

# انتقال بار بستر تحت رژیم پرش رسوبات در جریان آشفته

## بخش اول: توسعه مدل

رضا براتی<sup>1</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>2\*</sup>، گودرز احمدی<sup>3</sup>

1- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

2- استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

3- استاد دانشکده مهندسی مکانیک و هوانوردی، دانشگاه کلارکسون

\* salehi@modares.ac.ir

**چکیده** - در پژوهش حاضر یک مدل عددی سه بعدی برای شبیه سازی حرکت دانه های رسوب بر مبنای رویکرد اوپلری-لاگرانژی توسعه داده شده است. نیروهایی که بر دانه های رسوب وارد می گردند شامل درگ، لیفت برشی، لیفت چرخشی (مگنوس)، شناوری، جرم اضافه شده، تاریخی بست و همچنین گشتاور چرخشی هستند. معادلات دیفرانسیل مومنتم غیرخطی مرتبه دوم برای محاسبه سرعت های خطی و زاویه ای و همچنین موقعیت دانه های رسوب استفاده شده اند. علاوه بر اینکه نوسانات جریان آشفته در سه جهت در مدل گنجانده شده است، قابلیت شبیه سازی حرکت دانه های رسوب به صورت پرش های متوالی از طریق یک مدل برخورد رسوبات در نظر گرفته شده است. این دو عامل منجر به ماهیت کاملاً تصادفی مدل می شوند. صحت سنجی مدل توسعه داده از طریق بررسی اثر حداقل تعداد پرش لازم برای استقلال آماری نتایج و همچنین مقدار گام زمانی انجام شده است. اعتبار سنجی مدل با مقایسه داده های معتبر آزمایشگاهی با نتایج مدل برای محدوده های ماسه ریز تا شن درشت در ارتباط با پارامترهای مختلف انتقال رسوب شامل طول پرش، ارتفاع پرش و سرعت متوسط پرش انجام شده است. به منظور بررسی صلاحیت مدل مفهومی اثر حذف برخی از نیروها و نوسانات جریان آشفته که در مطالعات پیشین بر روی استفاده از آنها اتفاق نظری نبوده، مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل توسعه داده شده قابلیت آن را دارد که به عنوان یک آزمایشگاه عددی برای بررسی عوامل مختلف مؤثر بر انتقال رسوب در مرحله پیش بینی مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع در بخش دوم این سری مقالات مد نظر قرار گرفته است.

**کلید واژگان:** شبیه سازی عددی، مدل سه بعدی، رویکرد اوپلری-لاگرانژی، انتقال رسوب، پرش رسوبات.

### 1- مقدمه

پذیری پروژه های مهندسی رودخانه مطرح شده اند. بر همین اساس در سه دهه ای اخیر مدل های مختلفی برای محاسبات هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب توسعه داده شده اند. با این وجود این مدل ها از جنبه های مختلف دچار نقصان می باشند (Papanicolaou et al., 2008). علاوه بر این در بسیاری از پروژه ها از فرمول های تجربی که بر اساس مشاهدات اندازه گیری شده، توسعه داده

رویکردهای مختلفی برای بررسی پدیده های طبیعی وجود دارد، از میان آنها حل عددی روابط حاکم با در نظر گرفتن توان تئوری و محاسباتی موجود به عنوان یک ابزار مناسب مطرح است. در همین راستا، شبیه سازی عددی حرکت رسوب در شبکه های رودخانه ها به عنوان یک بخش ضروری به منظور برنامه ریزی، طراحی و ارزیابی امکان-

(al. 2014). در ادامه مطالعات لاگرانژی که دستاورد قابل توجهی در زمینه انتقال رسوب لاگرانژی داشته‌اند، بررسی خواهند شد. مطالعه (1969) Tsuchiya یکی از نخستین مطالعات شبیه‌سازی پرش یک‌دانه ماسه در آب با یک رویکرد لاگرانژی بر روی بستری از دانه‌های رسوب است. در این تحقیق با در نظر گرفتن معادله دوبعدی حرکت ذرات، اثرات نیروهای درگ و شناوری در راستای قائم و نیروی درگ در راستای افقی مدنظر قرار گرفت. (1969) Tsuchiya همچنین فرض کرد ذرات ماسه آن‌قدر بزرگ هستند که بتوان از اثرات آشفتگی صرف‌نظر نمود. در ادامه مطالعات دیگری چون (1978) Reizes و (1982) Murphy and Hoosiar با استفاده از معادله حرکت لاگرانژی به بررسی پرش ذرات پرداختند. با این حال کار (1984) van Rijn یک مطالعه شاخص در این زمینه است. در این مطالعه پیرو نظرات (1973) Bagnold فرض شد در حرکت ذرات بار بستر، نیروی ثقل غالب می‌باشد، درحالی‌که اثرات آشفتگی بر روی مسیر کلی حرکت ذرات دارای درجه اهمیت کمتری است. حالت پرش ذرات به لایه‌ای با حداکثر ضخامت ده برابر قطر ذرات محدود شد. (1984) van Rijn فرض کرد که زمانی شکل پرش ذرات غالب است که سرعت برشی بستر کمتر از سرعت سقوط باشد. در مدل عددی توسعه داده شده بر روی بستر افقی، اثر نیروی شناوری و نیروهای هیدرودینامیکی درگ (خلاف جهت حرکت نسبی دانه رسوب) و لیفت (عمود بر نیروی درگ) مدنظر قرار گرفت. همچنین در محاسبات جرم کل رسوبات به صورت حاصل جمع جرم دانه رسوب و جرم اضافه شده با ضریب 0/5 مدنظر قرار گرفت. در این مطالعه ضریب لیفت به عنوان یک ضریب کالیبراسیونی مد نظر قرار گرفت که انتقال‌دهنده اثرات عواملی چون نوسانات جریان آشفتگی، نیروهای فشاری اضافی در نزدیک دیوار و نیروی ناشی از شتاب محلی سیال می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تحقیقات سامانمند خصوصاً در ارتباط با توسعه معادله حرکت برای ذرات رسوب توسط (1985) Wiberg and Smith انجام شده است. در این مطالعه یک مدل تئوری برای محاسبه مسیر دانه‌های رسوب به صورت تابعی از زمان با

شده‌اند، استفاده می‌شود. صرف‌نظر از روش‌های اندازه‌گیری، مشکلاتی در ارتباط با نتایج آزمایشگاهی یا مشاهدات محلی مربوط به جزئیات مشاهدات جریان و حرکت ذرات نزدیک بستر وجود دارد. بنابراین فرمول‌های تجربی انتقال رسوب محدود به شرایط خاصی از جریان و مشخصات ذرات می‌باشند و نتایج آن‌ها خارج از این محدوده‌ها قابل اطمینان نیست. همچنین چنین پیش‌بینی‌های از جهت عدم قطعیت‌های موجود در آستانه حرکت ذرات رسوب و دبی بار بستر دچار ضعف می‌باشند. با این وجود، این فرمول‌ها به طور گسترده‌ای حتی برای خارج از محدوده‌ی قابل‌پذیرششان استفاده می‌شوند. از سوی دیگر می‌توان مثال‌های متعددی در ارتباط با مشکلات ناشی از انتقال رسوب و رسوب‌گذاری از جمله: ایجاد مناطق با فرسایش یا رسوب‌گذاری وسیع، کاهش عمر مفید سدها و ایجاد مناطق کم‌عمق در رودخانه‌ها، نام برد. اگرچه راه‌حلی برای هر یک از این مشکلات مانند استفاده از فرایند لایروبی برای افزایش عمر مفید سد و یا افزایش عمق رودخانه‌ها وجود دارد، با این حال از جنبه‌های مختلف، پیش‌گیری از رخ دادن این مشکلات از طریق افزایش دقت محاسباتی مناسب‌تر از رفع آن‌ها است. به این ترتیب تحقیقات اخیر در جهت شناخت هرچه بهتر و دقیق‌تر سازوکار انتقال رسوب گام برداشته‌اند. در این راستا استفاده از مدل‌های عددی بر مبنای رویکرد اویلری-لاگرانژی<sup>1</sup> که در آن‌ها فاز سیال با رویکرد اویلری و فاز رسوب با رویکرد لاگرانژی شبیه‌سازی می‌گردند، می‌تواند راهگشا باشد. در این گونه مدل‌ها موقعیت هر دانه رسوب متناسب با نیروهای هیدرودینامیکی که از سوی سیال به آن وارد می‌گردد در هر زمان و هر مکان دلخواه قابل محاسبه است. علاوه بر این، مدل‌ها نسبت به سایر رویکردهای متداول از مبنای تئوری به مراتب بالاتری برخوردار هستند.

