و نهایی ذرات، پردازش و آنالیز اطلاعات به دست آمده. ردیابی ذرات به وسیله دوربین‌های حساس با سرعت بالا انجام می‌شود. در یک محدوده زمانی خاص و بسیار کم (در حد میکروثانیه) عکس‌های متوالی برداشت شده و این عکس‌ها توسط نرم‌افزار پردازش و با توجه به رابطه $u_p = x/t$ سرعت ذرات به دست می‌آید. نوع ذره به کار رفته در این پژوهش از نوعی ماده رزینی به نام پلیولیت^۳ می‌باشد که دو ویژگی مهم بازتابش مناسب نور لیزر و چگالی نزدیک به آب (۱/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) را داراست. پس از برداشت پروفیل سرعت در دو بعد (طول و عمق)، با استفاده از نرم‌افزار مربوطه^۴ سرعت متوسط و میزان نوسانات^۵ آن در یک بازه زمانی و پس از آن تنش رینولدز و در نهایت تنش نهایی بستر یا سرعت برشی محاسبه شده است.

شرایط انجام آزمایش‌ها: آزمایش‌ها برای چهار شرایط مختلف جریان (با تغییر در دبی و عمق) انجام شده است. انتخاب این چهار حالت متناسب با شرایط هندسی حاکم بر کانال، تشکیل عمق جریان مطلوب و همچنین رخداد پدیده جهش ذره با بالا رفتن سرعت جریان ورودی بوده است. دامنه قطر ذرات مورد استفاده از ۹-۴ میلی‌متر متغیر بوده و همچنین ذرات دارای سه جنس متفاوت می‌باشند. انتخاب ذراتی با چگالی نزدیک به رسوبات طبیعی در اولویت بوده و به این منظور از گلوله‌های کرومی شکل شیشه با چگالی ۲/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بهره گرفته شده است. ذرات پلاستیکی و دلرین با چگالی‌های به ترتیب ۱/۰۸ و ۱/۳ نیز دو جنس دیگری بوده‌اند که از آن‌ها در این پژوهش استفاده شده است. برای ایجاد زبری در بستر کانال نیز از ذرات کرومی شکل شیشه استفاده شده که در طول ۲/۵ متر و در کل عرض کانال بر روی پلکسی جداگانه چسبانده شده و در بستر کانال قرار گرفتند. اندازه ضریب زبری در تطبیق با پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده، ۰/۶۵ قطر ذرات کرومی در نظر گرفته شده است (انسی و همکاران، ۲۰۰۲) (جدول ۱). همچنین هر کدام از آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شده‌اند و از مقادیر متوسط آن‌ها در تحلیل نتایج استفاده شده است.

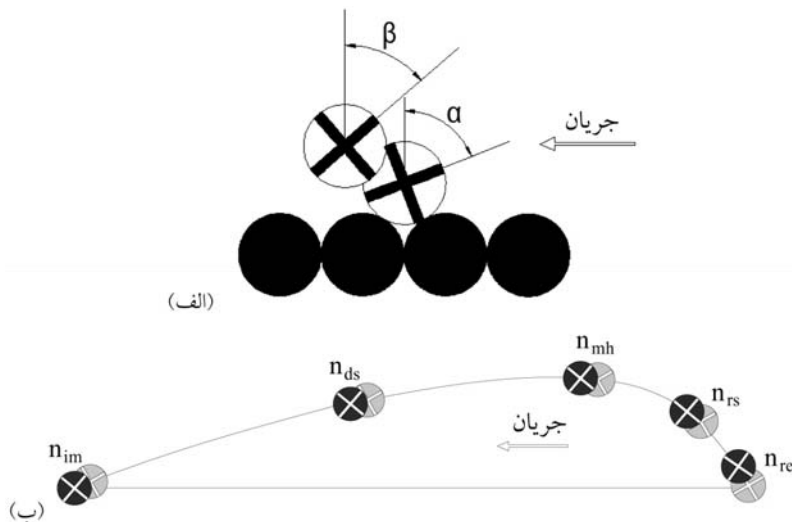
1- Dantec Dynamics Particle Image Velocimetry Nd: Yag laser system 400 mj per pulse and 532 nm wave length

2- Seeding Particle

3- Pliolite (vtach type)

4- Flow Manager Software, Version 4/41/11

5- Velocity Fluctuations



شکل ۳- (الف) - اندازه‌گیری زوایا برای محاسبه نرخ چرخش ذره در هنگام برخاستن از بستر، (ب) - مرحله ۵ حرکت چرخشی ذره در یک گام جهش.

