

بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهشی ذرات در نزدیکی بستر کانال

سید سجاد مهدیزاده محلی^۱

سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

(دریافت ۸۸/۷/۳ پذیرش ۸۹/۲/۲۰)

چکیده

در این تحقیق، خصوصیات جهش تک ذره رسوبی در یک جریان آشفته با استفاده از سیستم تصویربرداری با سرعت بالا، اندازه‌گیری شد. این خصوصیات شامل طول، ارتفاع، سرعت، زوایای برخورد به بستر و بلندشدگی بودند که با تغییر در شرایط هیدرولیکی جریان، قطر، چگالی ذره و همچنین زبری بستر، با سرعت 250^* فریم بر ثانیه به دست آمدند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش آشفتگی جریان، طول، ارتفاع و سرعت ذره افزایش یافته و زوایای برخورد به بستر و بلندشدگی مجدد آن کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها همچنین حاکی از این امر است که با افزایش قطر متوسط ذرات بستر، تمامی خصوصیات جهش تمایل به افزایش دارند. برای حل عددی معادلات حاکم بر ذره و به دست آوردن مسیر حرکت آن در یک گام جهش، سرعت‌های اولیه جهش در هر دو جهت افقی و قائم به دست آمد که از آنها می‌توان به عنوان شرایط اولیه در حل عددی استفاده نمود. مؤلفه افقی سرعت ذره رسوبی در دامنه ۳ تا ۸ برابر سرعت برشی و مؤلفه قائم آن در دامنه ۱/۵ تا ۳/۵ برابر سرعت برشی قرار داشت. در ادامه با محاسبه مؤلفه‌های ضریب ارتجاعی ذره رسوبی نشان داده شد که تغییر در شدت جریان، تأثیر اندکی بر روی این مؤلفه‌ها داشته به طوری که با افزایش آن، این دو مشخصه تقریباً ثابت ماندند.

واژه‌های کلیدی: جریان آشفته، جهش تک ذره، تنش بستر، زبری کانال، بار بستر

Experimental Investigation of Saltation Characteristics of Particles near Channel Bed

Seyed Sadjad Mehdizadeh Mahalli¹

Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri²

(Received Sep. 25, 2009 Accepted May 10, 2010)

Abstract

This paper studies the mechanical characteristics of saltation of bed-load particles in turbulent flows. Experiments have been carried out by means of high speed photography to obtain saltation characteristics such as length, height, velocity, impacting and rebounding angles for different hydraulic conditions, particle size, density and bed roughness by analyzing and processing pictures taken at 250 frames per second. The measured values of the parameters showed that increases in turbulence parameters of the flow increase saltation length, height, and velocity but decrease the impacting and rebounding angles. It was also found that saltation length and height tended to increase as the average size of the bed material (d_{50}) increased. To solve numerical trajectory equations, the initial velocity component of the particle must be known. The initial longitudinal particle velocity was found to range from $3u_*$ to $8u_*$ and its vertical velocity ranged from $1.5u_*$ to $3.5u_*$, which were different from the values reported in the literature. The longitudinal and vertical components of the restitution coefficient were also measured and it was seen that the Shields parameter (τ_*) had no meaningful effect on these components, remaining almost constant with increasing τ_* .

Keywords: Turbulent Flow, Saltation, Shear Stress, Bed Roughness, Bed Load.

1. Ph.D Student of Water Eng., Khajeh Nasir Toosi University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 88011898 Sa.Mehdizadeh@gmail.com
2. Prof. of Hydraulic Structures, Dept. of Civil Eng., Tarbiat Modarres University, Tehran

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (نویسنده مسئول) ۸۸۰۱۱۸۹۸ (۰۲۱) Sa.Mehdizadeh@gmail.com
- ۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ذره پرداخت. در مدل وی نیروهای غوطه‌وری، لیفت و دراگ تعیین شده و از نیروهایی که به‌خاطر شتاب جریان آب ایجاد می‌شوند، صرف‌نظر شده‌بود. وی همچنین با استفاده از داده‌های برداشت شده توسط فن بیک^۹ و لوک^{۱۰} دو پارامتر ضریب زبری معادل (k_s) و ضریب لیفت (α_L) را کالیبره نموده و به‌اعتبار بخشی مدل خود پرداخت. پس از وی نیز محققانی نظیر سکین^{۱۱} و کیکاوا^{۱۲} در سال ۱۹۹۲، لی^{۱۳} و سو^{۱۴} در سال ۱۹۹۴، هو^{۱۵} و هویی^{۱۶} در سال ۱۹۹۶ و نینو^{۱۷} و گارسیا^{۱۸} در سال ۱۹۹۸ به توسعه مدل تئوری جهش تک ذره پرداختند و جزئیات بیشتری از حل لاگرانژی مسیر حرکت ذره از جمله شرایط مرزی اعمالی و نیروهای هیدرودینامیکی وارده، ارائه نمودند [۴-۷].

به‌عنوان مثال لی و سو در مدل تئوری خود با اضافه نمودن نیروی لیفت مگنس ناشی از اثر چرخش ذره، نشان دادند که بر طول و ارتفاع جهش ذره به‌ترتیب ۱۲ و ۶ درصد افزوده خواهد شد و بنابراین نمی‌توان آن را نادیده گرفت. از تحقیقات صورت پذیرفته در دهه اخیر نیز می‌توان به مدل آزمایشگاهی انسی و همکاران^{۱۹} و مدل تئوری - آزمایشگاهی لی و همکاران اشاره نمود [۹، ۱۰، ۱۱]. انسی و همکاران برای بررسی دو بعدی حرکت ذره کروی در یک جریان فوق‌بحرانی با شیب تند بستر، عرض کانال را تنها یک میلی‌متر بیشتر از قطر ذره انتخاب نمودند. به‌دلیل عرض کم کانال و تأثیرپذیری جریان از دیواره‌ها، عدد رینولدز جریان در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده‌است. طبق نتایج کار این محققان، پارامتر شیلدز^{۲۰} بحرانی (τ_{*cr})، از مقادیر بیان شده توسط شیلدز و دیگر محققان پایین‌تر بود. آنها این امر را به هندسه ذره مرتبط دانستند. زیرا اکثر محققان قبلی از ذرات طبیعی استفاده کرده بودند. آنها همچنین برای مرز بین حرکت غلتشی ذره و تبدیل آن به حرکت جهشی از این پارامتر استفاده نموده و نشان دادند که زمانی که این پارامتر بی‌بعد از ۰/۰۳ بیشتر گردد، این تبدیل رخ خواهد داد.

