

# شبیه‌سازی و بررسی اثر عوامل مؤثر بر حرکت تصادفی ذرات رسوب بار بستر در جریان ماندگار

سعید کبورانی<sup>۱</sup>، احمد شانه‌ساززاده<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی

۲- استادیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان

a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۲۴

**چکیده** - بررسی انتقال رسوب در مقیاس حرکت ذرات باعث شناخت بهتر پدیده‌ی انتقال رسوب و تعیین نرخ آن در محیط‌های رودخانه و دریا می‌شود. ذرات رسوب به‌طور معمول به دو صورت بار معلق و بار بستر تحت تأثیر جریان و یا امواج، منتقل می‌شوند. بار بستر به‌صورت‌های لغزش، غلتش و پرش انتقال پیدا می‌کند که در میان آن‌ها پرش غالب است. در فرایند پرش عوامل متعددی تأثیرگذارند، اما به دلیل روشن نبودن کامل این عوامل، پدیده‌ی پرش ذره تاحدی تصادفی در نظر گرفته می‌شود. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به اثر شکل ذره، محل قرارگیری آن و آشفتگی جریان اشاره نمود. در این مقاله میزان پرش ذرات و سرعت متوسط آن‌ها و تأثیر عوامل یاد شده بر آن در جریان ماندگار با استفاده از مدل ریاضی بررسی می‌شود. از عواملی که به‌طور ویژه توجه شده، تأثیر شکل ذرات و محل قرارگیری آن بر طول و سرعت پرش ذره است. همچنین یک رابطه‌ی منطقی بین سرعت و زاویه اولیه‌ی پرش و محل قرارگیری آن در بستر برقرار شده است. از نتایج مطالعات حاضر، در شناخت و تخمین دقیق‌تر رفتار و نرخ رسوب بستر استفاده می‌شود.

**واژگان کلیدی:** پرش، شکل ذره، محل قرارگیری ذره، جریان ماندگار، بار بستر

## ۱- مقدمه

پدیده‌ی انتقال رسوب از مسائل پیچیده‌ی طبیعت است که بررسی آن فیزیک‌دانان و مهندسان را با چالش بزرگی روبه‌رو کرده است.

از این رو بررسی رفتار ذرات رسوب کماکان از موضوعات روز تحقیقات هیدرولیک رسوب است [۱]، [۲]. در این نوشتار به بررسی رفتار ذرات رسوب در بار بستر در

حالت پرش<sup>۱</sup> و به‌طور ویژه بررسی عوامل مختلف در رفتار تصادفی ذرات پرداخته می‌شود.

پدیده‌ی پرش را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. ۱- ذره‌ی ساکنی که در جریان سیال قرار گرفته و نیروهای وارده بر آن به مرز حالت بحرانی می‌رسد و ذره به حرکت درمی‌آید. ۲- شرایطی که ذره بدون تماس با بستر در لایه‌ی موسوم به لایه‌ی پرش<sup>۲</sup> در حال حرکت است. ۳-

1- Saltation

2- Saltation Layer

این پدیده با همین روش به‌وسیله‌ی Owen (1964) در جریان باد بررسی شده است (بر اساس مرجع [5]). مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد در شرایط جریان مشابه ذره‌ی رسوب رفتار فیزیکی متفاوتی را تجربه می‌کند [7]. تصادفی بودن رفتار ذرات اعم از طول پرش و سرعت آن در پرش‌های بار بستر متأثر از عواملی است که بررسی آن برای شناخت میزان انتقال رسوب حائز اهمیت بوده و از این‌رو موضوع مطالعات حاضر است. ابتدا ضمن معرفی نیروهای مهم وارد بر ذره در جریان ماندگار معادله‌ی حرکت ذره در هنگام پرش به‌دست می‌آید. نیروهای وارد بر ذره در حال حرکت شامل نیروی وزن، نیروی شناوری، نیروی درگ، نیروی لیفت، نیروی ناشی از جرم افزوده است. نیروهای دیگری نیز از قبیل نیروی لیفت ناشی از چرخش ذره بر ذره وارد می‌شود که در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارند [4]. با شبیه‌سازی عددی حرکت ذره‌ی رسوب در بار بستر و در حالت پرش، امکان ارزیابی عوامل مختلفی که در طول پرش تأثیر می‌گذارند فراهم می‌شود. در این راستا به‌طور ویژه اثر شکل ذره و موقعیت اولیه‌ی قرارگیری آن بر طول پرش و سرعت اولیه‌ی آن بررسی شده است. تأثیر پروفیل سرعت سیال بر رسوب در هنگام حرکت نیز از جمله مزیت‌های این مطالعه است.

## ۲- معادلات پرش ذرات در بار بستر

حرکت ذره از قانون دوم نیوتن به فرم زیر تبعیت می‌کند:

$$ma = F_g + F_D + F_L + F_{add} \quad (1)$$

که در آن  $m$  جرم ذره،  $a$  شتاب ذره،  $F_g$  نیروی وزن وارد بر ذره،  $F_D$  نیروی درگ (پیش‌ران)،  $F_L$  نیروی لیفت (بالابر) و  $F_{add}$  نیروی جرم افزوده است [3].  
نیروی وزن: نیروی وزن ناشی از وزن ذره و نیروی

مرحله‌ای که ذره به بستر برخورد می‌کند و تکانه‌ی خود را به ذرات بستر انتقال می‌دهد [3]. در پژوهش حاضر از آنجا که پرش تنها یک ذره بررسی می‌شود، از این رو تنها دو مرحله‌ی اول از پرش در نظر گرفته می‌شود.