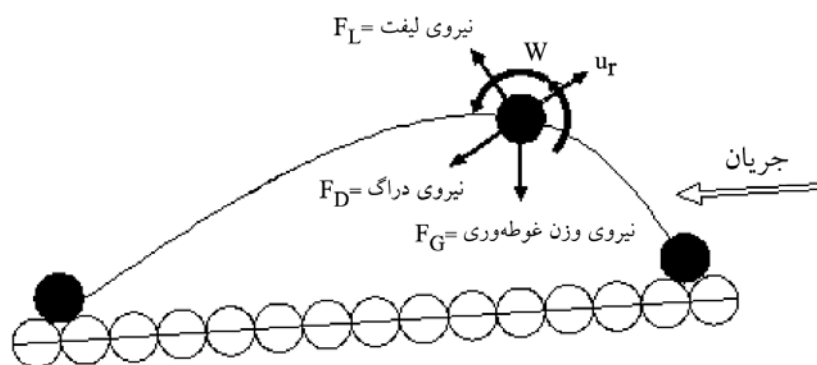
جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان و ذره و پارامترهای تأثیرگذار بر چرخش.

T^* (بی‌بعد)	τ^*_{cr} (بی‌بعد)	τ^* (بی‌بعد)	u^* (متر بر ثانیه)	D^* (بی‌بعد)	$d_o./d_p$ (بی‌بعد)	\bar{u} (متر بر ثانیه)	h (متر)	ρ_s (کیلوگرم بر مترمکعب)	d_p (میلی‌متر)	Run
۰/۴۱	۰/۰۵۰	۰/۰۷۰	۰/۰۳۸۲	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۵۷	۰/۱۲۱	۱۳۰۲	۷	۱
۰/۰۲	۰/۰۵۳	۰/۰۵۴	۰/۰۳۸۲	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۰/۱۳۰	۰/۱۲۱	۱۳۰۲	۹	۲
۶/۲۶	۰/۰۴۲	۰/۳۰۳	۰/۰۳۸۲	۵۵/۶۰	۱/۰۰	۰/۱۳۰	۰/۱۲۱	۱۰۸۰	۶	۳
۰/۳۹	۰/۰۵۳	۰/۰۷۴	۰/۰۴۴۵	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۱۲۷	۱۳۰۲	۹	۴
۰/۹۲	۰/۰۵۰	۰/۰۹۵	۰/۰۴۴۵	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۱۲۷	۱۳۰۲	۷	۵
۰/۴۶	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۴۴۵	۱۳۴/۲۷	۱/۰۰	۰/۷۲	۰/۱۲۷	۲۱۵۰	۶	۶
۸/۸۷	۰/۰۴۲	۰/۴۱۱	۰/۰۴۴۵	۵۵/۶۰	۱/۰۰	۰/۷۲	۰/۱۲۷	۱۰۸۰	۶	۷
۱/۴۵	۰/۰۵۰	۰/۱۲۱	۰/۰۵۰۳	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۱۲۲	۱۳۰۲	۷	۸
۰/۳۱	۰/۰۵۴	۰/۰۶۱	۰/۰۵۰۳	۱۳۴/۲۷	۱/۰۰	۰/۸۱	۰/۱۲۲	۲۱۵۰	۶	۹
۱۱/۵۸	۰/۰۴۲	۰/۵۲۴	۰/۰۵۰۳	۵۵/۶۰	۱/۰۰	۰/۸۱	۰/۱۲۲	۱۰۸۰	۶	۱۰
۰/۱۷	۰/۰۴۸	۰/۰۵۶	۰/۰۵۰۳	۸۹/۵۱	۱/۵۰	۰/۸۱	۰/۱۲۲	۲۱۵۰	۴	۱۱
۰/۷۷	۰/۰۵۳	۰/۰۹۴	۰/۰۵۰۳	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۰/۸۱	۰/۱۲۲	۱۳۰۲	۹	۱۲
۲/۰۳	۰/۰۵۰	۰/۱۵۰	۰/۰۵۶	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۱۳۰	۱۳۰۲	۷	۱۳
۰/۱۴	۰/۰۵۴	۰/۰۷۰	۰/۰۵۶	۱۳۴/۲۷	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۱۳۰	۲۱۵۰	۶	۱۴
۱۴/۵۷	۰/۰۴۲	۰/۶۴۹	۰/۰۵۶	۵۵/۶۰	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۱۳۰	۱۰۸۰	۶	۱۵