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 به‌صورت تابعی از طول و ارتفاع جهش ذره بیان کرد.

رسوبات، مواد شکسته ریز شده‌ای هستند که از لحاظ فیزیکی و شیمیایی، به دنبال از هم پاشیدگی تخته سنگ‌ها بر روی زمین ایجاد می‌شوند. دامنه اندازه این ذرات متغیر و شکل آنها نیز از دانه‌های گردگوشه تا زاویه دار متغیر است. ذرات رسوبی جدا شده می‌توانند تحت اثر نیروی ثقل، باد یا آب انتقال یابند. حرکت ذرات در آب به‌صورت غلتش (لغزش)^۱، جهش^۲ و حرکت به‌صورت بار معلق انجام می‌گیرد. هنگامی که سرعت برشی بستر جریان از مقدار بحرانی خود فراتر رود، حرکت رسوبات به‌صورت غلتش یا لغزش آغاز می‌شود. با افزایش سرعت برشی بستر، ذرات رسوبی در طول بستر با ایجاد جهش به‌حرکت خود ادامه داده و زمانی که سرعت برشی بستر از سرعت سقوط ذرات بیشتر گردد، این ذرات از جای خود بلند شده و نیروهای آشفتگی بر نیروی غوطه‌وری غلبه خواهد کرد و سبب معلق شدن این ذرات می‌گردد. در اغلب موارد، حرکت رسوبات به‌صورت غلتشی و جهشی، انتقال بار بستر و حرکت ذرات به‌صورت معلق، انتقال بار معلق نامیده می‌شود. محققان بسیاری از جمله اینشتین^۳ در سال ۱۹۴۲ و وایبرگ^۴ و اسمیت^۵ در سال ۱۹۸۷ نشان داده‌اند که اکثر حرکت رسوبات بستر به‌صورت جهش است [۱]. بنابراین آگاهی از مشخصه‌های جهش ذرات بستر و چگونگی ارتباط آنها با شرایط جریان، در قانونمند کردن حرکت بار بستر بسیار موثر است.

تاکنون حرکت جهشی ذرات در بستر کانال مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. اینشتین در سال ۱۹۴۲ انتقال بار بستر را انتقال ذرات رسوبی دانست که در لایه باریکی به ضخامت دو برابر قطر ذرات بالای بستر به‌صورت جهش، غلتش یا لغزش وجود دارند. وی همچنین فرض نمود متوسط فاصله‌ای که هر ذره در نزدیکی بستر طی خواهد کرد ۱۰۰ برابر قطر ذره بوده و مستقل از شرایط جریان است [۲]. ایت^۶ و فرانسیس^۷ در سال ۱۹۷۹ انتقال رسوب به‌صورت جهش را به لایه‌ای با ضخامت ۱۰ برابر قطر ذره محدود نمودند. سپس با تحلیل نیروهای وارد بر ذرات نشان دادند که در این لایه، اثر نیروی ثقل ذره حاکم است و عامل شروع جهش ذره، تنش برشی کف می‌باشد. آزمایش‌های آنها همچنین نشان می‌داد که جهش ذره در جریان ورقه‌ای نیز به‌وقوع می‌پیوندد، به این معنی که پدیده جهش ذره نتیجه نیروهای آشفتگی نیست [۳]. فن راین^۸ در سال ۱۹۸۴ به ارائه مدل عددی مسیر یک گام جهش تک

⁹ Van Beek
¹⁰ Luque
¹¹ Sekine
¹² Kikkawa
¹³ Lee
¹⁴ Hsu
¹⁵ Hu
¹⁶ Hui
¹⁷ Nino
¹⁸ Garcia
¹⁹ Ancey et al.
²⁰ Shields Parameter

¹ Rolling or Sliding
² Saltation
³ Einstein
⁴ Wiberg
⁵ Smith
⁶ Abbot
⁷ Francis
⁸ Van Rijn

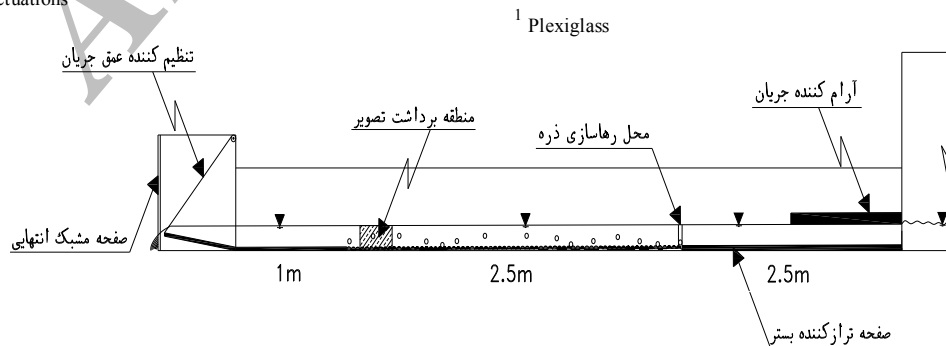
به عدم تغییرات پروفیل طولی سرعت (شرط توسعه یافتگی)، پنج متر لحاظ شد. محل رها نمودن تک ذره و آغاز حرکت آن در دو متری بالادست منطقه تصویربرداری قرار داشت. ذره توسط یک لوله باریک به داخل آب برده شد و بر روی کف قرار گرفت و سپس رها شد. از آنجایی که برداشت سرعت جریان در محور وسط کانال صورت پذیرفته بنابراین برای رها سازی ذره باید دقت نمود که دقیقاً از محور وسط کانال شروع به حرکت نماید. برای برداشت جهش ذره از دوربین سرعت بالای Super 10kc Fastcam ساخت شرکت فوترون^۲ استفاده شد که قابلیت برداشت تصاویر با ۲۵۰ فریم بر ثانیه و وضوح ۵۱۲×۴۸۰ پیکسل را داراست (شکل ۲).