اگرچه بار بستر تحت سه رژیم لغزش<sup>2</sup>، غلتش<sup>3</sup> و پرش<sup>4</sup> قابل انتقال است، حالت آخر شکل غالب انتقال است (Bagnold 1973; van Rijn 1984; García 2008; Ji et

<sup>1</sup> Eulerian-Lagrangian model

<sup>2</sup> Sliding

<sup>3</sup> Rolling

<sup>4</sup> Saltating/hopping/bouncing

در اعداد رینولدز بالا توسعه داده شد. در این راستا ترم-های Faxen در مقایسه با دیگر ترم‌ها صرف‌نظر شد. همچنین بجای ترم درگ خطی استوکس از ترم درگ غیرخطی مشابه استفاده گردید. معادله در مرحله بعد نسبت به زمان متوسط‌گیری شده، به‌این ترتیب که هر سرعت برحسب مقادیر متوسط زمانی و نوسانی بیان شد و با توجه به اینکه بستن ترم‌های همبستگی میان نوسانات آشفتگی نیازمند محاسبات پیچیده‌ای می‌باشد، از آن‌ها صرف‌نظر شده است. به این ترتیب میدان جریان متوسط از قانون لگاریتمی محاسبه‌شده است. علاوه بر این موارد، نیروهای لیفت برشی و لیفت چرخشی نیز به معادله حرکت اضافه شده‌اند. (Lee et al. (2000, 2006) علاوه بر کار آزمایشگاهی، به‌صورت عددی نیز به بررسی جنبه‌های مختلف پرش دانه‌های رسوب پرداختند. در این مطالعات نیروی وزن مستغرق، نیروی جرم اضافه‌شده، نیروی لیفت برشی و درگ در معادله حرکت نیوتن مدنظر قرار گرفتند و از اثرات آشفتگی میدان جریان، ساختارهای منسجم آشفتگی، نیروی لیفت چرخشی و اثرات دیواره بر میدان جریان صرف‌نظر شده است. مهدیزاده (1387) به بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش برای دانه‌های با قطر و چگالی مختلف پرداخت. نصراللهی (1389) یک مدل دوبعدی بر اساس مدل کره نرم برای شبیه‌سازی اولبری-لاگرانژی انتقال رسوب توسعه داد. با این حال، از اثرات نوسانات آشفتگی و برخی نیروهای هیدرودینامیکی از جمله نیروی تاریخی بست در این مطالعه صرف‌نظر شد. (Lukerchenko et al. (2009) شبیه‌سازی سه‌بعدی پرش دانه‌ها را به همراه توسعه یک مدل برخورد دانه‌ها با بستر، با استفاده از مفهوم ناحیه تماس<sup>1</sup> که این قابلیت را دارد که از حالت سه‌بعدی به‌راحتی به حالت دوبعدی تغییر پیدا کند، ارائه نمودند. در این مطالعه تأکید شد که اثرات چرخش دانه‌ها به دلیل برخورد با بستر می‌بایست در پیش‌بینی مسیر دانه‌ها در لایه‌مرزی آشفتنه، خصوصاً در اعداد رینولدز بالا از طریق نیروی لیفت چرخشی مدنظر قرار بگیرد. با این حال آن‌ها از اثرات نیروی لیفت برشی صرف‌نظر نمودند. (Bialik et al. (2012) برخلاف مطالعه

ورودی‌های نظیر اندازه و چگالی دانه‌ها و تنش برشی مرزی، توسعه داده شد. آن‌ها بر طبق قانون دوم نیوتن نرخ تغییرات مومنتم دانه رسوب را برابر نیروهای سطحی و حجمی وارد بر آن قراردادند. در معادله مومنتم آن‌ها، نیروی لیفت برخلاف دیگر روابط ارائه شده برای این نیرو، برحسب اختلاف سرعت محاسبه می‌گردد و در آن این مزیت وجود دارد که با نزدیک شدن گرادیان سرعت به سمت صفر، مقدار این نیرو، صرف‌نظر از مقدار ضریب لیفت، به سمت صفر میل می‌کند. یکی از مطالعات مهم لاگرانژی در ارتباط با حرکت متوالی رسوبات، توسط (Sekine and Kikkawa (1992) انجام شد که در آن یک مدل تصادفی سه‌بعدی برخورد دانه‌ها با بستر برای اعمال اثرات تصادفی حرکت دانه‌های رسوب توسعه داده شد. پیش از این (Wiberg and Smith (1985) نیز اثرات تصادفی را با یک مدل برخورد دانه‌ها با بستر مدنظر قرار داده بودند، ولی آن مدل دوبعدی بوده و همچنین اتمام حرکت پرش دانه‌ها، زمانی بود که تنش برشی در مقایسه با تنش برشی بحرانی خیلی کمتر باشد. در تنش‌های برشی بزرگ‌تر، دانه‌های رسوب تحت حرکت پرش پیوسته و بدون حد قرار می‌گیرند، ولی در مدل مطالعه اخیر با در نظر گرفتن عوارض بسیار ریز بستر، اجازه توقف پرش ذرات در هر تنش برشی، خواه کوچک یا بزرگ، داده می‌شود که با شرایط طبیعی تطابق بالاتری دارد. در این حالت حرکت پرش ذرات با گیر افتادن یک‌دانه رسوب در تورفتگی‌های بستر رخ می‌دهد و دانه در این حالت تا زمانی که انرژی آن مستهلک شود، به‌صورت درجا نوسان می‌کند.

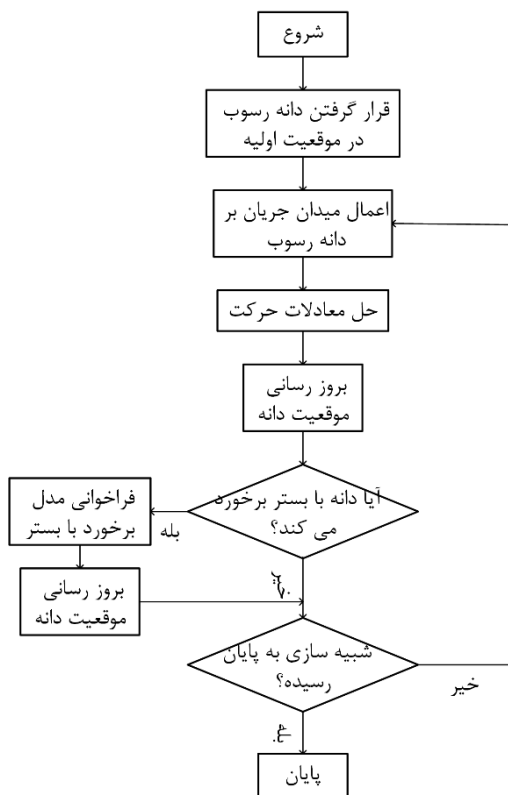
(Niño (1995) در رساله دکتری خود علاوه بر بررسی آزمایشگاهی حرکت پرش دانه‌های رسوب، به‌صورت عددی نیز تحلیل‌هایی انجام داد که نتایج آن در چندین مقاله به چاپ رسید. نتایج شبیه‌سازی عددی حرکت لاگرانژی دانه‌های رسوب برای شن در (Niño and García (1994) و برای ماسه در (Niño and García (1998) به‌صورت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. معادله حرکت رسوبات در هر دو مطالعه بر اساس معادله (Maxey and Riley (1983) برای حرکت ذرات کروی در جریان با رژیم استوکس بود که به معادله‌ای برای حرکت دانه‌های رسوب

<sup>1</sup> Contact zone

صحت‌سنجی، صلاحیت‌سنجی و اعتبارسنجی؛ (2) قابلیت کاربرد مدل در محدوده وسیعی از رسوبات از ماسه ریز تا شن درشت (0/01 تا 4/8 سانتی‌متر)؛ (3) در نظر گرفتن تمامی نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر حرکت رسوبات متناسب با دینامیک آب؛ و (4) در نظر گرفتن اثر نوسانات آشفته‌گی در محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی.

## 2- مدل توسعه داده‌شده

مدل سه‌بعدی اویلری-لاگرانژی توسعه داده‌شده در محیط Matlab با سیستم PC/Windows7/COREi-7 RAM/ 8GHz اجرا شده است و شامل زیر مدل‌های (1) حرکت دانه‌های رسوب؛ (2) برخورد دانه‌های رسوب با بستر؛ و (3) میدان جریان آشفته است؛ که در ادامه با جزئیات توصیف خواهند شد. کلیات مدل در فلوچارت شکل 1 ارائه شده است. پایان شبیه‌سازی با رسیدن به تعداد پرش مد نظر تعیین می‌گردد. این تعداد بر اساس رسیدن به استقلال آماری نتایج تعیین می‌شود.