تئوری حاکم بر مسأله: در دو دهه اخیر مدل‌های تئوری مختلفی به منظور شبیه‌سازی حرکت جهشی ذره با در نظر گرفتن نیروهای رسوبی وارد بر آن و بر پایه معادله لاگرانژی حرکت توسعه داده شده‌اند (شکل ۴). این نیروها در معادله دیفرانسیلی مشهور نیوتن قرار گرفته و مؤلفه‌های سرعت ذره و در نهایت موقعیت ذره رسوب از آن استخراج می‌گردد.

$$m \frac{du_p}{dt} = mg + F_i(u_p, u) \quad (2)$$

در رابطه بالا، u_p = سرعت ذره، u = سرعت سیال و F_i = نیروهای وارد بر ذره می‌باشند.



شکل ۴- نیروهای اصلی وارد بر یک ذره در یک گام جهش.

سه نیروی اصلی وارد بر ذره، نیروهای وزن غوطه‌وری، دراگ و بالابری (لیفت) بوده که نیروی دراگ و بالابری به ترتیب مؤلفه‌های در راستای جریان و راستای عمود بر جریان (حاصل جمع نیروهای فشاری و برشی وارد بر ذره) می‌باشند. نیروی بالابری را می‌توان به دو نیروی بالابری برشی و بالابری چرخشی (اثر مگنس^۱) تقسیم نمود. نیروی برشی از توسعه توزیع فشار بر روی ذره به دست می‌آید، به این صورت که سرعت زیاد در بالای ذره موجب کاهش فشار و سرعت کم در زیر ذره منجر به افزایش فشار شده و برآیند این فشارها سبب تشکیل این نیرو می‌گردد. همچنین در نتیجه چرخش ذره در سیال، به دلیل اختلاف سرعت ناشی از چرخش، اختلاف فشاری در طرفین ذره ایجاد می‌شود. این اختلاف فشار منجر به اعمال نیرویی تحت عنوان نیروی بالابری چرخشی یا نیروی مگنس از طرف

1- Magnus Effect

سیال به ذره در حال چرخش می‌گردد. برای ذرات کروی که در جریان لزج حرکت می‌کنند (رینولدز پایین)، سافمن (۱۹۳۵) به صورت تئوری نشان داد که نیروی بالابری به‌خاطر چرخش از لحاظ مرتبه بزرگی^۱ کم‌تر از نیروی بالابری برشی است و می‌توان آن را نادیده گرفت، اما کلر و روبینو (۱۹۶۱) نیروی چرخشی را به صورت رابطه ۳ و وایت و شولدز (۱۹۷۷) نیز به صورت رابطه ۴ نشان داده‌اند (فن‌راین، ۱۹۸۴؛ فن‌راین، ۱۹۹۳):

$$F_L(\text{spin}) = \alpha_L \rho d_p^2 u_r \omega \quad (3)$$

$$F_L(\text{spin}) = \frac{\pi \rho}{8} d_p^2 u_r \left(\omega - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4)$$

که u_r : سرعت متوسط ذره نسبت به جریان بوده که اگر u سرعت جریان و u_p و v_p سرعت ذره به ترتیب در راستای طولی و قائم باشد، خواهیم داشت: $u_r = \sqrt{(u - u_p)^2 + v_p^2}$. برای جریان‌های لزج $\alpha_L = 0/4$ فرض شده و $\omega = 2\pi n$ سرعت زاویه‌ای و n نرخ چرخش ذره می‌باشد.

اغلب محققان رابطه کلی که شامل هر دو نوع نیروی بالابری باشد را بیان نموده‌اند و تأثیر چرخش ذره در پارامتر ضریب بالابری^۲ به‌عنوان ضریب ثابتی که با کالیبراسیون مدل به‌دست خواهد آمد مطرح شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹). لی و هسو (۱۹۹۴) نشان دادند که با اضافه نمودن نیروی بالابری چرخشی، بر طول و ارتفاع جهش ذره به ترتیب ۱۲ و ۶ درصد افزوده خواهد شد و بنابراین نمی‌توان آن را نادیده گرفت. زو و همکاران نیز میزان این افزایش را برای جهش ذره در هوا به‌میزان ۱۰ و ۲۵ درصد برای ارتفاع و طول جهش محاسبه نمودند.