قبل از شروع آزمایش ابتدا باید از عمود بودن دوربین نسبت به کانال اطمینان حاصل کرد. زاویه دار بودن دوربین نسبت به کانال سبب کاهش در برآورد ارتفاع و طول جهش حقیقی خواهد شد و محاسبات مربوط به این دو پارامتر را با خطا مواجه می نماید. به این منظور از صفحه مدرج جداره پشتی کانال کمک گرفته شد و پایه دوربین در تراز تنظیم گردید که دو خط عمود بر هم در تصویر برداشت شده از صفحه، کاملاً در تراز افقی و عمودی قرار گیرند و همچنین بستر کانال در تصویر برداشتی قابل مشاهده باشد. تصاویر پس از ذخیره سازی در رایانه، با استفاده از کدی که به زبان مطلب نوشته شده، پردازش شد و داده های لازم از آن استخراج شد. اساس کار این برنامه بر مبنای تغییر رنگ ایجاد شده در اثر جابجایی ذره در صفحه تصویر است. برای آگاهی از شرایط آشفتگی جریان و محاسبه تنش بستر، از سیستم PIV ساخت شرکت دنتک دینامیک^۳ بهره گرفته شد و پس از برداشت پروفیل سرعت، با استفاده از نسخه ۴/۴۱/۱۱ نرم افزار Flow Manager، سرعت متوسط و میزان نوسانات^۴ آن در یک بازه زمانی و پس از آن تنش رینولدز و در نهایت تنش نهایی بستر محاسبه شد.

² Photron

³ Dantec Dynamics Particle Image Velocimetry Nd:Yag laser system 400 mj per pulse and 532 nm wave length

⁴ Velocity Fluctuations



شکل ۱- جزئیات کانال مورد استفاده در آزمایش ها

بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی یا عددی برای ردیابی حرکت ذرات در نزدیکی بستر و مشخص شدن ارتباط این مشخصه ها با شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان، امری ضروری است.

محققان به اقتضای شرایط و زمان مطالعه، مواردی را برای تکمیل نتایج آزمایشگاهی و پیشرفت در توسعه مدل عددی پیشنهاد نموده اند. در حال حاضر با توجه به توسعه تکنولوژی و تجهیزات آزمایشگاهی می توان گامهای جدیدی را در راستای شناخت پیچیدگی ها و موانع موجود در مدل سازی لاگرانژی مسیر حرکت ذره برداشت و به تخمین دبی رسوبی بستر پرداخت.

در این تحقیق سعی شد تا جزئیات بیشتر و دقیق تری از تمامی مشخصه های حرکت جهشی ذره رسوبی با استفاده از تجهیزات جدید موجود مورد بررسی قرار گیرد و با یک دید جامع تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شرایط هیدرولیکی (تغییر در عمق و دبی جریان)، تغییر در اندازه و چگالی ذره رسوبی و همچنین تغییر در زبری بستر بر روی این پدیده بررسی شود. همچنین قابل ذکر است که در این تحقیق تنش برشی بستر که پارامتر تأثیرگذار در این پدیده است، مستقیماً با اندازه گیری نوسانات سرعت (u' و v') و محاسبه تنش رینولدز ($-\rho u'v'$) با استفاده از تکنیک تصویربرداری از جریان به دست آمد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق از تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. کانال مورد استفاده در این تحقیق دارای عرض ۰/۴۴۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و طول ۶ متر بود (شکل ۱). شیب بستر کانال ۰/۰۰۲۴ و جنس دیواره ها و کف از شیشه پلکسی گلس^۱ به ضخامت ۱۰ میلی متر انتخاب شد. 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 حداکثر رشد خود رسیده و شرط توسعه یافتگی جریان ارضا گردد. این فاصله در این تحقیق با توجه

ذره جهش کننده (d_p)، قطر متوسط ذرات بستر یا زبری معادل آن (d_{50})، چگالی ذره جهش کننده (ρ_s) و ضریب شکل ذره (sf) هستند. با استفاده از تئوری π باکینگهام برای مشخصات جهش، رابطه بدون بعد زیر استفاده می شود

$$F = f_1(\tau_*, Re_*, \frac{d_{50}}{d_p}, \frac{\rho_s}{\rho}, sf, \frac{h}{d_p}) \quad (1)$$

که در این رابطه τ_* پارامتر شیلدز، Re_* رینولدز برشی ذره، d_{50} قطر متوسط ذره رسوبی، d_p قطر ذره رسوبی مورد آزمایش در خلال جهش، ρ_s چگالی ذره، ρ چگالی جریان، sf ضریب شکل ذره و h ارتفاع جریان است. Re_* و τ_* به صورت زیر تعریف می شوند

$$Re_* = u_* d_p / \nu \quad (2)$$

$$\tau_* = u_*^2 / (S_g - 1)gd_p \quad (3)$$

که در این روابط u_* سرعت برشی جریان، ν لزجت سینماتیکی جریان و S_g چگالی ویژه ذره رسوبی است. لازم به ذکر است که F به خصوصیات بدون بعد شده جهش ذره شامل طول، ارتفاع، و سرعت ذره اشاره می نماید.

از نسبت h/d_p به علت اختلاف زیاد عمق جریان و قطر ذره صرف نظر شد. همچنین در این آزمایش ها تأثیر ضریب شکل نیز دیده نشد. این ضریب برای بستر با ذرات کروی شکل بی تأثیر بوده ($sf=1$)، اما برای دو زبری بستر غیر کروی استفاده شده در این آزمایش ها مؤثر خواهد بود [۹، ۱۰، ۱۱]. در نهایت با ترکیب دو پارامتر τ_* و Re_* رابطه زیر نتیجه می شود

$$F = f_2(T_*, D_*, \frac{d_{50}}{d_p}) \quad (4)$$

که در آن T_* پارامتر بی بعد ظرفیت انتقال رسوب و D_* پارامتر بی بعد ذره است که به صورت زیر تعریف می شوند.