تاکنون تحقیقات زیادی روی پدیده‌ی پرش ذره‌ی رسوب انجام شده است. (Enstein (1950) ضخامت لایه‌ی انتقال بار بستر را حدود ۲ برابر قطر و طول پرش ذره را ۱۰۰ برابر قطر آن تخمین زد. هم‌چنین او طول پرش ذره را تابعی از ابعاد، شکل و شرایط هیدرولیکی دانست [4]. Bagnold (1966) بر اساس مرجع فوق پرش ذره را متأثر از وزن ذره دید و اثر آشفتگی جریان را در این پدیده بااهمیت یافت. Van Rijn (1984) با حل معادله‌ی حرکت ذره در حالت پرش، برای تخمین بار بستر از خصوصیات پرش ذره استفاده کرد [4].

باید توجه داشت که ذره‌ی رسوب قبل از پرش می‌تواند به‌صورت غلتش به حرکت در آمده باشد. از این‌رو فرایند پرش می‌تواند یکباره به‌صورت ابتدایی با سرعت اولیه‌ی صفر و یا مقادیر بیش‌تر از آن (ناشی از غلتش و یا لغزش) شروع شود. هم‌چنین زاویه‌ی اولیه‌ی متأثر از جایگاه نسبی ذرات نسبت به یکدیگر است.

Lee, Wiberg & Smith (1985) و همکاران (1994) و Lee و همکاران (2001) به‌طور مشابه به حل معادله‌ی حرکت رسوب پرداخته‌اند [5]، [9]، [10]. در مطالعات ایشان نیروهای مؤثر از جمله نیروی پیش‌ران (درگ) بر اساس یافته‌های جدیدتر تدقیق شده است. به‌عنوان نمونه Wiberg & Smith (1985) در مطالعات خود آثار لیفت چرخشی و شکل (Form Lift و Magnus Lift) را نیز دیده‌اند، هرچند آثار آن ناچیز در نظر گرفته می‌شود [5]. از سوی دیگر محققین زیادی برای پی بردن به پدیده‌ی پرش ذره از روش عکس‌برداری سریع استفاده کردند (Francis & Abott, 1977) [10]. هم‌چنین

شناوری ذره در سیال است.

که در آن  $R$  عدد رینولدز ذره،  $\beta$  ضریب شکل ذره و  $a$  و  $b$  و  $c$  ابعاد اصلی ذره است [۶].

$$F_g = [\rho_s - \rho] V_s g \quad (2)$$

نیروی لیفت یا بالابر: نیروی Lift برشی را به صورت زیر می توان نوشت [۴].

که در آن  $\rho_s$  چگالی ذره،  $\rho$  چگالی آب،  $V_s$  حجم ذره و  $g$  شتاب جاذبه است [۴].

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (7)$$

نیروی درگ: نیروی درگ تابعی از سطح مقطع جسم در مقابل جریان، سرعت جریان و چگالی سیال است.

$V$  در رابطه‌ی درگ و لیفت همان سرعت نسبی ذره نسبت به جریان است. بر اساس مطالعات van Rijn (1984) ضریب  $C_L$  به صورت زیر قابل بیان است.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} CL = 1.6 &\longleftrightarrow R_* \leq 5 \\ CL = 20 &\longleftrightarrow R_* \geq 70 \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن  $C_D$  ضریب درگ،  $A$  حجم ذره،  $V$  سرعت نسبی ذره است (رابطه‌ی ۱۱).

نیروی ناشی از جرم افزوده

در تحقیق حاضر از رابطه‌ای که توسط Swamee & Ojha (1991) ارائه داده، استفاده شده است [۶].

$$F_V = C_M \rho V \frac{\partial \langle V_r \rangle}{\partial t} \quad (9)$$

آنها این رابطه را برای ذرات کروی به صورت زیر ارائه کردند.

در رابطه‌ی بالا  $Vr$  اختلاف سرعت سیال و سرعت ذره،  $C_M$  ضریب جرم افزوده و  $V$  حجم ذره است. [۱۰].

$$C_D = 0.84 \left[ \frac{33.78}{(1 + 4.5 \beta^{0.35})^{0.7} R^{0.56}} + \left( \frac{R}{R + 700 + 1000 \beta} \right)^{0.28} \times \frac{1}{(\beta^4 + 20 \beta^{20})^{0.175}} \right]^{1.428} \quad (4)$$

**حل مسئله:** برای ساده‌تر کردن مسئله می توان معادله‌ی حرکت (معادله‌ی ۱) را در راستای  $X$  و  $Y$  تجزیه نمود (معادله‌ی ۱۰). در این معادله نیروهای درگ و لیفت نیز در هر جهت براساس زاویه‌ی حرکت ذره تجزیه شده‌اند. در رابطه‌ی زیر اثر نیروی جرم افزوده به صورت جرم در مقدار  $m$  گنجانده شده است.