آنالیز ابعادی: پارامترهایی که بر روی چرخش ذره تأثیر می‌گذارند شامل: عمق جریان (h)، چگالی آب (ρ)، لزجت سینماتیکی آب (ν)، سرعت برشی (u_*)، قطر ذره جهش‌کننده (d_p)، قطر متوسط ذرات بستر یا زبری معادل آن (d_s)، چگالی ذره جهش‌کننده (ρ_s) و ضریب شکل (sf) می‌باشد. با استفاده از تئوری π باکینگهام برای مشخصات جهش به رابطه بدون بعد زیر خواهیم رسید:

$$S_i = f(h, \rho, \nu, d_p, d_s, \rho_s, sf) \Rightarrow f_1(\tau_*, \text{Re}_*, \frac{d_s}{d_p}, \frac{\rho_s}{\rho}, sf, \frac{h}{d_p}) \quad (5)$$

1- Order of Magnitude

2- Lift Coefficient

که در آن $Re_* = u_* d_p / \nu$ و $\tau_* = u_*^{\uparrow} / (S_g - 1) g d_p$ پارامتر شیلدز می باشد: $S_g = \rho_s / \rho$ و S_i متغیر S_i نیز برابر خواهد بود با:

$$S_i = \frac{(2\pi m_i) d_p}{u_*} \quad (6)$$

$2\pi m_i$ به عنوان سرعت زاویه ای ذره در طول جهش در رابطه بالا تعریف می گردد. از آنجایی که در این آزمایش ها هم ذرات بستر و هم ذرات جهش کننده کروی شکل بوده اند از ضریب شکل صرف نظر شده است ($S_f = 1/0$). از ترم h/d_p نیز به علت کوچک بودن d_p نسبت به h می توان چشم پوشی نمود (لی و همکاران، ۲۰۰۶) و در نهایت با ترکیب دو پارامتر τ_* و D_* رابطه زیر استخراج می شود:

$$S_i = f_1(T_*, D_*, D_r) \quad (7)$$

$$\text{که در آن } D_* = \left(\frac{(S_g - 1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} d_p, \quad T_* = \frac{u_*^{\uparrow} - u_{*cr}^{\uparrow}}{u_{*cr}^{\uparrow}}, \quad \text{و } D_r = \frac{d_o}{d_p} \text{ می باشد.}$$

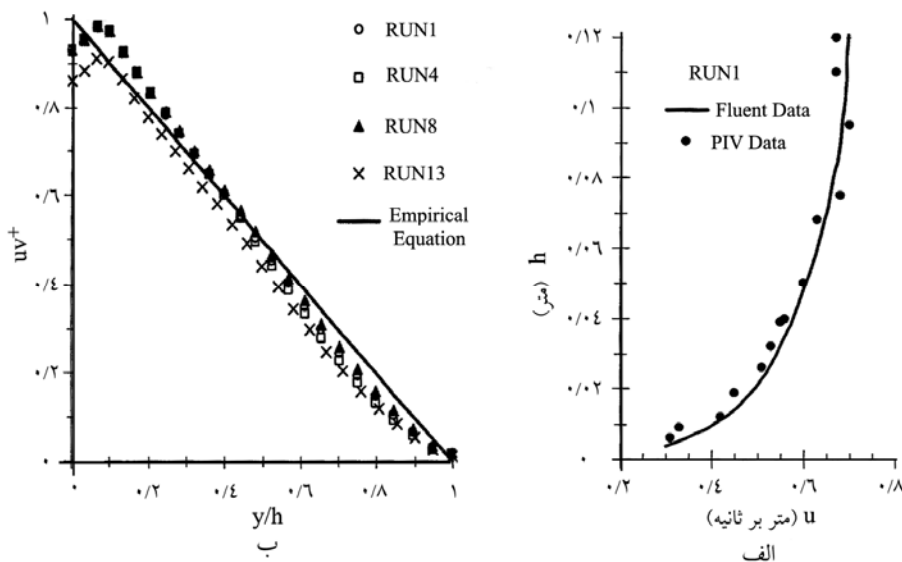
پروفیل قائم سرعت و توزیع قائم تنش برشی رینولدز بی بعد ($uv^+ = -\overline{u'v'}/u_*^{\uparrow}$) در شکل ۵ نمایش داده شده است. در محاسبه تنش بستر از رابطه ارایه شده توسط نزو مطابق زیر استفاده شده است (نزو و ناکاگاوا، ۱۹۹۳).

$$\frac{-\overline{u'v'}}{u_*^{\uparrow}} = \left(1 - \frac{y}{h} \right) - V_i$$

$$V_i = \frac{1}{\kappa Re_*} = \left(\left(\frac{y}{h} \right)^{-1} + \pi \Pi \sin \left(\pi \frac{y}{h} \right) \right)$$

که در آن $\kappa \approx 0.412$ ثابت فون کارمن و Π پارامتر قدرت استهلاک کولز^۱ نامیده می شود.