شکل 1 کلیات مدل توسعه داده‌شده

(2009) Lukerchenko et al. از نیروی لیفت چرخشی صرف‌نظر نمود و در عوض آن نیروی لیفت برشی به همراه نوسانات جریان آشفته را مدنظر قرار داد. نکته قابل توجه این است که هردوی این مطالعات در مرحله اعتبارسنجی نتایج قابل قبول و مشابهی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی (Niño 1995) داشتند. سرشتی و کلاهدوزان (1392) در تحلیل‌های تک پرشه تاثیر برخی اثرات هیدرودینامیکی را بر پرش رسوبات مطالعه کردند. کبورانی و شان‌ساززاده (1392) در یک شبیه‌سازی دو بعدی و تک پرشه تاثیر عواملی از جمله موقعیت اولیه پرش (سرعت و زاویه)، محل قرارگیری ذره در لحظه شروع حرکت و ضریب شکل ذره را مورد بررسی قرار دادند. اخیراً Ji et al. (2014) حرکت پرش دانه‌های رسوب را تحت میدان جریان آشفته با رویکرد شبیه‌سازی مستقیم مد نظر قرار دادند.

با بررسی مطالعات پیشین مشخص می‌گردد که نیروهای هیدرودینامیکی و همچنین پارامترهای مدل در مطالعات مختلف به صورت‌های متفاوتی مدنظر قرار گرفته‌اند و می‌توان گفت مطالعه‌ای که به‌صورت سامانمند و در یک چارچوب مدون، محدوده وسیعی از دانه‌های رسوب را شبیه‌سازی کند، توسعه داده نشده است. در مطالعه حاضر یک مدل سه‌بعدی اویلری-لاگرانژی انتقال رسوب با در نظر گرفتن مجموعه کاملی از نیروها و اثرات هیدرودینامیکی شامل درگ، لیفت برشی، لیفت چرخشی (مگنوس)، شناوری، جرم اضافه‌شده، تاریخی بست و همچنین گشتاور چرخشی توسعه داده شده است. همچنین دانه‌های رسوب در معرض یک میدان جریان با در نظر گرفتن نوسانات آشفته‌گی در سه جهت قرار داده شده‌اند. علاوه بر این، برای میسر کردن پرش‌های متوالی دانه‌های رسوب، یک زیر مدل برخورد دانه با بستر کاملاً تصادفی در مدل تطبیق داده شده است. در روند توسعه مدل از کالیبراسیون ضرایب مدل پرهیز شده است و ضرایب بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود یا نتایج دیگر محققان تخمین زده شده‌اند. به‌طورکلی مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق در سطح بین‌المللی عبارت‌اند از: (1) توسعه سامانمند مدل سه‌بعدی و طی مراحل مختلف

(2) محاسبه کرد. سرعت چرخشی دانه‌ها با در نظر گرفتن اثر گشتاور با کمک رابطه (3) محاسبه می‌گردد.

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = C_m \rho_f \frac{m_p}{\rho_p} \left( \frac{D\bar{u}_f}{Dt} - \frac{d\bar{u}_p}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho_f C_D A |\bar{u}_f - \bar{u}_p| (\bar{u}_f - \bar{u}_p) + \frac{1}{2} \rho_f |\bar{u}_f - \bar{u}_p| AC_{LR} (\bar{u}_f - \bar{u}_p) \times \frac{\bar{\omega}_r}{|\bar{\omega}_r|} + \frac{6\pi\mu(D/2)^2}{\sqrt{\pi\nu}} \left\{ \sum_{i=1}^m \left( \frac{ua_{bpi} - ub_{bpi}}{\sqrt{t-t_{bpi}}} \right) + \frac{\bar{u}_{f0} - \bar{u}_{p0}}{\sqrt{t}} \right\} + (\rho_p - \rho_f) \frac{m_p}{\rho_p} \bar{g} + \rho_f \frac{m_p}{\rho_p} \frac{D\bar{u}_f}{Dt} + \frac{1}{2} \rho_f C_L A \left( |\bar{u}_r|_T^2 - |\bar{u}_r|_B^2 \right) e_L \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = \bar{u}_p \quad (2)$$

$$I_p \frac{d\bar{\omega}_p}{dt} = -C_T \frac{\rho_f}{2} \left( \frac{D}{2} \right)^5 |\bar{\omega}_r| \bar{\omega}_r \quad (3)$$

در این روابط  $\bar{u}_p$ ،  $\bar{\omega}_p$  و  $\bar{x}_p$  به ترتیب نشان‌دهنده بردار سرعت خطی، سرعت زاویه‌ای و موقعیت دانه‌ها،  $t$  زمان شبیه‌سازی،  $m_p$  و  $D$  به ترتیب جرم و قطر دانه رسوب،  $I_p=0.1mpD^2$  اینرسی دانه،  $\rho_f$  و  $\rho_p$  به ترتیب چگالی دانه رسوب و سیال،  $\bar{\omega}_r$  سرعت چرخشی دانه نسبت به چرخش سیال،  $\nu$  و  $\mu$  به ترتیب لزجت سینماتیکی و دینامیکی سیال،  $A$  سطح مقطع دانه،  $\tau$  متغیر موهومی برای انتگرال‌گیری،  $ua_{bpi}$  و  $ub_{bpi}$  به ترتیب سرعت دانه قبل و بعد از برخورد،  $\bar{u}_{f0}$  و  $\bar{u}_{p0}$  به ترتیب سرعت سیال و دانه در لحظه آغازین،  $m$  تعداد برخورد دانه‌ها با بستر،  $g$  شتاب ثقل،  $T$  و  $B$  به ترتیب نشان‌دهنده بالا و پایین دانه رسوب،  $e_L$  بردار عمودی در جهت محور قائم،  $D(\cdot)/Dt$  مشتق مادی با در نظر گرفتن سرعت سیال در عبارت جابجایی و  $d(\cdot)/dt$  عبارت متناظر با در نظر گرفتن سرعت دانه در عبارت جابجایی را نشان

میدان جریان بر ذرات رسوب نیرو وارد می‌کند که عامل حرکت رسوبات است و متقابلاً ذرات نیز نیرو بر سیال وارد می‌کنند. اگر غلظت جرمی ذرات کم باشد، از تاثیر ذرات بر روی جریان صرف‌نظر می‌شود (اندرکنش یک راهه<sup>1</sup>). در مقابل اگر نتوان از نوسانات آشفتگی ناشی از اثرات فاز پراکنده بر فاز رسوب صرف نظر نمود، اندرکنش دو راهه<sup>2</sup> می‌بایست مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر اگر غلظت ذرات زیاد باشد کوپلینگ هیدرودینامیکی و اندرکنش درون ذره‌ای نیز حائز اهمیت خواهد بود (اندرکنش چهار راهه<sup>3</sup>) (Crowe et al., 2011).

هنگامی که یک ذره به دیواره یا ذرات دیگری نزدیک شده و سپس برخورد می‌کند، باعث تغییر مومنتم ذره می‌گردد. این تغییر مومنتم در ادامه حرکت ذره درون سیال نقش اساسی را ایفا می‌کند. در همین راستا مدل زبری بستر و در معرض قرار گرفتن ذرات رسوب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با توجه به شرایط مدل‌سازی و اهداف مد نظر، در این پژوهش اندرکنش یک راهه با در نظر گرفتن مدل برخورد ذره-دیواره مد نظر قرار گرفته است.

## 2-1- زیر مدل حرکت دانه‌های رسوب

معادلات حاکم بر حرکت دانه‌های رسوب شامل معادلات دیفرانسیل غیرخطی مرتبه دوم هستند که قابل تبدیل به معادلات مرتبه اول می‌باشند. سرعت دانه‌های رسوب در سه جهت با کمک رابطه (1) قابل محاسبه است. نیروهای سمت راست این معادله به ترتیب نشان‌دهنده نیروی جرم اضافه‌شده، نیروی درگ، نیروی لیفت چرخشی، نیروی تاریخی بست<sup>4</sup> (که به ترتیب خود شامل سه ترم جداگانه برای حرکت آزاد دانه، برخورد با بستر و اثر سرعت‌های آغازین است)، نیروی شناوری، نیروی شتاب سیال و نیروی لیفت برشی هستند. درحالی‌که نیروی شناوری متناسب با شیب بستر در جهات افقی و قائم بوده و نیروی لیفت برشی تنها در جهت قائم وارد می‌گردد، بقیه نیروها در تمامی جهات اعمال می‌گردند. با مشخص بودن بردار سرعت دانه می‌توان بردار موقعیت آن را با کمک رابطه