و برای ذرات تیزگوشه نیز رابطه‌ی (۵) ارائه شد.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_D \left( \frac{u - \dot{x}}{V_r} \right) + F_L \left( \frac{\dot{z}}{V_r} \right) + F_g \sin \varphi \\ m\ddot{z} = F_L \left( \frac{u - \dot{x}}{V_r} \right) + F_D \left( \frac{\dot{z}}{V_r} \right) - F_g \cos \varphi \end{cases} \quad (10)$$

$$C_D = 0.84 \left[ \frac{48.5}{(1 + 4.5 \beta^{0.35})^{0.8} R^{0.64}} + \left( \frac{R}{R + 100 + 1000 \beta} \right)^{0.32} \times \frac{1}{(\beta^{18} + 1.05 \beta^{0.8})} \right]^{1.25} \quad (5)$$

در رابطه‌ی بالا از سرعت نسبی ذره نسبت به جریان استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (6)$$

مکان صفر سرعت جریان در نظر گرفت. هم‌چنین در مطالعات گذشته سرعت‌های اولیه‌ی مختلفی برای شروع حرکت ذره در نظر گرفته شده است. زاویه‌ی اولیه‌ی بلند شدن ذره از روی بستر نیز در تعیین سرعت اولیه اهمیت دارد. در این پژوهش سرعت‌ها و زوایای اولیه‌ی مختلفی بررسی و تأثیر آن‌ها بر طول پرش و سرعت متوسط ذره مطالعه شده است. ولی بر طبق آزمایشهای van Rijn (1984) زاویه‌ی ۴۵ با سرعت  $2u^*$  به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود [۴].

#### ۴- مدل سازی عددی

ساختار کلی مدل به دو بخش تقسیم می‌شود. در قسمت اولیه ضمن معرفی پارامترهای لازم به محاسبات اولیه برای ساده‌سازی حل عددی پرداخته می‌شود و در قسمت‌های بعد وارد روش عددی حل رانگ‌کوتای مرتبه‌ی ۴ شده و خروجی‌های مدل (مکان و سرعت ذره) مشخص می‌شود. در قسمت اولیه حلقه‌ای در برنامه وجود دارد که تعیین می‌کند آیا ذره در شرایط ناپایداری قرار دارد که شروع به حرکت کند. پس از آن وارد حلقه‌ای می‌شویم که نیروهای وارد بر ذره تعیین می‌شود. با توجه به این نیروها، معادله‌های حرکت حل و نقطه‌ی بعدی حدس زده می‌شود، سپس در مکان و سرعت جدید بار دیگر نیروهای وارد بر ذره تعیین می‌شود و همین‌طور حل پیش می‌رود تا ذره دوباره به بستر برخورد کند. در این زمان برنامه طول پرش و ارتفاع پرش را محاسبه می‌کند [۱۲].

شکل ۱ نتایج مدل عددی به صورت پارامترهای بدون بعد  $X/D$  و  $Z/D$  که به ترتیب نسبت طول آن و ارتفاع پرش به قطر ذره هستند را برای سه قطر مختلف ذره نمایش می‌دهد.

$$V_r = \sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{z}^2} \quad (11)$$

در روابط بالا  $u$  سرعت سیال و  $\dot{x}$  سرعت ذره در راستای  $x$  و  $\dot{z}$  سرعت ذره در راستای  $z$  است.

### ۳- توسعه‌ی مدل عددی برای شبه‌سازی حرکت ذرات

معادله‌ی کلی حرکت (۱۰) را با جاگذاری مقادیر نیروها می‌توان به شکل ساده‌تر زیر ارائه کرد:

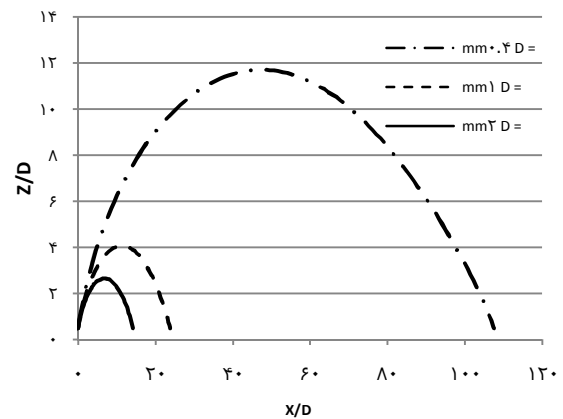
$$\begin{cases} A\ddot{x} - BC_L \dot{z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{0.5} - C.C_D V_r (u - \dot{x}) = 0 \\ A\ddot{z} - BC_L (u - \dot{x}) \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{0.5} - C.C_D V_r \dot{z} - E = 0 \end{cases} \quad (12)$$

با استفاده از کاهش مرتبه‌ی معادله‌ی دیفرانسیل بالا می‌توان به دستگاه معادله‌ی دیفرانسیل درجه‌ی یک رسید. برای حل چنین دستگاه معادله‌ی دیفرانسیلی به روشی عددی نیاز داریم. مناسب‌ترین روش، روش رانگ‌کوتای مرتبه‌ی ۴ است. در این روش با داشتن نقطه‌ی اولیه و تابع مورد نظر می‌توان نقطه‌ی بعدی منحنی را حدس زد. از این رو لازم است تا شرایط اولیه برای حل معادله‌ی حرکت را در دست داشته باشیم [۸]. مکان اولیه و سرعت اولیه‌ی ذره به عنوان شرایط اولیه در دو جهت  $x$  و  $y$  در نظر گرفته می‌شود.  $x$  اولیه‌ی ذره صفر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که مرکز ذره در چه ترازی قرار دارد، ارتفاع اولیه‌ی ذره معلوم می‌شود. ذره‌ی تنهای موردنظر روی حداقل سه ذره دیگر قرار گرفته است. در مطالعات گذشته از جمله van Rijn (1984)،  $z$  ابتدایی ذره نسبت به جایی که سرعت جریان در پروفیل لگاریتمی صفر است تعیین می‌شود. وی این مکان اولیه را به اندازه‌ی  $0.5 \sim 0.6$  از