1- Coles' Wake Strength Parameter



شکل ۵- الف- پروفیل سرعت قائم در فاصله ۵ متری از بالادست برای RUN1
 ب- توزیع قائم تنش رینولدز تابعی از y/h .

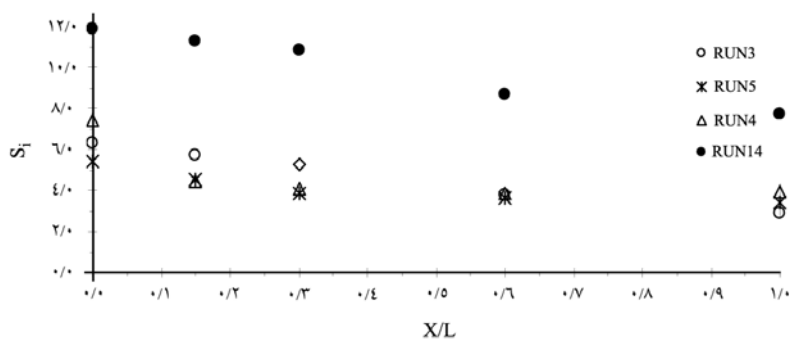
نتایج و بحث

چرخش ذره حول هر سه محور (در جهت طول، عرض و عمق کانال) صورت می‌گیرد. برای جریان یکنواخت و در هنگام جهش ذره، مشاهده‌ها نشان می‌دهد که چرخش در جهت طول کانال غالب بوده و چرخش در جهت‌های دیگر تنها در مراحل اولیه بلندشدگی ذرات موجود می‌باشند (لی و هسو، ۱۹۹۶)، بنابراین تحلیل‌ها و نتایج بیان شده در زیر برای چرخش طولی ذره معتبر خواهد بود. برای بررسی تغییرات چرخش در طول یک جهش کامل ذره از مقادیر متوسط چرخش اندازه‌گیری شده در ۴ آزمایش استفاده شده (جدول ۲) و نمودار آن ترسیم شده است (شکل ۶). همان‌طور که در این شکل مشخص می‌باشد، در طول یک جهش کامل ذره، سرعت زاویه‌ای روند کاهشی را طی خواهد نمود.

در ادامه برای پژوهش در تأثیر پارامترهای بیان شده در رابطه ۷ بر نرخ چرخش و در شرایط هیدرولیکی مختلف، نتایج به‌دست آمده از انجام آزمایش‌های تحلیل شده (جدول ۳) و در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۲- مقادیر نرخ چرخش محاسبه شده برای چهار حالت جریان و جنس ذره.

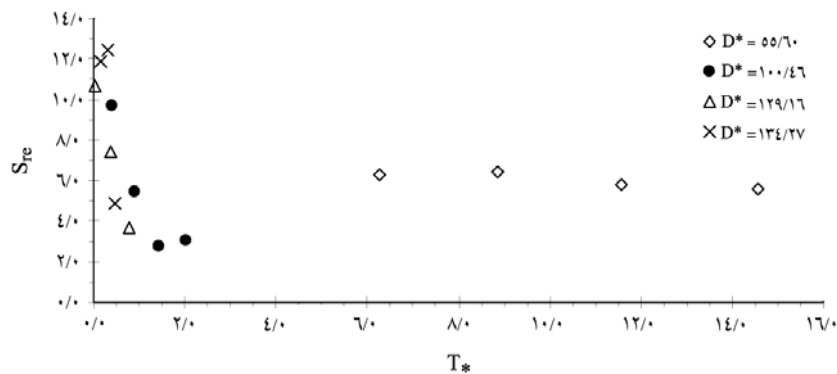
L (سانتی متر)	S_{im}	n_{im}	S_{ds}	n_{ds}	S_{mh}	n_{mh}	S_{rs}	n_{rs}	S_{re}	n_{re}	RUN
۸/۵۲	۲/۹۱	۲/۹۴	۳/۴۶	۳/۸۱	۵/۲۸	۵/۳۵	۵/۷۳	۵/۸۱	۶/۳۱	۶/۳۹	۳
۳/۴۹	۳/۳۸	۳/۴۲	۳/۶۷	۳/۷۱	۳/۸۶	۳/۹۱	۴/۴۹	۴/۵۵	۵/۴۲	۵/۴۹	۵
۳/۱۳	۳/۹۶	۳/۱۲	۳/۸۵	۳/۰۳	۴/۰۹	۲/۹۹	۴/۸۴	۳/۵۰	۷/۴۰	۵/۸۳	۴
۱/۱۹	۷/۶۹	۹/۷۸	۸/۶۶	۱۱/۰۱	۱۰/۸۳	۱۳/۸۷	۱۱/۲۹	۱۴/۳۶	۱۱/۸۷	۱۵/۱۰	۱۴