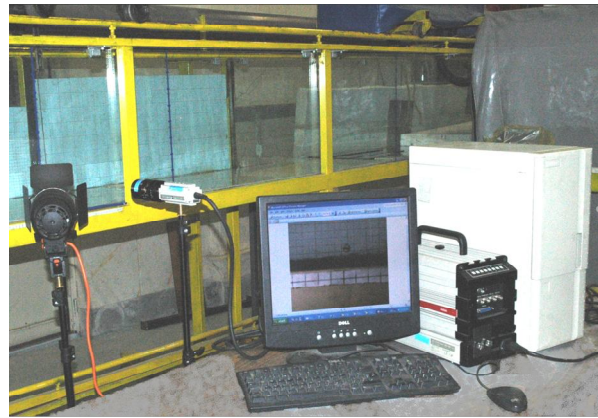
$$D_* = \left(\frac{(S_g - 1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} d_p \quad (5)$$

$$T_* = \frac{u_*^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2} \quad (6)$$

۵- تحلیل داده های آزمایشگاهی

۵-۱- آستانه بلندشدگی ذرات

از دیدگاه تئوری آستانه بلندشدگی ذره را می توان زمانی دانست که نیروی لیفت کلی وارد بر ذره بیشتر از وزن غوطه وری آن گردد. از آنجایی که نیروی لیفت به تنش برشی وابسته است، می توان از پارامتر شیلدز (τ_*) و رینولدز ذره (Re_*) به عنوان معیار بلندشدگی بهره گرفت [۱۲]. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، برای



شکل ۲- نحوه تصویربرداری از جهش تک ذره

۳- شرایط انجام آزمایش ها

آزمایش ها برای چهار شرایط مختلف جریان با تغییر در دبی و عمق انجام شد (جدول ۱). 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 بود. دامنه قطر ذرات مورد استفاده از ۴ تا ۹ میلی متر متغیر بود. این ذرات دارای سه جنس متفاوت بودند. انتخاب ذراتی با چگالی نزدیک به چگالی رسوبات طبیعی در اولویت قرار داشت. به این منظور از گلوله های کروی شکل شیشه با چگالی ۲/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب بهره گرفته شد. ذرات پلاستیکی و دلرین با چگالی های به ترتیب ۱/۰۸ و ۱/۳ نیز دو جنس دیگری بودند که از آنها در این تحقیق استفاده شد. برای بررسی تأثیر زبری بستر بر روی حرکت ذره نیز سه زبری مختلف تعریف شد. ابتدا از ذرات کروی شکل شش میلی متری از جنس شیشه و سپس از دو دانه بندی تقریباً یکنواخت ذرات سیلیسی با قطر متوسط (d_{50}) ۲/۳ و ۵/۴ میلی متری استفاده شد که در طول ۲/۵ متر و به عرض کانال بر روی شیشه پلکسی چسبانده شده و در بستر کانال قرار گرفتند.

برای تعیین قطر متوسط ذرات، نمونه ای ۲ کیلوگرمی از ذرات تهیه شده و منحنی دانه بندی آن به دست آمد. اندازه ضریب زبری در تطبیق با پروفیل سرعت برداشتی، برای ذرات کروی شکل بستر، ۰/۶۵ قطر کره و برای دو زبری دیگر دو برابر قطر متوسط ذرات بستر لحاظ شد [۸]. در نهایت مطابق با شرایط جریان و ذره، مشخصه های جهش شامل طول جهش (L)، ارتفاع جهش (H)، سرعت جهش (u_p)، زاویه برخورد به بستر (θ_{im}) و زاویه برخاستن از بستر (θ_{re}) اندازه گیری شد (جدول ۲).

۴- آنالیز ابعادی

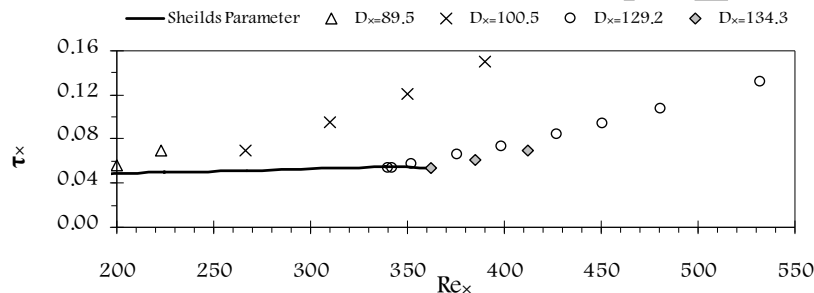
پارامترهایی که بر روی حرکت جهشی ذره تأثیر می گذارند شامل عمق جریان (h)، چگالی و لزجت سینماتیکی آب (ρ, ν)، قطر

جریان‌های آشفته، آستانه بلندشدگی ذره و معیار شیلدز برای شروع حرکت منطبق بر هم خواهند بود (شکل ۳). در این آزمایش‌ها آغاز بلندشدگی برای $\tau_* = 0.0536$ رخ داد.

۲-۵- طول و ارتفاع جهش

جدول ۲ مقادیر متوسط مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به دست آمده، طول جهش از $1/5$ برابر قطر ذره تا 25 برابر آن متغیر است. این دامنه گسترده مربوط به استفاده از ذرات سبک با چگالی $1/0.8$ است که طول جهش را افزایش داده است. دامنه تغییرات ارتفاع جهش نیز در دامنه 1 تا 6 برابر قطر ذره قرار دارد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار تغییرات این دو

مشخصه را بر حسب T_* در این آزمایش‌ها و آزمایش‌های صورت گرفته توسط لی و همکاران نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکلها نشان داده شده است با افزایش T_* بر میزان طول و ارتفاع جهش افزوده خواهد شد. داده‌های آزمایشگاهی همچنین این امر را نشان می‌دهند که با افزایش در مقدار پارامتر D_* که با افزایش قطر یا چگالی ذره رخ می‌دهد، طول و ارتفاع جهش کاهش خواهد یافت. برای مشخص شدن تأثیر زبری بستر بر روی طول و ارتفاع جهش، مقادیر این دو مشخصه در مقابل d_{50}/d_p نیز ترسیم شد (شکل ۶). مطابق شکل، با افزایش این پارامتر بر طول و ارتفاع جهش افزوده می‌گردد.