## ۴- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در طول پرش ذره و سرعت متوسط آن

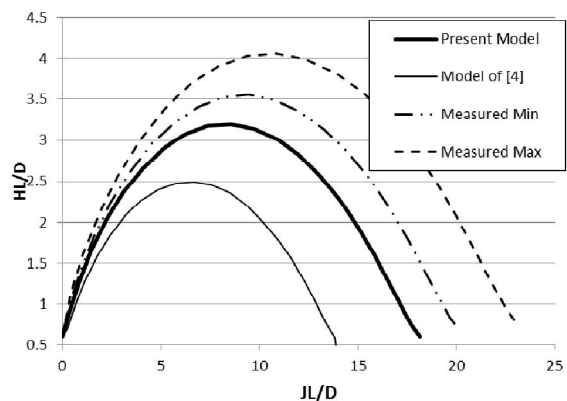
سرعت جریان: در این بخش اثر تغییر سرعت برشی بر طول و سرعت متوسط ذره بررسی می‌شود. (شکل ۳ و ۴). همان‌طور که از شکل (۳) نتیجه می‌شود با افزایش سرعت برشی بستر ( $u^*$ )، طول پرش ذره به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

هم‌چنین طبق شکل ۴ با افزایش سرعت برشی به میزان ۵۰٪، سرعت متوسط پرش ذره نیز ۴۵٪ افزایش پیدا می‌کند. البته باید توجه داشت که با افزایش طول پرش، قاعدتاً ارتفاع پرش نیز افزایش یافته و ذره ممکن است به حالت معلق درآید. از طرف دیگر، در ذرات درشت‌دانه با افزایش سرعت جریان، اگرچه ذرات معلق نمی‌شوند ولی حرکت جمعی ذرات افزایش یافته و از این‌رو تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر روی اعتبار فرضیات مدل حاضر اثر می‌گذارد [۱۰]. مدل حاضر تغییرات طول پرش و سرعت متوسط را خطی و همواره افزایشی نشان می‌دهد که البته در خصوص طول پرش با یافته‌های تجربی Lee و همکاران [۱۲] که آن‌را ثابت و غیرمتأثر از سرعت جریان می‌داند هم‌خوانی ندارد. در مرجع مذکور روند تغییرات طول پرش کاهش یافته و به مقدار ثابتی مجانب می‌شود. دلیل این اختلاف را که در مطالعات مرجع [۴] نیز ملاحظه می‌شود می‌توان اثر نیروهای دیگری (از جمله اغتشاش و اثر ذرات بر یکدیگر) دانست که گاهی باعث افزایش سرعت‌های بالا به صورت عامل کاهنده عمل می‌کنند و در مدل حاضر در نظر گرفته نشده است. باید توجه داشت که در مطالعات حاضر سرعت جریان همواره از سرعت آستانه حرکت بیش‌تر است.

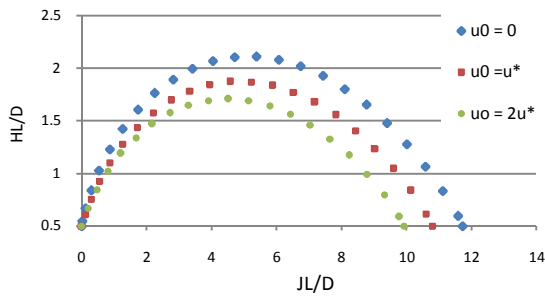


شکل (۱) نمای عمومی از نتایج مدل عددی پرش ذره

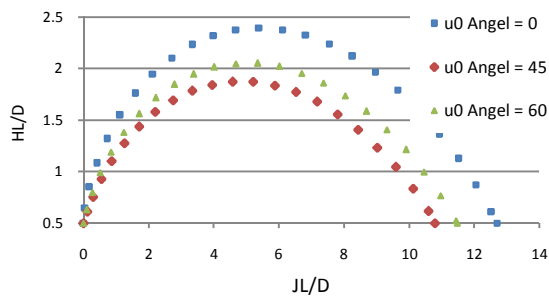
صحت‌سنجی عملکرد مدل: با مقایسه‌ی نتایج مدل مشاهده شد که نتایج مدل حاضر مطابق نتایج مدل van Rijn (1984) است. شکل ۲ نشان می‌دهد که مدل عددی مطالعات حاضر روند حرکت رسوب را مشابه مدل مرجع به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در شکل ۲  $JL/D$  طول پرش،  $HL$  ارتفاع پرش است که با استفاده از قطر ذره  $D$  بی‌بعد شده‌اند. اختلاف در مدل ناشی از اختلاف در پارامترهای به‌کار رفته است که در مدل حاضر تدقیق شده و با نتایج آزمایشگاهی تطبیق بهتری دارد. به‌طور خلاصه دلیل این اختلاف را در تأثیر عوامل دیگری از جمله آشفتنگی جریان باید جستجو کرد [۱۵]. با این وجود از آنجا که مطالعات حاضر جنبه‌ی مقایسه‌ای دارد با استفاده از ضرایب یکسان این هدف تأمین می‌شود.