<sup>1</sup> One way coupling

<sup>2</sup> Two way coupling

<sup>3</sup> Four way coupling

<sup>4</sup> Basset history force

می‌دهند.  $C_m$  ضریب جرم اضافه‌شده و برابر 0/5 است.  $C_{LR} = \min(0.5, 0.25 D \left| \frac{\bar{\omega}_r}{\bar{u}_r} \right|)$  ضریب ناشی از چرخش دانه‌ها است و  $\bar{u}_r$  سرعت نسبی دانه نسبت به جریان و  $C_D$  ضریب درگ است و با توجه به رابطه (4) که توسط Barati et al. (2014) با تحلیل داده‌های درگ حاصل شده است، محاسبه می‌شود:

$$C_D = 5.4856 \times 10^9 \tanh(4.3774 \times 10^{-9} / \text{Re}) + 0.0709 \tanh(700.6574 / \text{Re}) + 0.3894 \tanh(74.1539 / \text{Re}) - 0.1198 \tanh(7429.0843 / \text{Re}) + 1.7174 \tanh[9.9851 / (\text{Re} + 2.3384)] + 0.4744 \quad \text{for } \text{Re} < 2 \times 10^5 \quad (4)$$

Barati et al. (2017) با تحلیل داده‌های لیفت برشی است که توسط Barati et al. (2017) است.  $C_T$  ضریب گشتاور چرخشی و تابع عدد رینولدز چرخشی دانه  $\text{Re}_R = D^2 \left| \frac{\bar{\omega}_r}{4\nu} \right|$  است و به صورت رابطه (5) محاسبه می‌شود (Yamamoto et al., 2001):

$$C_T = \frac{C_1}{(\text{Re}_R)^{0.5}} + \frac{C_2}{\text{Re}_R} + C_3 \text{Re}_R \quad (5)$$

که در آن ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  در Yamamoto et al. (2001) موجود است.

## 2-2- زیر مدل برخورد با بستر

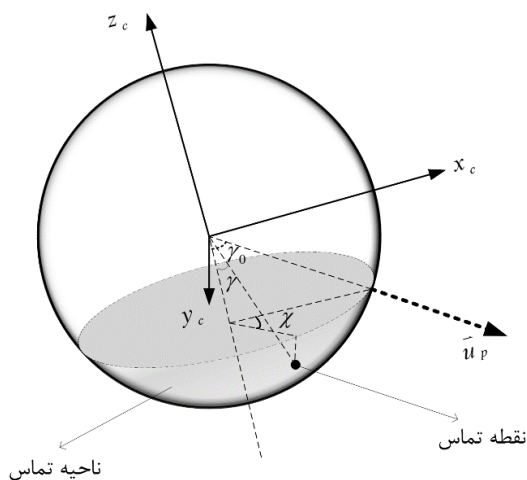
یکی از اجزای ضروری مدل، به منظور ادامه فرایند انتقال رسوب، مکانیزمی است که چگونگی شبیه‌سازی حرکت دانه‌های رسوب را در هنگام نزدیک شدن به بستر و بعد از برخورد با آن در نظر می‌گیرد. در این شرایط متناسب با نحوه قرار گرفتن دانه‌های بستر و زبری آن، سرعت‌های خطی و زاویه‌ای دانه‌ها محاسبه می‌گردند. در مدل حاضر از ترکیب معادلات برخورد<sup>1</sup> Tsuji et al. (1985) و مفاهیم ناحیه تماس و نقطه تماس (Lukerchenko et al. (2009)) به‌عنوان زیر مدل برخورد دانه‌ها با بستر استفاده شده است. از مفاهیم اخیر برای ارائه نامنظمی‌های سطح بستر و زبری آن و از معادلات برخورد برای محاسبه سرعت‌های بعد از برخورد استفاده می‌شود. مجموعه تمامی نقاط

در مجموع چهار انتقال محورهای مختصات برای انتقال سرعت‌های انتقالی  $(u_x^{(0)}, u_y^{(0)}, u_z^{(0)})$  و سرعت‌های چرخشی  $(\omega_x^{(0)}, \omega_y^{(0)}, \omega_z^{(0)})$  قبل از برخورد، به مقادیر متناظر بعد از برخورد  $(u_x, u_y, u_z)$  و  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  اعمال می‌شود که شامل:

(1) انتقال اول: انتقال سیستم مختصات اصلی از طریق زاویه  $\phi = \tan^{-1}(u_y^{(0)} / u_x^{(0)})$  حول محور قائم به منظور اینکه صفحه x-y جدید موازی بردار سرعت انتقالی باشد.

(2) انتقال دوم: انتقال سیستم محورهای مختصات گام قبلی حول محور عرضی با زاویه  $\psi = 180 - \gamma_0 - \cos^{-1}\left(u_z^{(0)} / \sqrt{u_x^{(0)2} + u_z^{(0)2} + u_y^{(0)2}}\right)$  به این ترتیب محور قائم جدید ناحیه تماس را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند.

(3) انتقال سوم و چهارم: انتقال سیستم مختصات گام قبل حول محور قائم با زاویه  $\chi$  و سپس چرخش سیستم مختصات جدید حول محور عرضی با زاویه  $\gamma$  به منظور انتقال سرعت‌های دانه به سیستم مختصات برخورد.



شکل 2 کلیات زیر مدل برخورد دانه با بستر

<sup>2</sup> Random number greater

<sup>1</sup> Impulse equations

جریان و شرایط زبری مطالعات مختلف با یک دیگر یکسان نمی‌باشند که این موضوع می‌تواند در مقادیر ضرایب مدل برخورد تاثیرگذار باشد. از طرف دیگر، از نقطه نظر غیرفیزیکی در نظر گرفتن ضرایب بازگشت و اصطکاک در بسیاری از مطالعات به عنوان ضرایب کالیبراسیونی یکی از ریشه‌های اصلی عدم اتفاق نظر بر روی مقدار آنها می‌باشد. به عبارت دیگر در بسیاری از موارد، تأثیر سایر اثرات هیدرودینامیکی نظیر نیروی لیفت، نیروی تاریخی بست، آشفتگی و تعداد ابعاد مدل در ضرایب مدل برخورد گنجانده شده است. در این مطالعه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی (Nino 1995)، که مورد اتفاق نظر می‌باشند، مقدار این دو ضریب در مدل تعیین شده است (Gonzalez 2008; Bialik et al. 2012; Moreno and Bombardelli 2012). و هیچ فرایند کالیبراسیونی برای این دو ضریب انجام نشده است (Barati et al. 2014, 2017).

مقادیر ضریب اصطکاک  $f$  و ضریب بازگشت  $e$  بر اساس آزمایش‌های (Nino 1995) به صورت زیر توصیه می‌گردند.

$$f = \begin{cases} 0.9 & D \leq 0.2 \text{ cm} \\ \text{Linear interpolation} & 0.2 < D < 0.7 \text{ cm} \\ 0.7 & D \geq 0.7 \text{ cm} \end{cases} \quad (12)$$

$$e = \max \left\{ \left[ 0.75 - 0.25 \left( \tau_* / \tau_{*cr} \right) \right], 0.2 \right\} \quad (13)$$

که در آن  $\tau_*$  تنش برشی بدون بعد و  $\tau_{*cr}$  مقدار بحرانی متناظر را نشان می‌دهند.

### 2-3- زیر مدل جریان آشفته

یک رویکرد سریع و مؤثر برای تولید نوسانات آشفته‌گی جریان و میدان جریان متوسط در سه جهت تطبیق داده شده است. استفاده از قانون توزیع لگاریتمی سرعت برای انتقال رسوب بار بستر اثبات شده است (Yeganeh-Bakhtiary et al. 2009). با صرف نظر از مقادیر سرعت متوسط<sup>1</sup> در راستای قائم و عرضی، مقدار سرعت متوسط در جهت افقی به صورت رابطه (14) محاسبه می‌گردد (Yalin, 1992):

$$\frac{u_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + B_s \quad (14)$$

سپس، معادلات برخورد به منظور محاسبه سرعت‌های بعد از برخورد استفاده می‌گردند.

اگر  $|u_z^{(0)}|/V < -2/[7f(e+1)]$  باشد، می‌توان روابط (6) و (7) را نوشت:

$$u_x = \frac{5}{7} \left( u_x^{(0)} - \frac{d}{5} \omega_y^{(0)} \right), \quad u_z = -e u_z^{(0)} \quad (6)$$

$$u_y = \frac{5}{7} \left( u_y^{(0)} + \frac{d}{5} \omega_x^{(0)} \right) \quad (6)$$

$$\omega_x = 2v_y/d, \quad \omega_z = \omega_z^{(0)}, \quad \omega_y = -2v_x/d \quad (7)$$

و در غیر این صورت:

$$u_x = u_x^{(0)} + \varepsilon_x f (e+1) u_z^{(0)}, \quad u_z = -e u_z^{(0)} \quad (8)$$

$$u_y = u_y^{(0)} + \varepsilon_y f (e+1) u_z^{(0)} \quad (8)$$

$$\omega_x = \omega_x^{(0)} - \frac{5}{d} \varepsilon_y f (e+1) u_z^{(0)}, \quad \omega_z = \omega_z^{(0)} \quad (9)$$

$$\omega_y = \omega_y^{(0)} + \frac{5}{d} \varepsilon_x f (e+1) u_z^{(0)} \quad (9)$$

که در آن‌ها:

$$\varepsilon_x = \left( u_x^{(0)} + 0.5d \omega_y^{(0)} \right) / |V|, \quad \varepsilon_y = \left( u_y^{(0)} - 0.5d \omega_x^{(0)} \right) / |V| \quad (10)$$

$$|V| = \sqrt{\left( u_x^{(0)} + 0.5d \omega_y^{(0)} \right)^2 + \left( u_y^{(0)} - 0.5d \omega_x^{(0)} \right)^2} \quad (11)$$

برخورد دانه‌های در حال حرکت با دانه‌های ثابت بستر در تراز  $0.5D$  رخ می‌دهد. در نهایت چهار انتقال فوق‌الذکر به صورت معکوس اجرا می‌گردند تا بردارهای سرعت در مختصات اصلی بدست بیایند.