شکل ۶- نمودار سرعت زاویه‌ای بی بعد ذره در طول یک جهش کامل.

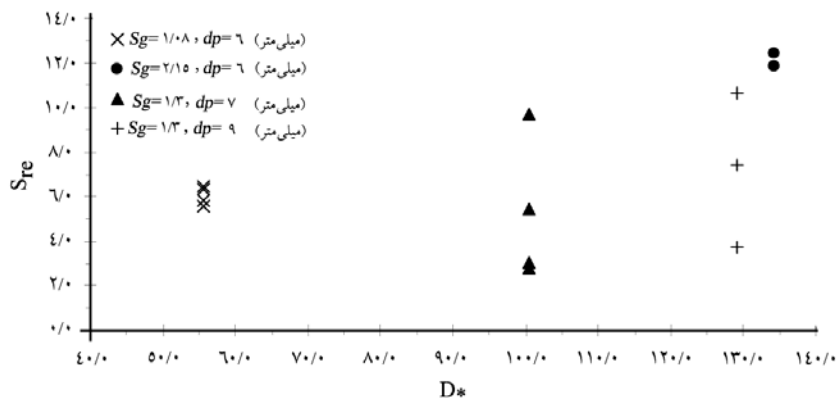
جدول ۳- خلاصه نتایج تحلیل صورت گرفته برای چرخش در لحظه برخاستن از بستر (مرتب شده براساس D^*).

S_{re}	ω_{re}	T^*	D^*	D_f	RUN
۶/۳۱	۴۰/۱۸	۶/۲۶	۵۵/۶۶	۱/۰۰	۳
۶/۴۴	۴۷/۸۰	۸/۸۷	۵۵/۶۶	۱/۰۰	۷
۵/۸۳	۴۸/۸۸	۱۱/۵۸	۵۵/۶۶	۱/۰۰	۱۰
۵/۵۸	۵۲/۰۲	۱۴/۵۷	۵۵/۶۶	۱/۰۰	۱۵
۹/۶۷	۵۲/۷۵	۰/۴۱	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۱
۵/۴۲	۳۴/۴۷	۰/۹۲	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۵
۲/۷۷	۱۹/۹۱	۱/۴۵	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۸
۳/۰۴	۱۸/۹۱	۲/۰۳	۱۰۰/۴۶	۰/۸۶	۱۳
۱۰/۶۵	۴۵/۱۹	۰/۰۲	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۲
۷/۴۰	۳۶/۶۱	۰/۳۹	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۴
۳/۷۱	۴۶/۶۷	۰/۷۷	۱۲۹/۱۶	۰/۶۷	۱۲
۱۱/۸۷	۹۴/۸۵	۰/۱۴	۱۳۴/۲۷	۱/۰۰	۱۴
۱۲/۴۳	۱۰۴/۱۶	۰/۳۱	۱۳۴/۲۷	۱/۰۰	۹



شکل ۷- نمودار سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ذره در لحظه برخاستن از بستر نسبت به شدت انتقال بی‌بعد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که S_{re} با افزایش T_* روند کاهشی خواهد داشت، ولی با توجه به جدول ۳ بر میزان سرعت زاویه‌ای افزوده خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ذرات با افزایش ظرفیت انتقال رسوب، با سرعت بیش‌تری چرخش داشته‌اند. همچنین مطابق شکل ۸ تحت T_* مشابه ذرات با اندازه بزرگ‌تر و چگالی ویژه (S_g) بیش‌تر، سریع‌تر خواهند چرخید و آن به این دلیل است که ذرات بزرگ‌تر و سنگین‌تر تمایل به تولید نیروی واکنش بزرگ‌تر در هنگام برخورد به کانال را دارند.