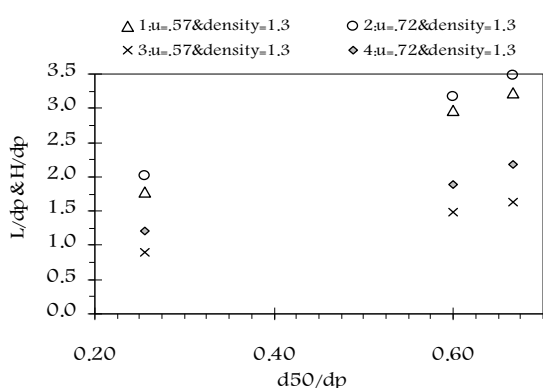
شکل ۳- نمودار تنش برشی بی‌بعد نسبت به رینولدز برشی ذره

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان و ذره و پارامترهای تأثیرگذار بر جهش

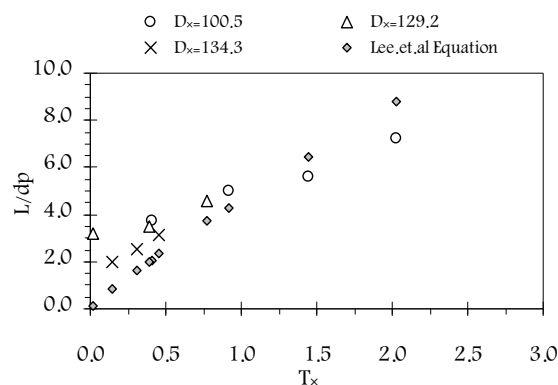
T_*	τ_{*cr}	τ_*	u_*	D_*	$\frac{d_{50}}{d_p}$	Re	Fr	\bar{u} (m/sec)	h (m)	ρ_s (kg/m ³)	d_p (m)	Run
0.41	0.0495	0.070	0.0382	100/46	0.86	67765	0.52	0.57	0.121	1302	0.007	1
0.02	0.0532	0.054	0.0382	129/16	0.67	67765	0.52	0.57	0.121	1302	0.009	2
6/26	0.0417	0.303	0.0382	55/60	1/00	67765	0.52	0.57	0.121	1080	0.006	3
0.39	0.0532	0.074	0.0445	129/16	0.67	90576	0.65	0.72	0.127	1302	0.009	4
0.92	0.0495	0.095	0.0445	100/46	0.86	90576	0.65	0.72	0.127	1302	0.007	5
0.46	0.0538	0.054	0.0445	134/27	1/00	90576	0.65	0.72	0.127	2150	0.006	6
8/87	0.0417	0.411	0.0445	55/60	1/00	90576	0.65	0.72	0.127	1080	0.006	7
1/45	0.0495	0.121	0.0503	100/46	0.86	98404	0.74	0.81	0.122	1302	0.007	8
0.31	0.0538	0.061	0.0503	134/27	1/00	98404	0.74	0.81	0.122	2150	0.006	9
11/58	0.0417	0.524	0.0503	55/60	1/00	98404	0.74	0.81	0.122	1080	0.006	10
0.17	0.0479	0.056	0.0503	89/51	1/50	98404	0.74	0.81	0.122	2150	0.004	11
0.77	0.0532	0.094	0.0503	129/16	0.67	98404	0.74	0.81	0.122	1302	0.009	12
2/03	0.0495	0.150	0.0559	100/46	0.86	118085	0.81	0.91	0.130	1302	0.007	13
0.14	0.0538	0.070	0.0560	134/27	1/00	118085	0.81	0.91	0.130	2150	0.006	14
14/57	0.0417	0.649	0.0559	55/60	1/00	118085	0.81	0.91	0.130	1080	0.006	15
0.44	0.0479	0.069	0.0559	89/51	1/50	115085	0.81	0.91	0.130	2150	0.004	16
0.08	0.0511	0.055	0.0559	111/89	1/20	118085	0.81	0.91	0.130	2150	0.005	17
0.01	0.0532	0.054	0.0379	129/16	0.60	67765	0.52	0.57	0.121	1302	0.009	18
0.59	0.0532	0.085	0.0477	129/16	0.60	90576	0.65	0.72	0.127	1302	0.009	19
1/02	0.0532	0.107	0.0537	129/16	0.60	98404	0.74	0.81	0.122	1302	0.009	20
1/47	0.0532	0.131	0.0594	129/16	0.60	118085	0.81	0.91	0.130	1302	0.009	21
0.01	0.0532	0.058	0.0376	129/16	0.26	67765	0.52	0.57	0.121	1302	0.009	22
0.23	0.0532	0.066	0.0420	129/16	0.26	90576	0.65	0.72	0.127	1302	0.009	23