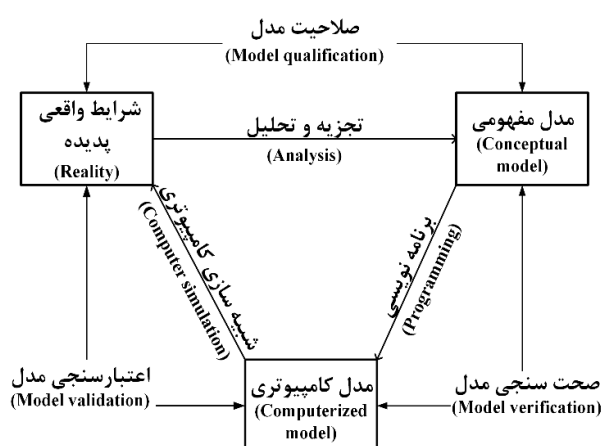
دو پارامتر مهم در مدل برخورد رسوبات با بستر شامل ضریب بازگشت  $e$  و ضریب اصطکاک  $f$  هستند که به شرایط جریان و جنس مصالح بستر و رسوبات بستگی دارند. این دو ضریب به منظور تعیین مقدار سرعت (به ترتیب در راستاهای قائم و افقی) رسوبات بعد از برخورد استفاده می‌گردند. مقادیر این دو پارامتر در مطالعات مختلف، بسیار متفاوت مد نظر قرار گرفته شده‌اند. دلایل تنوع مقادیر ضرایب اصطکاک (در محدوده 0/25 تا 1) و بازگشت (در محدوده 0 تا 0/95) در مدل برخورد را می‌توان در مسائل فیزیکی و غیرفیزیکی دانست. از نقطه نظر فیزیکی برخی مطالعات برای دانه‌های با جنس‌ها و شکل‌های مختلف و در نتیجه ضرایب برخورد متفاوت انجام شده‌اند. همچنین از این منظر نوع بستر، شرایط آشفته‌گی

<sup>1</sup> Mean velocities

شایان ذکر است که در نظر گرفتن دو معیار طول گردابه و زمان تداوم گردابه، علاوه بر سرعت گردابه، در مدل حاضر، منجر به مدل‌سازی صحیح پخش آشفته می‌شود. بنابراین مدل حاضر نه تنها ناهمسانگردی نوسانات<sup>6</sup> آشفته را بافاصله از دیواره مدنظر قرار می‌دهد، بلکه سری زمانی نوسانات سرعت با استفاده از مفهوم زمان تداوم گردابه را در نظر می‌گیرد.

### 3- چارچوب ارزیابی مدل نهایی

توسعه چارچوبی به‌منظور شبیه‌سازی یک پدیده طبیعی شامل مراحل مختلفی می‌باشد که به‌طور خلاصه در شکل 3 نشان داده شده است (Oberkamp et al., 1988). نخستین گام برای رسیدن به این چارچوب، شناخت شرایط واقعی پدیده و تجزیه و تحلیل آن به‌منظور توسعه مدل مفهومی پدیده است. منظور از مدل مفهومی تمامی اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی ریاضی و معادلات ریاضی حاکم بر پدیده است. بررسی کارایی مدل مفهومی در قیاس با شرایط واقعی پدیده، از طریق گام تعیین صلاحیت مدل انجام می‌گیرد. به‌منظور بررسی اینکه آیا برنامه کامپیوتری به‌درستی مدل مفهومی را شبیه‌سازی می‌کند، مرحله‌صحت‌سنجی انجام می‌گیرد. در مرحله اعتبارسنجی مدل انتقال رسوب، بررسی تطابق نتایج مدل کامپیوتری با شرایط آزمایشگاهی یا میدانی برای حالات مختلف انتقال رسوب می‌تواند مد نظر قرار بگیرد.



شکل 3 چارچوب شبیه‌سازی پدیده‌های طبیعی Oberkamp et al., (1988)

که در آن  $u^*$  سرعت برشی،  $\kappa$  ثابت فون کارمن،  $k_s$  ارتفاع مؤثر زبری بستر و  $B_s$  تابعی از عدد رینولدز زبری  $Re_* = u^* k_s / \nu$  به‌صورت زیر است (Yalin, 1992):

$$B_s = 8.5 + [2.5 \ln(Re_*) - 3] e^{-0.121[\ln(Re_*)]^{2.42}} \quad (15)$$

برای تولید نوسانات جریان آشفته، مدل زمان تداوم گردابه<sup>1</sup> تطبیق داده شده است (Tian and Ahmadi, 2007). گردابه‌های آشفته<sup>2</sup> سه ویژگی تصادفی دارند که مشخص‌کننده شرایط آن‌ها است، شامل: (1) طول عمر گردابه، (2) طول گردابه<sup>3</sup> و (3) سرعت گردابه<sup>4</sup>. در مدل طول عمر گردابه، دانه رسوب با مجموعه‌ای از گردابه‌های تصادفی به‌صورت متوالی تعامل می‌کند.

هر تعامل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که طول عمر گردابه به اتمام برسد، یا فاصله میان سیال و گردابه بیشتر از طول گردابه باشد. سپس یک تعامل جدید میان دانه رسوب و یک گردابه آشفته جدید با مشخصات کاملاً متفاوت طول عمر، طول و سرعت گردابه آغاز می‌گردد. این مشخصات به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (Gosman and Loannides, 1983; Tian and Ahmadi, 2007):

$$\tau_e = L_e / \sqrt{2k/3} \quad (16)$$

$$L_e = (C_\mu)^{3/4} k^{3/2} / \varepsilon \quad (17)$$

$$t_{cross} = -\tau_p \ln \left[ 1 - L_e / \left( \overline{u_{r(0)}} | \tau_p \right) \right] \quad (18)$$

که در آن  $\tau_e$  طول عمر گردابه،  $L_e$  طول گردابه،  $C_\mu$  پارامتر آشفته‌گی،  $k$  انرژی جنبشی آشفته‌گی،  $\varepsilon$  نرخ استهلاک انرژی آشفته‌گی،  $t_{cross}$  زمان انقطاع گردابه،  $\overline{u_{r(0)}}$  سرعت نسبی دانه رسوب و گردابه در هنگام شروع تعامل و  $\tau_p$  زمان آسایش دانه رسوب را نشان می‌دهند.

برای محاسبه سرعت گردابه (نوسانات جریان آشفته)، توابع عمومی شدت آشفته‌گی پیشنهاد شده توسط Nezu (1977) استفاده شده است. بر این اساس سرعت‌های جریان آشفته توسط یک روش مونت کارلو<sup>5</sup> با توزیع دوبعدی نرمال برای در نظر گرفتن همبستگی میان سرعت‌های لحظه‌ای قابل محاسبه هستند.

<sup>1</sup> Eddy life time model

<sup>2</sup> Turbulent eddies

<sup>3</sup> Eddy length

<sup>4</sup> Eddy velocity

<sup>5</sup> Monte Carlo method

<sup>6</sup> Anisotropic fluctuations



#### 4- نتایج و بحث

معادلات حاکم را می‌توان با استفاده از روش رانگ‌کوتای مرتبه 14 حل نمود. به‌عنوان شرایط آغازین، سرعت‌های اولیه انتقالی و چرخشی برابر صفر قرار داده شده است که به معنی عدم حرکت دانه رسوب در ابتدای شبیه‌سازی است. درحالی‌که دانه در مرکز محور مختصات در صفحه افقی قرار دارد، فاصله آن در جهت محور قائم 0.5D می‌باشد. بیست پرش اولیه به‌منظور کم کردن اثرات شرایط آغازین در تجزیه و تحلیل‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. مقدار زبری مؤثر برابر قطر دانه رسوب در حال حرکت در نظر گرفته شده است. چگالی نسبی دانه‌های رسوب نسبت به سیال برابر 2/65 و لزجت سینماتیک آب برابر  $0/01 \text{ cm}^2/\text{s}$  در دمای استاندارد  $20^\circ \text{C}$  می‌باشد. مقدار تنش برشی بحرانی با استفاده از معیار شیلدز و رابطه (2008) García محاسبه شده است.