شکل (۲) مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با مدل مشابه مرجع [۴]

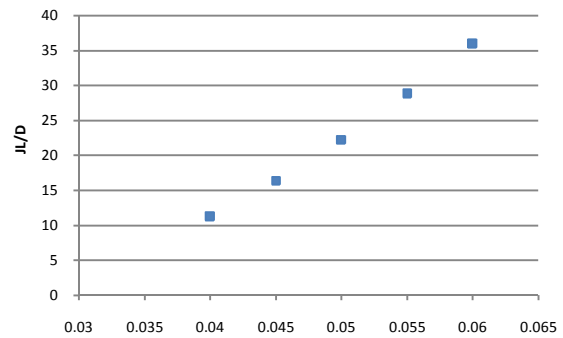


شکل (۵) اثر سرعت اولیه متفاوت بر پرش ذره

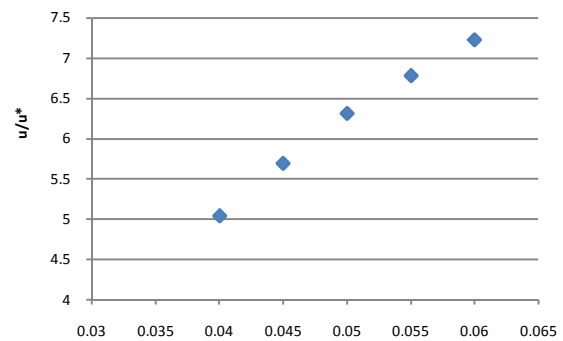


شکل (۶) اثر زاویه‌ی پرش اولیه‌ی متفاوت بر پرش ذره

موقعیت اولیه‌ی قرارگیری ذره: در موشکافی دلیل این‌که ذره‌ی رسوب سرعت و زاویه‌ی اولیه‌ی پرش متفاوتی را تجربه می‌کند، بایستی به‌عنوان حالت پایدار، ذره‌ی رسوب را به‌صورتی در نظر گرفت که این ذره روی و یا در میان رسوبات دیگر قرار گیرد. در حالت ایده‌آل یک ذره روی سه ذره دیگر که به‌طور کامل به‌هم چسبیده‌اند قرار می‌گیرد (شکل ۷). با فرض این‌که هر چهار ذره به‌طور کامل کروی هستند می‌توان برای معادله‌ی تعادل لنگر ذره دو بازوی قائم و افقی نسبت به مرکز اثر نیروهای استاتیکی و هیدرودینامیکی (مرکز جرم ذره) و محل اتکای ذره به سه ذره‌ی زیر آن را در نظر گرفت. دو حالت برای آغاز حرکت ذره می‌توان متصور بود. در حالتی ذره با غلتش از میان شکاف بین دو ذره‌ی پایینی شروع به حرکت می‌کند. در حالت دیگر ذره با غلتش از روی ذره شروع به حرکت می‌کند. برای در نظر گرفتن این دو حالت در محاسبات می‌توان بازوی افقی را میانگین مقدار بازوی افقی در دو



شکل (۳) اثر تغییرات سرعت برشی بر پرش ذره



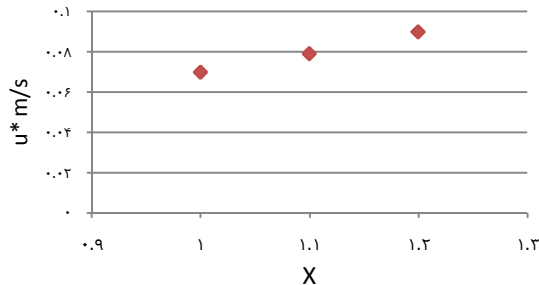
شکل (۴) اثر تغییرات سرعت برشی بر سرعت متوسط ذره

شرایط اولیه‌ی حرکت: با مطالعات (White & Schultz, 1977) و همچنین مطالعات (Abott & Francis, 1977) سرعت اولیه‌ی بلند شدن ذره از روی بستر مابین  $u^*$  و  $2u^*$  دیده شد و زاویه‌ی اولیه‌ی پرش در حدود  $30^\circ$  تا  $70^\circ$  درجه است [۴]. در مطالعه‌ی حاضر تأثیر سرعت و زاویه‌ی اولیه‌ی پرش بر طول و سرعت متوسط پرش بررسی شده است.

مدل برای زوایای  $0^\circ$  و  $45^\circ$  و  $60^\circ$  و سرعت‌های اولیه  $0 \text{ m/s}$  و  $u_* \text{ m/s}$  و  $2u_* \text{ m/s}$  بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۵) و (۶) ملاحظه می‌شود حداکثر تغییرات طول پرش با این تغییرات حدود  $10\%$  است.

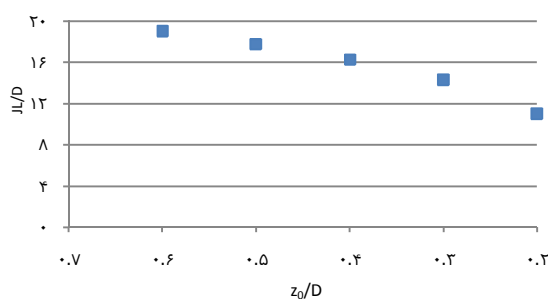
چنانچه ملاحظه می‌شود شرایط اولیه‌ی حرکت تغییر قابل ملاحظه‌ای بر طول و سرعت حرکت ذرات ندارد.

ذرات دیگر تأثیر به‌سزایی در شروع حرکت و میزان آن خواهد داشت [۱۴].