جدول ۲- مقادیر متوسط مشخصه‌های جهش در آزمایش‌های مختلف

θ_{re}	θ_{im}	Up(m/s)	H(cm)	L(cm)	RUN
۲۱/۶۷	۱۳/۷۶	۰/۳۱۸	۱/۹۳	۲/۶۳	۱
۲۶/۰۵	۱۵/۴۹	۰/۲۸۳	۱/۴۶	۲/۹۰	۲
۲۴/۶۶	۸/۸۱	۰/۳۹۰	۱/۹۸	۸/۵۲	۳
۲۱/۸۷	۱۰/۷۲	۰/۲۹۳	۱/۹۷	۳/۱۳	۴
۲۵/۵۷	۱۳/۳۱	۰/۲۸۲	۲/۲۵	۳/۴۹	۵
۳۱/۴۹	۱۶/۲۳	۰/۱۴۸	۱/۱۲	۱/۸۹	۶
۲۸/۲۰	۱۲/۵۰	۰/۲۷۸	۲/۹۳	۱۰/۴۶	۷
۲۲/۷۴	۱۰/۳۳	۰/۵۱۵	۲/۳۴	۳/۹۱	۸
۲۵/۸۶	۱۵/۰۷	۰/۳۸۹	۱/۰۲	۱/۵۳	۹
۲۶/۵۴	۷/۶۱	۰/۶۴۹	۲/۹۶	۱۲/۸۹	۱۰
۲۴/۶۰	۱۶/۹۶	۰/۴۴۲	۰/۸۳	۱/۵۹	۱۱
۱۶/۶۳	۱۴/۷۱	۰/۶۴۵	۲/۳۰	۴/۱۴	۱۲
۳۰/۰۰	۱۲/۸۴	۰/۵۴۰	۲/۴۳	۵/۰۴	۱۳
۳۳/۱۹	۱۵/۸۲	۰/۴۸۲	۰/۶۱	۱/۱۹	۱۴
۱۶/۳۳	۶/۴۵	۰/۵۹۱	۳/۵۱	۱۵/۱۴	۱۵
۳۸/۱۸	۲۰/۲۱	۰/۳۸۰	۰/۸۶	۲/۳۴	۱۶
۲۹/۴۲	۲۱/۲۷	۰/۴۲۷	۱/۰۲	۱/۹۹	۱۷



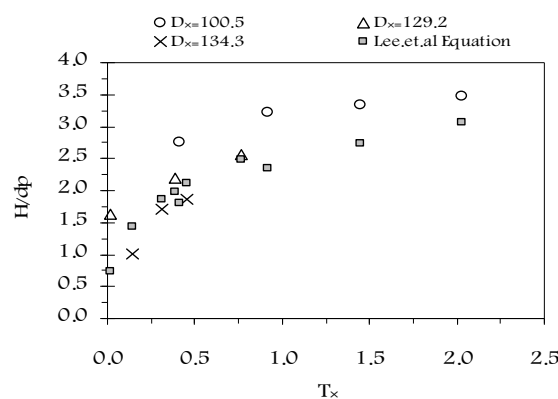
شکل ۶- نمودار طول و ارتفاع بی‌بعد شده جهش در مقابل قطر متوسط ذرات بستر (۱ و ۲: طول بی‌بعد، ۳ و ۴: ارتفاع بی‌بعد)



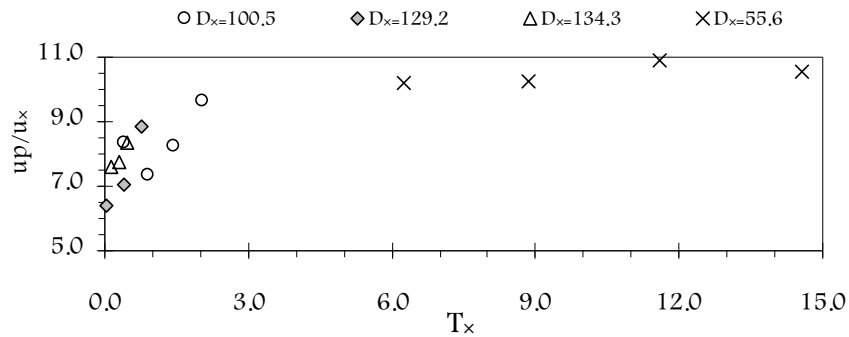
شکل ۴- نمودار طول بی‌بعد شده جهش در مقابل شدت انتقال رسوب

۵-۳- سرعت جهش

سرعت متوسط ذره در خلال جهش، با محاسبه میزان جابه‌جایی ذره در دو عکس متوالی و تقسیم آن بر زمان بین دو فریم به‌دست آمد و با تقسیم بر سرعت برشی جریان، بی‌بعد شد. ارتباط این پارامتر بی‌بعد با شدت انتقال رسوب بی‌بعد (T_x) و برای D_x های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش T_x ، مقدار u_p/u_* افزایش می‌یابد. دامنه تغییرات سرعت متوسط ذره بین ۶ تا ۱۱ برابر سرعت برشی به‌دست آمد.



شکل ۵- نمودار ارتفاع بی‌بعد شده جهش در مقابل شدت انتقال رسوب



شکل ۷- نمودار سرعت متوسط بی‌بعد شده جهش نسبت به شدت انتقال بی‌بعد

جدول ۳- مقادیر بی‌بعد مؤلفه‌های سرعت اولیه جهش در آزمایش‌های مختلف

RUN	u_{po}/u_*	v_{po}/u_*
۱	۶/۰۸	۲/۶۹
۲	۴/۶۹	۲/۱۸
۳	۴/۹۱	۲/۱۳
۴	۴/۰۳	۱/۶۸
۵	۳/۹۹	۲/۱۷
۶	۷/۲۰	۱/۳۶
۷	۷/۷۴	۳/۱۸
۸	۶/۲۸	۳/۳۵
۹	۶/۰۷	۲/۹۹
۱۰	۴/۴۵	۲/۹۷
۱۱	۶/۴۲	۲/۴۷
۱۲	۷/۷۴	۳/۱۸
۱۳	۶/۳۲	۳/۹۵
۱۴	۴/۴۵	۲/۹۷
۱۵	۷/۶۳	۲/۴۰
۱۶	۳/۳۱	۲/۲۹

۴-۵- زوایای برخورد و بلندشدگی

زاویه برخورد ذره به بستر (θ_{im}) و بلندشدگی متناظر آن (θ_{re}) نسبت به خط افقی موازی بستر، اندازه‌گیری شده و سپس نمودار این دو زاویه نسبت به یکدیگر ترسیم شده است (شکل‌های ۸ و ۹). همانطور که مشخص است تجمع مقادیر زوایا در نزدیکی خط $y = 2x$ بیشتر است و این به آن معنی است که زاویه بلندشدگی ذرات را می‌توان تقریباً دو برابر زاویه برخورد به بستر متناظر دانست. داده‌های برداشتی نشان می‌دهند که مقادیر میانگین این دو زاویه با افزایش T_* تمایل به کاهش دارند. برپایه آزمایش‌های صورت گرفته، زاویه برخورد به بستر در دامنه $21^\circ \leq \theta_{im} \leq 6/5^\circ$ و همچنین زاویه بلندشدگی ذره در دامنه $38^\circ \leq \theta_{re} \leq 16/5^\circ$ قرار دارد.