شکل ۸- نمودار سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ذره در لحظه بلندشدگی نسبت به پارامتر بی‌بعد قطر ذره.

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از یک سیستم تصویربرداری سرعت بالا چرخش تک ذره در خلال جهش اندازه گیری شده و ارتباط آن‌ها با تنش بستر، سرعت جریان، قطر و چگالی ذره نشان داده شده است. بررسی‌ها در ۵ نقطه از گام جهش تک ذره نشان می‌دهد که در جریان یکنواخت و برای چرخش طولی (در راستای جریان) ذره، سرعت زاویه‌ای در مرحله بلندشدگی به حداکثر خود رسیده و در ادامه تا برخورد مجدد به بستر روند کاهشی را طی خواهد نمود. میزان سرعت زاویه‌ای در این آزمایش‌ها در لحظه برخاستن از بستر در دامنه $104/16 - 18/91$ رادیان بر ثانیه قرار داشته است. با افزایش پارامتر ظرفیت انتقال رسوب (T_*)، ناشی از افزایش تنش بستر بر نرخ چرخش افزوده شده و در شرایط هیدرولیکی مشابه، ذرات با اندازه بزرگ‌تر و چگالی ویژه بیشتر سریع‌تر خواهند چرخید.

منابع

1. Ancy, Ch., Bigilon, F., Frey, Ph. and Lanier, J. 2002. Saltation motion of a bead in a rapid water stream, *Physical Review*, 66: 1-16.
2. C. Van Rijn, L. 1984. Sediment transport, part 1: Bed load transport, *J. Hydraulic Eng.* 110: 10. 1431-1456.
3. C. Van Rijn, L. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua publication, Netherlands, 7: 4-12.
4. Hu, Ch. And Hui, Y. 1996. Bed-load transport. I: Mechanical characteristics. *J. Hydr. Eng.* 122: 5. 245-254.
5. Lee, H.Y. and Hsu, I. 1994. Investigation of saltating particle motions, *J. Hydr. Eng.* 120: 7. 831-845.
6. Lee, H.Y. and Hsu, I.S. 1996. Particle spinning motion during saltating process, *J. Hydr. Eng.* 122: 10. 587-590.
7. Lee, H.Y., Lin, Y.T., You, J.Y. and Wang, H.W. 2006. On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the channel bed, *J. Hydr. Res.* 44: 374-389.
8. Nezu, I. and Nakagawa, H. 1993. Turbulence in open-channel flows, IAHR, Japan, Kyoto University, Pp: 48-66.
9. White, B.R. and Schultz, J.C. 1977. Magnus effect in saltation, *J. Fluid Mech.* 47: 3. 437-447.
10. Wang, H.W., Lee, H.Y. and Lee, P.L. 2009. Three dimensional saltating processes of multiple sediment particles, *J. Sediment Res.* 24: 1. 16-32.
11. Zou, X.Y., Cheng, H. and Zhang, C.L. 2007. Effect of magnus and saffman forces on the saltation trajectories of sand grain, *Geomorphology*, 90: 11-22.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 17(4), 2011
www.gau.ac.ir/journals

Experimental investigation of sediment particle longitudinal spinning motion during saltation near the channel bed

***S.S. Mehdizadeh Mahalli¹ and S.A.A. Salehi Neyshabouri²**

¹Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, K.N. Toosi University of Technology,

²Professor, Dept. of Hydraulic Structure, Tarbiat Modares University

Received: 2009/09/16; Accepted: 2010/11/22

Abstract

In this paper, spinning rate of sediment particle during saltation in turbulent flow was measured by means of high speed photography technique. Experiments have been carried out for different hydraulic conditions, particle sizes and densities. Particle spin was measured in five stage of saltation step by analyzing and processing picture taken at 250 frame per seconds. The results showed that increasing turbulence parameter of flow will cause increase in angular velocity and under the same flow condition, particles with larger sizes and specific gravities spin more rapidly.

Keywords: Spinning rate, Angular velocity, Turbulent flow, Saltation, Shear stress

* Corresponding Author; Email: sa.mehdizadeh@gmail.com