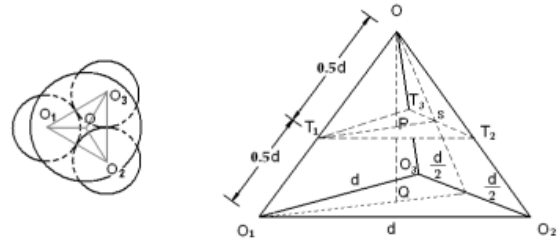
شکل (۸) اثر موقعیت قرارگیری ذره بر سرعت برشی آستانه برای قطر ذره  $D = 1.8 \text{ mm}$

در مدل عددی، موقعیت قرارگیری ذره روی ذرات دیگر را می‌توان از طریق محل ابتدایی قرارگیری ذره در ابتدای پرش اعمال نمود. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات مقادیر بی‌بعد شده‌ی طول پرش و سرعت متوسط آنرا متأثر از محل قرارگیری ذره نسبت به ذرات دیگر نمایش می‌دهند. لازم به توضیح است در مدل عددی محل قرارگیری ذره ضریبی از قطر ذره است، که مقدار  $0.6D$  معادل قرارگیری ذره‌ی رسوب روی ذرات مجاور بوده [۴]، که با کاهش آن، ذره در واقع در داخل ذرات دیگر فرورفته است. چنانچه ملاحظه می‌شود با کاهش رقوم قرارگیری ذره، پرش ذره به طور قابل ملاحظه‌ای، حدود  $45\%$ ، کاهش یافته است. در خصوص سرعت متوسط ذره نیز با کاهش رقوم ذره سرعت متوسط پرش  $40\%$  کاهش یافته است.



شکل (۹) تغییرات طول پرش متأثر از محل اولیه‌ی ذره

حالت در نظر گرفت [۷]. با توجه به هندسه‌ی مسئله در شکل ۷ مقدار بازوی لنگر افقی مطابق روابط ذیل قابل بیان است.



شکل (۷) هندسه‌ی قرارگیری ذره روی ذرات بستر

$$X = 0.433 \frac{Dd}{D+d} \quad (13)$$

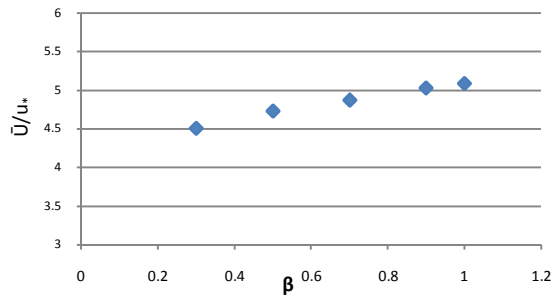
هم‌چنین مقدار بازوی قائم طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$Z = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{D}{D+d} (3D^2 + 2Dd - d^2)^{0.5} \quad (14)$$

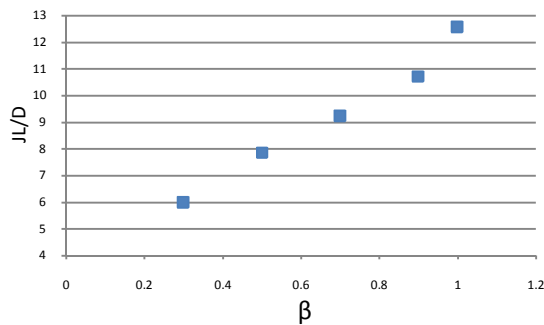
که در رابطه‌ی بالا  $D$  قطر ذره مورد نظر و  $d$  قطر ذره‌ی زیرین است. اگر قطر ذره‌های پایینی با ذره‌ی مورد نظر برابر باشد مقدار بازوهای افقی و قائم چنین محاسبه می‌شود [۷].

$$\begin{aligned} X &= 0.2165D \\ Z &= 0.2941D \end{aligned} \quad (15)$$

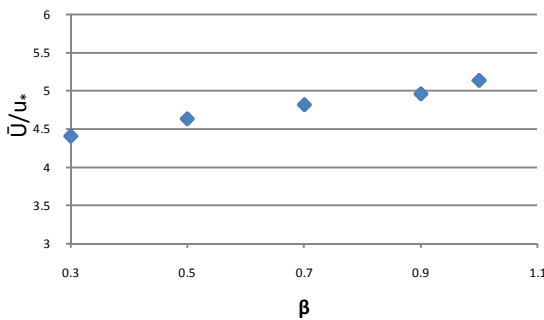
حال اگر فرض شود حرکت با به هم خوردن تعادل ذره شروع می‌شود، در این صورت تغییر موقعیت ذره روی سه ذره‌ی دیگر یعنی در واقع فرورفتن ذره در میان ذرات مجاور باعث افزایش  $X$  در رابطه‌ی ۱۵ خواهد شد. در اینجا اگرچه رابطه‌ی معنی‌داری بین مقدار بازوی  $X$  و سرعت اولیه برقرار نمی‌شود، ولی به‌عنوان شاخص، تأثیر این پارامتر روی سرعت برشی لازم برای آستانه‌ی حرکت بررسی می‌شود. شکل (۸) نشان می‌دهد افزایش  $X$  به اندازه‌ی  $20\%$  (یعنی فرورفتن ذره در میان ذرات مجاور) باعث افزایش سرعت برشی آستانه‌ی پایداری بیش از  $25\%$  می‌شود. از این رو می‌توان انتظار داشت جایگاه ذره‌ی رسوب در میان