#### 4-1- صحت‌سنجی مدل

در این بخش دو عامل مهم که پیش از این در مدل‌های لاگرانژی رسوبات در مرحله صحت‌سنجی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، بررسی خواهند شد. با توجه به اینکه اصولاً نتایج مدل‌های تصادفی از جمله مدل حاضر بر اساس آماره‌های آماری<sup>2</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و نتایج آماری اساساً وابسته به تعداد اعضاء جامعه آماری است، مسلماً تعداد پرش‌های رسوبات در نتایج مدل حاضر تأثیرگذار خواهد بود. به‌عنوان نمونه در شکل 4 اثر تعداد پرش در میانگین آماری نتایج برای دانه  $0/053$  سانتی-متری (محدوده ماسه) در ارتباط با میانگین طول پرش  $H_s$  و زمان شبیه‌سازی ارائه شده است. نتایج طول پرش با اجرای مرجع (پایه) که در آن 10000 پرش متوالی دانه رسوب در نظر گرفته شده است، بدون بعد شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، برای اجراهایی با 500 پرش متوالی میزان انحراف از اجرای پایه کمتر از 5% است و برای 1000 پرش متوالی این مقدار به کمتر از 2% می‌رسد. این موضوع در حالی است که در تمامی حالات

شبیه‌سازی مقدار انحراف از معیار (و متعاقب آن عدم قطعیت) نتایج در حدود 20% میانگین آن‌ها می‌باشد. مقدار خطای 2% در مقابل انحراف معیار 20% می‌تواند قابل قبول باشد. نتایج مشابهی برای سایر قطرهای رسوب در محدوده ماسه ریز، شن ریز و شن درشت نیز قابل مشاهده است. از طرف دیگر زمان اجرای شبیه‌سازی با افزایش تعداد پرش‌ها از 1000 به 5000 و از 5000 به 10000 به شدت افزایش پیدا می‌کند که این موضوع برای تعداد اجراهای زیاد در مرحله پیش‌بینی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. شایان ذکر است در محدوده ماسه متوسط زمان شبیه‌سازی برای 1000 پرش متوالی در حدود 10 دقیقه و برای محدوده شن در حدود 60 دقیقه و برای شبیه‌سازی حرکت یک دانه رسوب می‌باشد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت تعداد 1000 پرش متوالی برای رسیدن به استقلال آماری نتایج به‌عنوان تعداد پرشی که هم از لحاظ دقت و هم از لحاظ هزینه محاسباتی قابل قبول است، در مرحله پیش‌بینی می‌تواند مد نظر قرار بگیرد. این موضوع در حالی هست که در بیشتر مطالعات، تعداد پرش بسیار کمتر از این در نظر گرفته شده است. مثلاً (Niño 1995) در آزمایش‌های محدوده شن خود تنها میانگین 80 پرش و (Lee et. al 2000) در شبیه‌سازی‌های خود تنها میانگین 55 پرش متوالی را در نظر گرفتند. شایان ذکر است که انحراف معیار نتایج ناشی از دو عامل تصادفی مهم در انتقال رسوب (که در مدل توسعه داده شده در نظر گرفته شده است) می‌باشد: 1) برخورد رسوبات (2) تصادفی بودن میدان جریان. این دو عامل باعث خواهند شد که مشخصات پرش از جمله طول، ارتفاع، سرعت متوسط، چرخش در جهات مختلف و ... در پرش‌های مختلف، متفاوت باشد. بنابراین مقدار متوسط آنها وابسته به میانگین آماری نتایج پرش‌ها و در نتیجه تعداد پرش خواهد بود. به این ترتیب اگر تعداد پرش (جامعه آماری) کم باشد، می‌تواند منجر به عدم استقلال میانگین آماری نتایج شود.

عامل دیگری که می‌تواند بر روی دقت نتایج تأثیرگذار باشد، مقدار گام زمانی است. به‌منظور داشتن دقت قابل قبول، کاهش خطای گرد کردن و همچنین نگاه‌داشتن

<sup>1</sup> Fourth-order Runge-Kutta method

<sup>2</sup> Statistical measures

شده است، محاسبه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج زیر مدل آشفتهگی با مقادیر آزمایشگاهی از تطابق بالایی برخوردار است. نتایج مشابهی برای سایر اجراها قابل مشاهده می باشد. کلیات این نتایج نشان دهنده کارایی زیر مدل جریان آشفته برای تولید نوسانات میدان جریان می باشد. شایان ذکر است در این مدل علاوه بر مقدار نوسانات جریان، طول عمر گردابه و زمان انقطاع گردابهها مد نظر قرار گرفته است که علاوه بر مقدار نوسانات منجر به پخش صحیح آشفتهگی می شود.

به منظور مقایسه نتایج مدل انتقال رسوب با داده های آزمایشگاهی، مقادیر آزمایشگاهی پرش  $H_s$  و طول  $L_s$  دانه که با قطر آن بدون بعد شده اند، به همراه سرعت متوسط افقی دانه  $u_s$  که با سرعت برشی بدون بعد شده است، مدنظر قرار گرفته اند. از داده های آزمایشگاهی Abbott and Lee and Hsu (1994), Francis (1973), Francis (1977) و Niño and García (1994, 1998) که محدوده دانه های با قطرهای مختلف را پوشش می دهند، به منظور اعتبار سنجی مدل استفاده شده است. این اعتبارسنجی برای مقادیر مختلف شدت جریان (تنش برشی جریان به تنش برشی بحرانی) و همچنین قطرهای مختلف دانه های رسوب 0/053، 0/5 و 2/25 سانتی متر (محدوده ماسه تا شن متناسب با داده های آزمایشگاهی موجود) به ترتیب با مقادیر  $R_p = \sqrt{g(s-1)D^3}/\nu$  برابر 50، 1420 و 13600 انجام شده است. نتایج ارتفاع، طول و سرعت متوسط افقی پرش در شکل های 7 تا 9 ارائه شده اند. در این شکل ها  $\tau_* = u_*^2/[g(s-1)D]$  پارامتر شیلدز و  $\tau_{*cr}$  مقدار بحرانی این پارامتر برای لحظه آستانه حرکت و همچنین نقاط نشان دهنده مقادیر میانگین آماری و خطوط قائم نشان دهنده انحراف معیار داده ها هستند. به روشنی مشخص است که مدل با دقت قابل قبول و مناسبی مقادیر آزمایشگاهی را پیش بینی کرده است. در این میان داده های Lee and Hsu (1994) در ارتباط با طول و ارتفاع پرش نسبت به سایر داده های آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل حاضر مقادیر بزرگ تری هستند که این موضوع را می توان به جنس (چگالی) دانه های استفاده شده نسبت داد.

زمان اجرای مدل در محدوده قابل مدیریت، گام زمانی نباید بسیار کوچک یا بزرگ در نظر گرفته شود. به عنوان نمونه نتایج مربوط به یک دانه با قطر 2/25 سانتی متری (محدوده شن) در شکل 5 ارائه شده است. شایان ذکر است در این شکل مقدار گام زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شده است تا مدل کاملاً پایدار باشد. همان طور که مشاهده می گردد، اثر تغییر گام زمانی در محدوده مورد بررسی بسیار کمتر از اثرات ناشی از تصادفی بودن مدل و عدم قطعیت آن است، چراکه نتایج از روند معنی داری پیروی نمی کنند. با این حال در همه موارد تغییرات ارتفاع پرش نسبت به حالت مرجع (گام زمانی 0/00005 ثانیه) کمتر از 4% است. با در نظر گرفتن تمامی شرایط ذکر شده مقدار گام زمانی  $10^{-4}$  ثانیه انتخاب می گردد.

مسئله دیگری که در این مرحله مورد بررسی قرار داده شد، در ارتباط با تراز برخورد رسوب در حال حرکت با بستر است. بررسی میزان تغییر تراز بستر مجازی در محدوده 0/5 تا 0/6 قطر دانه رسوب نشان می دهد که این موضوع کمتر از 10 درصد بر مشخصات پرش تاثیر دارد. در حالیکه کبورانی و شانه ساززاده (1392) تاثیر این موضوع را بر طول پرش در حدود 45 درصد و برای سرعت پرش در حدود 40 درصد ذکر کرده اند. علت این اختلاف می تواند در این موضوع باشد که مطالعه ایشان به صورت تک-پرشه شبیه سازی دویعدی حرکت رسوب را مد نظر قرار داده است، در حالیکه در مطالعه حاضر شبیه سازی به صورت سه بعدی و در حالت پرش های متوالی انجام شده است.