برای حل عددی معادلات جهش ذرات و به‌دست آوردن مسیر حرکت و یا سایر مشخصه‌های آن، لازم است که سرعت‌های اولیه جهش در هر دو جهت افقی و قائم مشخص باشند و به‌عنوان شرط اولیه در حل وارد گردند. بنابراین پس از محاسبه سرعت ذره در لحظه بلندشدگی از بستر و با مشخص بودن زاویه بلندشدگی ذره، مؤلفه‌های سرعت به‌صورت زیر به‌دست آمد

$$\begin{aligned} u_{po} &= U_{po} \cos(\theta_{re}) \\ v_{po} &= U_{po} \sin(\theta_{re}) \end{aligned} \quad (7)$$

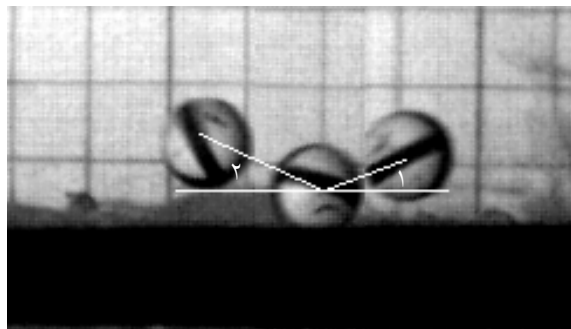
که در آن

U_{po} و v_{po} به ترتیب مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت در لحظه بلندشدگی و θ_{re} نیز زاویه برخاستن از بستر است. در جدول ۳ اندازه این دو مشخصه بی‌بعد شده (u_{po}/u_* و v_{po}/u_*) برای آزمایش‌های مختلف ارائه شده است. این نتایج، مؤلفه افقی سرعت بلندشدگی را ۳ تا ۸ برابر سرعت برشی و مؤلفه قائم آن را ۱/۵ تا ۳/۵ برابر سرعت برشی نشان می‌دهند که با مقادیر لحاظ شده در مطالعات عددی صورت گرفته توسط بعضی از محققان متفاوت است. ایت و فرانسیس در سال ۱۹۷۹ این دو نسبت را تقریباً برابر ۲ فرض نمودند. وایت^۱ و شولدز^۲ در سال ۱۹۷۷ این دو مؤلفه را ۲ تا ۲/۵ برابر سرعت برشی دانسته‌اند [۱]. در مدل عددی ارائه شده توسط فن راین در سال ۱۹۸۴ نیز هر دو این مؤلفه‌ها برابر $2u_*$ لحاظ شده است [۲]. اما در نتایج آزمایشگاهی هو و هویی در سال ۱۹۹۶، مؤلفه افقی سرعت اولیه تا ۹ برابر سرعت برشی نیز به‌دست آمده است که مقادیر این نسبت‌ها با افزایش T_* روند افزایشی را نشان می‌دهد. این امر تا حدود زیادی مطابق با نتایج تحقیق حاضر است.

¹ White

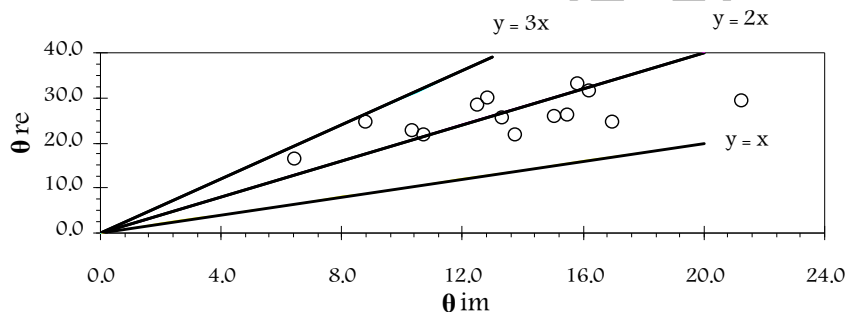
² Schulz

لیفت، نیروی اصلی در بلندشدگی ذرات از کف به شمار می‌رود. در محاسبه این نیرو، سرعت‌های قبل و پس از برخورد نقش دارند. در هوا معمولاً سرعت ذره پس از برخورد از سرعت قبل از برخورد کوچک‌تر است. e ضریب ارتجاعی، به صورت نسبت این دو سرعت تعریف می‌گردد که می‌توان آنرا به دو مؤلفه تجزیه نمود: $e_x = u_{po} / u_{pe}$ و $e_y = v_{po} / v_{pe}$. برای جهش ذره در داخل آب جاری اندازه e_y از یک بزرگ‌تر است و این به آن معنی است که پس از برخورد، نیروی لیفت باید تأثیر خود را بر روی ذره گذاشته باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارتباط e_x و e_y را با تنش برشی بی‌بعد نشان می‌دهند. نزدیکی مقادیر داده‌ها به همدیگر حاکی از این است که شدت انتقال (τ_*)، تأثیر بسیار اندکی بر روی آنها گذاشته به طوری که با افزایش آن، این دو مشخصه تقریباً ثابت مانده‌اند.

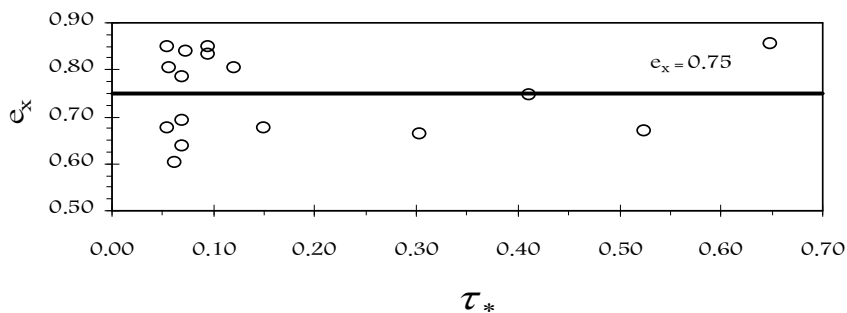


شکل ۸- نحوه محاسبه زوایای برخورد ($\theta_{im}:1$) و بلندشدگی از بستر ($\theta_{re}:2$)