شکل (۱۲) اثر شکل ذره‌ی گردگوشه بر سرعت متوسط ذره



شکل (۱۳) اثر شکل ذره‌ی تیزگوشه بر طول پرش ذره

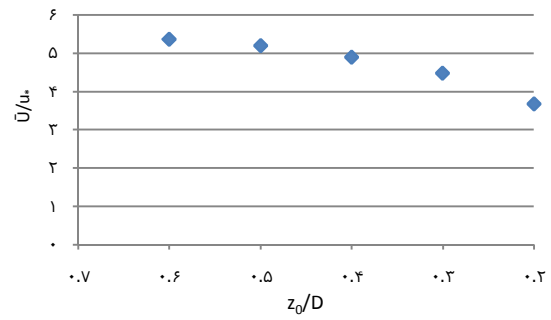


شکل (۱۴) اثر شکل ذره‌ی تیزگوشه بر سرعت متوسط ذره

**اثر پروفیل سرعت:** در این مطالعه تأثیر این پارامتر بر سرعت و طول پرش بررسی شده است. برای در نظر گرفتن اثر این تغییر سرعت سیال در ارتفاع (یا شتاب)، از فرم دیفرانسیلی تغییرات سرعت قائم ذره به فرم زیر می‌توان کمک گرفت.

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{du}{dz} \dot{z} \quad (16)$$

برای تعیین میزان اثر این شتاب، آن را در معادله‌ی حرکت

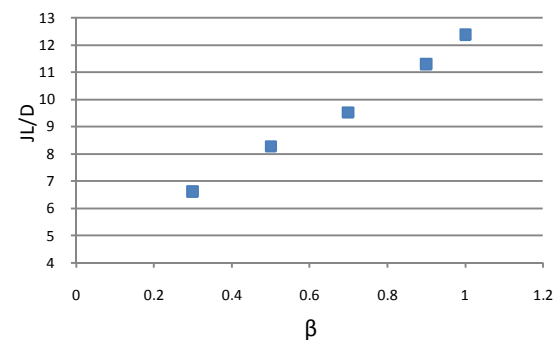


شکل (۱۰) اثر موقعیت قرارگیری ذره بر سرعت متوسط ذره

**شکل ذره:** تغییر شکل ذره باعث تغییر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره نیز می‌شود. تأثیر شکل ذره به صورت ضریب  $\beta$  که به صورت رابطه‌ی (۶) تعریف می‌گردد، اعمال می‌شود.

مدل حاضر برای ذره با ضریب شکل‌های متفاوت و حالت گردگوشه و تیزگوشه بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می‌شود، شکل ذره در طول پرش و سرعت متوسط آن بسیار تأثیرگذار است. با کاهش ضریب شکل از ۱ (مربوط به ذره‌ی کروی) به  $0.3$  (ذره‌ی ورقه‌ای)، طول پرش در ذره‌ای گردگوشه به میزان  $50\%$  درصد کاهش پیدا می‌کند. با کاهش ضریب شکل از ۱ به  $0.3$  سرعت متوسط پرش ذره نیز به میزان  $13\%$  درصد کاهش پیدا می‌کند. همین نسبت در ذرات تیزگوشه نیز کم و بیش برقرار است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).



شکل (۱۱) اثر شکل ذره‌ی گردگوشه بر طول پرش ذره



## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

مطالعه‌ی حاضر به‌طور خاص به شبیه‌سازی حرکت ذرات رسوب در بار بستر و در جریان ماندگار یک سویه و بررسی میزان تأثیر عوامل مختلف در مقدار طول پرش ذرات و سرعت متوسط آن‌ها می‌پردازد. در این راستا پس از توسعه‌ی مدل ساده‌ای که حرکت ذره در سیال به‌صورت پرش را به‌صورت عددی شبیه‌سازی می‌کند، به بررسی حرکت ذرات رسوب پرداخته شده است. سپس تأثیر عواملی از جمله موقعیت اولیه‌ی پرش ذره (سرعت و زاویه‌ی اولیه پرش)، محل قرارگیری ذره نسبت به ذرات دیگر و در نهایت شکل ذره بر طول پرش و سرعت متوسط آن بررسی شد.

به‌طور خلاصه، با تغییر سرعت اولیه و زاویه‌ی اولیه‌ی پرش، تغییر زیادی در طول پرش ذره ایجاد نمی‌شود (کمتر از ۱۰٪). همین‌طور می‌توان دید که سرعت متوسط پرش ذره نیز تغییر زیادی نخواهد کرد. اثر موقعیت اولیه‌ی قرارگیری را می‌توان از دو جنبه بررسی کرد: وقتی ذره در بین ذرات بستر بیش‌تر فرو برود نیروی بزرگ‌تری برای به حرکت در آوردن ذره‌ی لازم است. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد تغییر موقعیت ذره در میان ذرات دیگر بیش از ۴۰٪ بر طول پرش و سرعت متوسط آن تأثیر می‌گذارد.