#### 2-4- اعتبارسنجی مدل

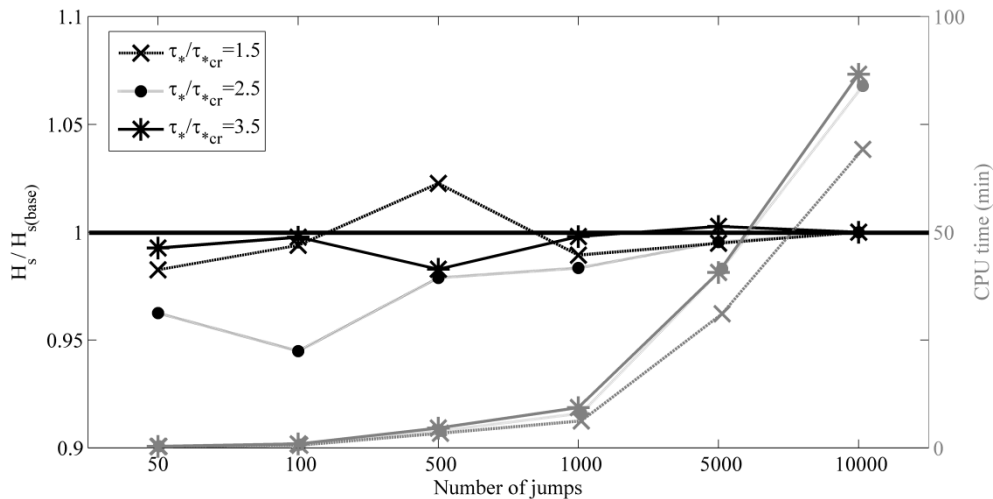
برای نخستین گام از اعتبارسنجی مدل، نتایج زیر مدل آشفتهگی مد نظر قرار گرفته است. شدت متوسط سرعت های آشفتهگی  $RMS^1$  در جهات طولی، عرضی و قائم با فاصله از جداره با مقادیر آزمایشگاهی (Nezu (1977) در شکل 6 مقایسه شده است. مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از میانگین متحرک<sup>2</sup> تمامی گام های زمانی یک شبیه سازی (متشکل از 1000 پرش متوالی دانه رسوب با بیش از 700 هزار گام زمانی) که به صورت تصادفی انتخاب

<sup>1</sup> Root-mean-square

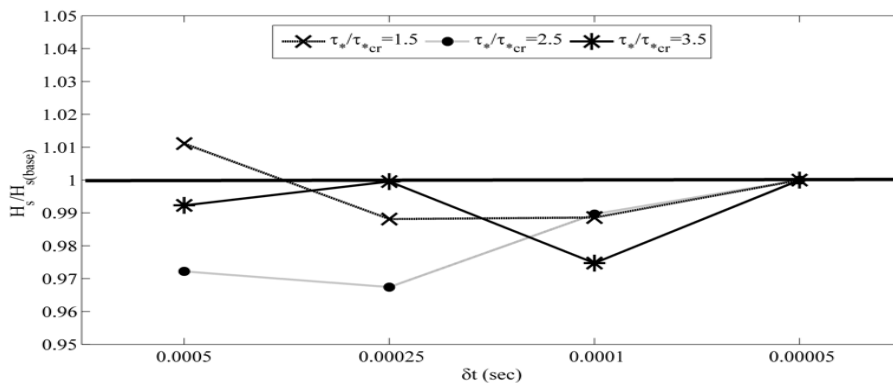
<sup>2</sup> Moving average

برخی مطالعات نظیر (Lukerchenko et al. 2009) حاصل شده است، معقول نیست.

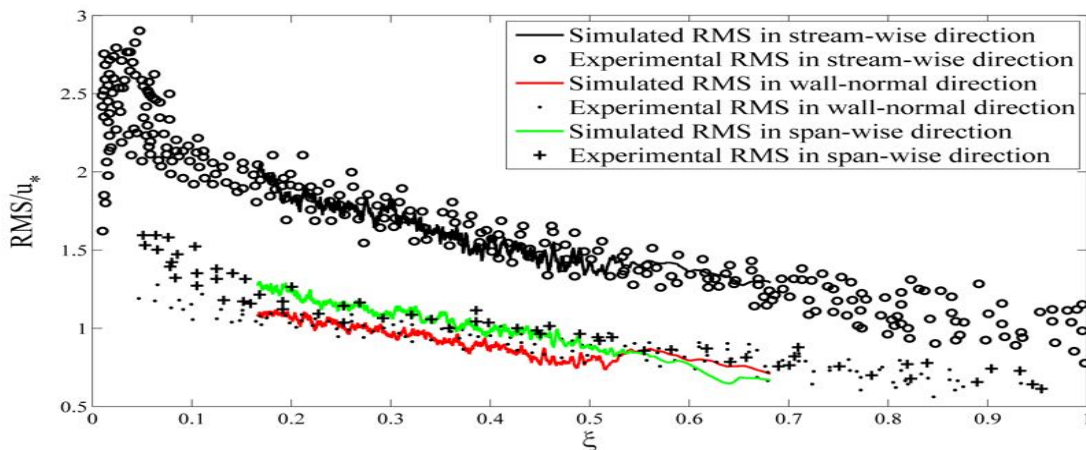
شایان ذکر است با توجه به عدم قطعیت موجود در داده‌های آزمایشگاهی، رسیدن به تطابق حداکثری که در



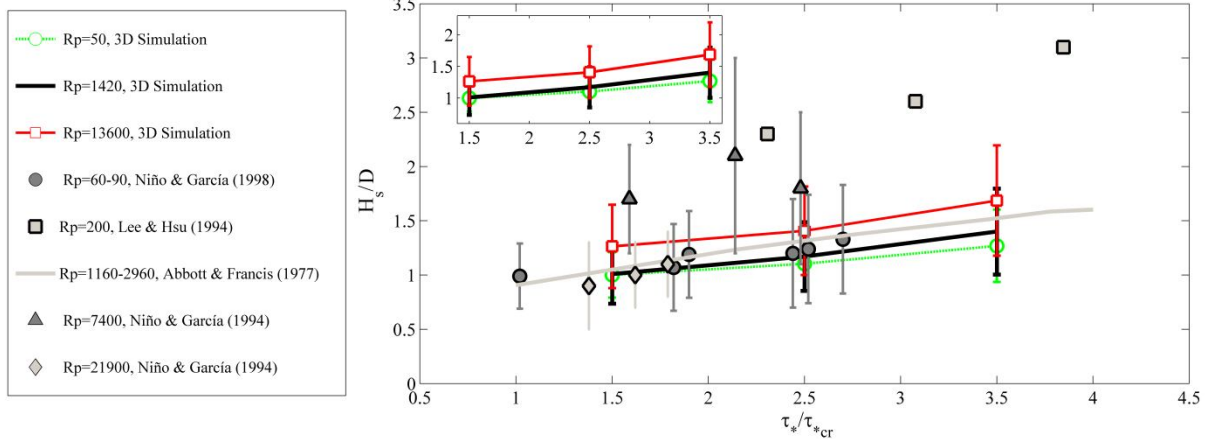
شکل 4 صحت‌سنجی مدل در ارتباط با حداقل تعداد پرش لازم برای استقلال آماری نتایج (بر اساس ارتفاع بدون بعد پرش) و مقایسه زمان شبیه‌سازی حالات مختلف



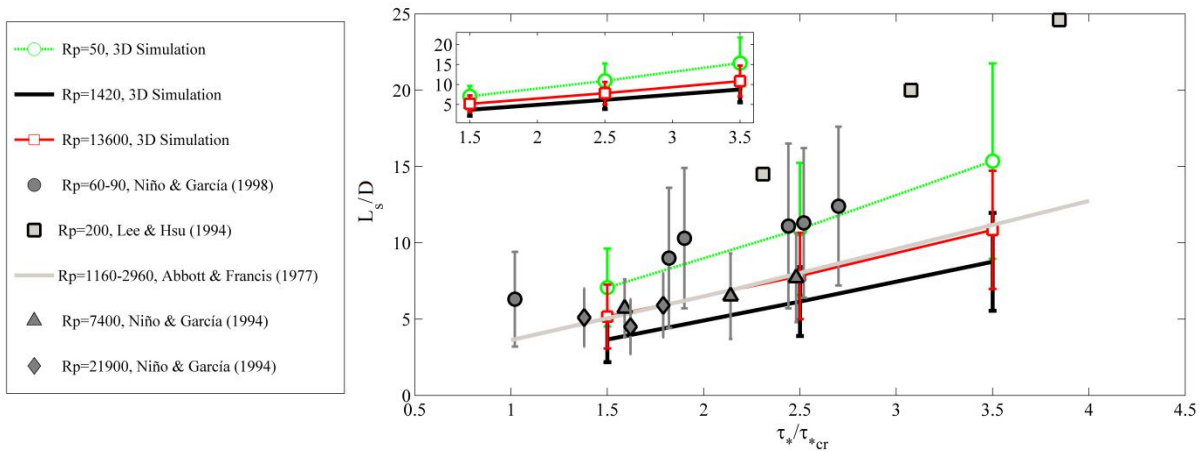
شکل 5 صحت‌سنجی مدل در ارتباط با مقدار گام زمانی