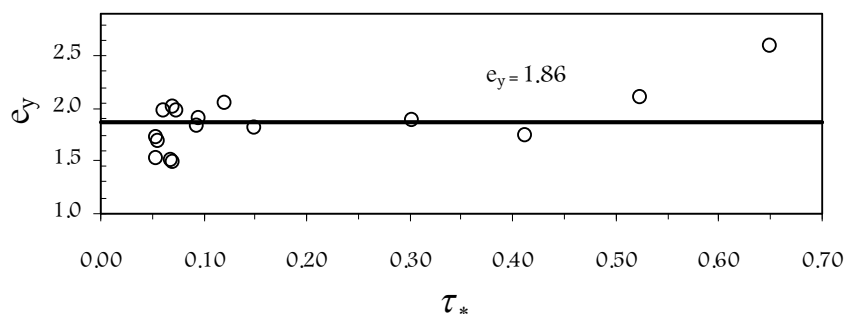
در بررسی پدیده جهش ذره، مشاهده شده‌است که اکثر ذرات پس از برخورد به بستر شروع به جهش بعدی می‌نمایند. نیروی



شکل ۹- مقادیر زاویه برخورد به بستر و بلندشدگی متناظر آن



شکل ۱۰- نمودار مؤلفه افقی ضریب ارتجاعی نسبت به تنش برشی بی‌بعد



شکل ۱۱- نمودار مؤلفه قائم ضریب ارتجاعی نسبت به تنش برشی بی‌بعد

۶- نتیجه‌گیری

نیز زیاد می‌شود. دامنه تغییرات سرعت متوسط از ۶ تا ۱۱ برابر سرعت برشی به‌دست آمد. نتایج آزمایشگاهی، مؤلفه افقی سرعت در لحظه بلندشدگی را ۳ تا ۸ برابر سرعت برشی و مؤلفه قائم آن را ۱/۵ تا ۳/۵ برابر سرعت برشی نشان داد که این مقادیر با مقادیر فرض شده در تحلیل تئوری دیگر محققان متفاوت است. زاویه بلندشدگی ذره از بستر را می‌توان تقریباً دو برابر زاویه برخورد متناظر دانست. مقدار میانگین این دو زاویه با افزایش T_* تمایل به کاهش را نشان می‌دهند. دامنه تغییرات این زوایا نیز بین ۶/۵ تا ۲۱ درجه برای برخورد و ۱۶/۵ تا ۳۸ درجه برای بلندشدگی متغیر است. نتایج تحلیل همچنین نشان می‌دهند که پارامتر شیلدز (τ_*) یا تغییر در شرایط جریان تأثیر بسیار اندکی بر روی مؤلفه‌های افقی و قائم ضریب ارتجاعی دارد به‌طوری که با افزایش آن، مقدار این دو مشخصه تقریباً ثابت ماند ($e_x = 0.75$ و $e_y = 1.85$).

در این تحقیق با استفاده از یک سیستم تصویربرداری سرعت بالا، مشخصه‌های جهش تک ذره شامل طول، ارتفاع، سرعت و زوایای برخورد و بلندشدگی آن اندازه‌گیری شد و ارتباط آنها با تنش بستر، سرعت جریان، قطر و چگالی ذره و زبری بستر نشان داده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که طول جهش محاسبه شده از ۱/۵ برابر قطر ذره تا ۲۵ برابر آن متغیر بوده و ارتفاع جهش نیز در دامنه ۱ تا ۶ برابری قطر ذره قرار داشته‌است. با تعریف پارامتر T_* به صورت $T_* = (\tau_* - \tau_{*cr}) / \tau_{*cr}$ نشان داده شده که با افزایش این پارامتر بر طول و ارتفاع جهش افزوده می‌شود و با افزایش قطر و چگالی ذره از طول و ارتفاع جهش کاسته می‌گردد. نتایج تحلیلهای صورت گرفته همچنین نشان داد که با افزایش قطر متوسط ذرات بستر (d_{50})، طول و ارتفاع جهش افزایش می‌یابد. با افزایش T_* ، مقدار سرعت ذره

۷- مراجع

- 1- Hu, Ch., and Hui, Y. (1996). "Bed-load transport. I: Mechanical characteristics." *J. Hydraulic Eng.*, 122(5), 245-254.
- 2- Van Rijn, C. L. (1984). "Sediment transport, part 1: Bed load transport." *J. Hydraulic Eng.*, 110(10), 1431-1456.
- 3- Van Rijn, L. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, 1st Ed., Aqua Pub., Netherlands.
- 4- Sekine, M., and Kikkawa, H. (1992). "Mechanics of saltating grains. II." *J. Hydraulic Eng.*, 118(4), 536-558.
- 5- Lee, H., and Hsu, I. (1994). "Investigation of saltating particle motions." *J. Hydraulic Eng.*, 120(7), 831-845.
- 6- Nino, Y., and Garcia, M. (1998). "Experiments on saltation of sand in water." *J. Hydraulic Eng.*, 124(10), 1014-1025.
- 7- Nino, Y., and Garcia, M. (1998). "Using lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modeling." *Hydrological Processes*, 12, 1197-1218.
- 8- Ancy, Ch., and Bigillon, F., Frey, P.H., and Ductet, R. (2002). "Saltation motion of a bead in a rapid water stream." *Physical Review E*, 66 (3), 1-16.
- 9- Lee, H., Chen, Y. H., You, J. Y., and Lin, Y. T. (2000). "Investigation of continuous bed load saltating process." *J. Hydraulic Eng.*, 126(9), 691-700.
- 10- Lee, H., 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. Hydraulic Research*, 44(3), 374-389.
- 11- Lee, H., You, J. Y., and Lin, Y. T. (2002). "Continuous saltating process of multiple sediment particles." *J. Hydraulic Eng.*, 128(4), 443-450.
- 12- Ling, Ch. (1995). "Criteria for incipient motion of spherical sediment particles" *J. Hydraulic Eng.*, 121(6), 472-478.