شکل ذره از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر طول پرش و تاحدودی بر سرعت متوسط آن است. به‌طوری‌که اولی به میزان ۵۰٪ و دومی به میزان ۱۵٪ از ذره گردگوشه تا ذره‌ی ورقه‌ای کاهش پیدا می‌کند. در نهایت اثر تغییرات سرعت در پروفیل قائم جریان بر طول پرش و سرعت متوسط آن بررسی شد که نتیجه‌ی آن کاهش طول و سرعت متوسط پرش است، از مواردی که به‌طور ویژه در مطالعه‌ی حاضر توجه شد روند تغییرات طول پرش و سرعت متوسط آن با افزایش سرعت جریان است. مدل حاضر این روند را

ذره در جریان ماندگار می‌بینیم. در معادله‌ی اصلی حرکت نیروی شتاب به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۳].

$$F_a = (\rho_s - \rho)V \frac{du}{dt} = (\rho_s - \rho)V \frac{du}{dz} \dot{z} \quad (17)$$

در نهایت معادله‌ی حرکت برای ذره به‌صورت زیر تکمیل می‌شود.

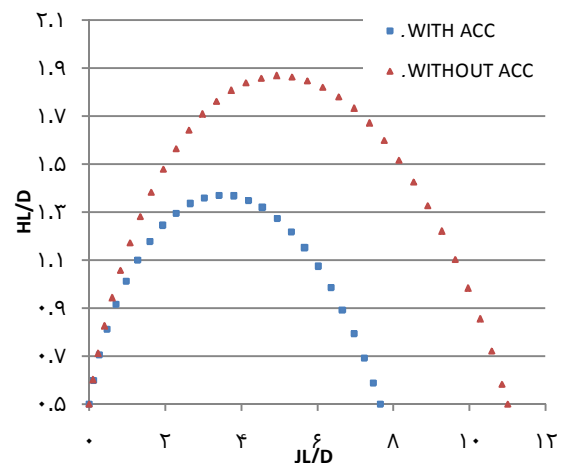
$$\begin{cases} EqI \Rightarrow A\dot{p}_2 - F_L \left( \frac{q_2}{V_r} \right) - F_D \left( \frac{U - P_2}{V_r} \right) - F_a = 0 \\ EqII \Rightarrow A\dot{q}_2 - F_L \left( \frac{U - P_2}{V_r} \right) - F_D \left( \frac{q_2}{V_r} \right) - F_g = 0 \end{cases} \quad (18)$$

با توجه به پروفیل لگاریتمی جریان نیروی  $F_a$  را به این صورت می‌توان نوشت.

$$F_a = (\rho_s - \rho) \frac{\pi D^3}{6} \frac{u_* \dot{z}}{\kappa z} \quad (19)$$

که در آن  $\dot{z}$  سرعت ذره در راستای قائم و  $z$  مکان ذره در همان راستا است. در رابطه‌ی بالا  $\kappa=0.4$  است.

شکل ۱۵ میزان پرش برای قطر ذره  $18 \mu m$  سرعت برشی سیال  $0.04 \text{ m/s}$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود میزان پرش ذره ۲۳٪ کاهش و به همین صورت متوسط سرعت نیز ۷٪ کاهش نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) تأثیر شتاب وارد بر ذره در اثر تغییر تراز ذره

- به صورت خطی و همواره افزایشی نشان می‌دهد.
- ۶- مراجع**
- [8] Lee, H.Y. and Chen, Y.H. and You, J.Y. and Lin, Y.T. "Investigation of Continuous Bed Load Saltating Process" *J. Hydr. Eng. ASCE* 126(9), 691-700, 2001.
- [9] Wiberg, P.L., and Smith, J. D. "A theoretical model for saltating grains in water." *J. Geophysical Res.*, 90(4), 7341-7354, 1985.
- [10] Shانه‌ساززاده A., Holmes P., "An Introduction to Event-Based Model for the Study of Sediment Transport in the Swash Zone", 32th Inter. Conf. on Coastal Eng. ASCE, Shanghai, China, [http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/1087/pdf\\_185](http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/1087/pdf_185), 2010.
- [۱۱] کبورانی، سعید، « بررسی حرکات ذرات رسوب در جریان‌های غیرماندگار»، ۱۳۹۰ پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس
- [12] Murphy, P.J., and H. Hooshiari, "Saltation in water dynamics", *J. Hyd. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108(HY11), 1251-1267, 1982.
- [13] Lee, H. Y., Chen Y. H., You, J. Y. Lin, Y. T. "Investigations of continuous bed load saltating process" *J. Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 126, No. 9, pp691-700, 2000.
- [14] Shi, F., Huang, N. "Measurement and simulation of sand saltation movement under fluctuating wind in a natural field environment", *Physica A* 391. 474-484, (2012)
- [1] Tang, L., Wang, X., "Experimental study on three dimensional movements of particles I- Effects of particle diameter on velocity and concentration distributions", *International Journal of Sediment Research* 24, 159-168, 2009.
- [2] Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., Franklin, M. "Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic doppler current profiler", *Geomorphology* 68, 25-37, 2005.
- [3] Hu, C., Hui, Y., "Bed Load Transport. I: Mechanical Characteristics" *J. Hydr. Eng. ASCE* 122(5), 245-254, 1996.
- [4] VanRijn, L. C. "Sediment Transport Part I :Bed load Transport" *J. Hydr. Eng. ASCE* 110(10) 1431-1456, 1984.
- [5] Lee, H. Y. and Hsu, I. S. "Investigation of saltation particle motions" *J. Hydr. Eng. ASCE* 120(7), 831-845, 1994.
- [6] Swamee, C., Ojha, S. "Drag Coefficient and Fall Velocity of Nonspherical Particles" *J. Hydr. Eng. ASCE* 117(5), 660-666, 1991.
- [7] Dey, S., "Sediment Threshold" *Applied Mathematical Modeling* 23399-417, 1999.