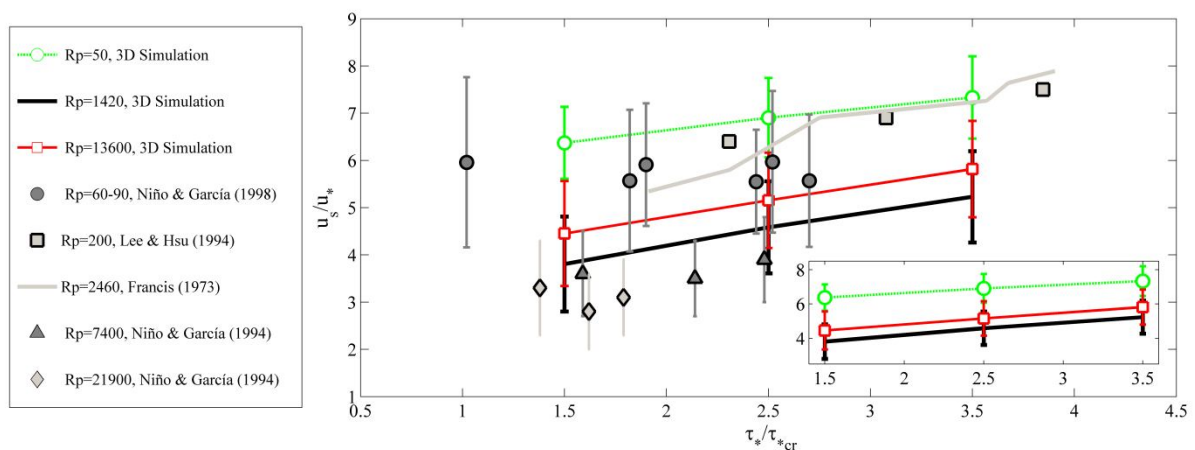
شکل 6 اعتبار سنجی زیر مدل آشفتگی



شکل 7 اعتبارسنجی مدل در ارتباط با ارتفاع پرش. خطوط قائم نشان دهنده انحراف معیار نتایج است (نتایج شبیه سازی به صورت بزرگ شده در گوشه تصویر ارائه شده است)



شکل 8 اعتبارسنجی مدل در ارتباط با طول پرش



شکل 9 اعتبارسنجی مدل در ارتباط با سرعت افقی متوسط پرش

آزمایشگاهی حاصل شده است، ولی در مطالعه حاضر تطابق قابل قبول با داده‌های آزمایشگاهی محققان مختلف برای

در مطالعه یادشده و مطالعات مشابه اگرچه برای یک قطر مشخص و شرایط جریان محدود، تطابق حداکثری با نتایج

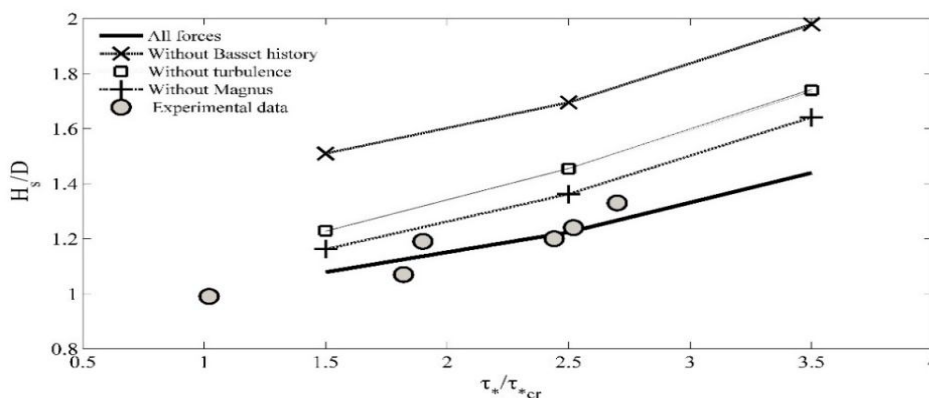
مشخصات متفاوت جریان در محدوده ماسه ریز تا شن درشت حاصل شده است که بسیار حائز اهمیت می‌باشد. برخی نتایج حاصل از مدل جالب توجه است. مثلاً نمودارهای طول پرش و سرعت متوسط برای  $Rp=13600$  بین  $Rp=60$  و  $Rp=1420$  قرار گرفته است. به عبارت دیگر با افزایش قطر از محدوده ماسه ریز به سمت شن درشت طول پرش و سرعت متوسط آن ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. یعنی ذرات در محدوده ماسه و شن روندهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در ارتباط با علت این موضوع می‌توان به بحث زیر اشاره نمود.

در محدوده شن نسبت به محدوده ماسه، اثر نیروی ثقل بسیار قابل توجه‌تر می‌باشد. این موضوع منجر به آن می‌شود که زمان پاسخ ذرات و دانه‌های ماسه نسبت به زمان پاسخ دانه‌های شن در یک شرایط جریان مشابه، کاملاً متفاوت باشد. منظور از زمان پاسخ، عکس‌العمل رسوبات در قبال نیروهایی هست که از سوی جریان به آنها وارد می‌شود. هنگامی که زمان پاسخ کوتاه است (قطرهای کوچکتر)، رسوبات به راحتی تحت تاثیر جریان قرار می‌گیرند، درحالی‌که با افزایش زمان پاسخ (افزایش قطر رسوب) تبعیت رسوبات نسبت به میدان جریان کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، یکی از ریشه‌های تفاوت روند پارامترها در محدوده ماسه و شن می‌تواند تفاوت در زمان پاسخ رسوبات با اندازه‌های مختلف به میدان جریان باشد.

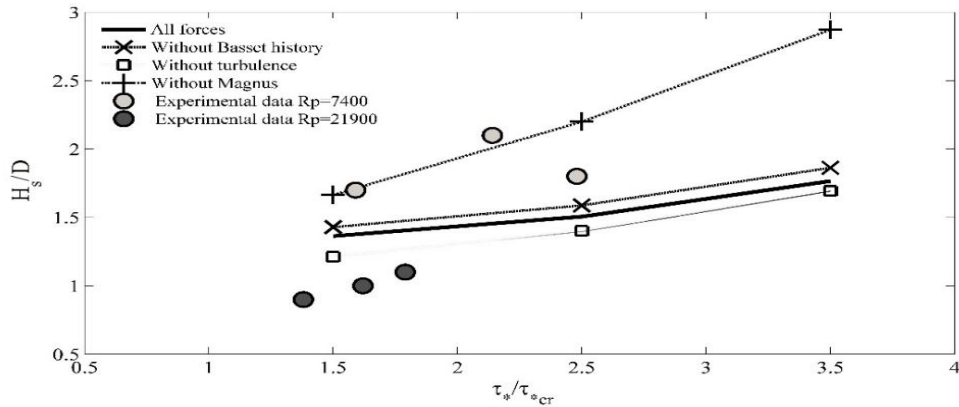
### 3-4- صلاحیت مدل مفهومی

به منظور بررسی صلاحیت مدل مفهومی اثر حذف کردن

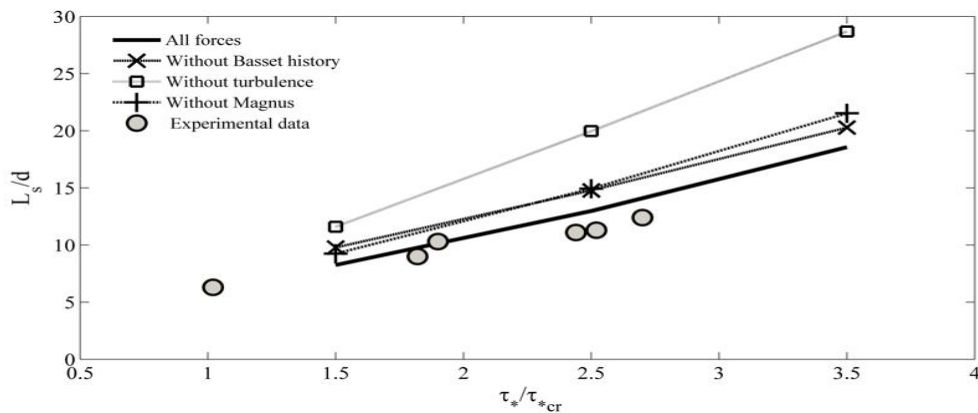
نیروهای هیدرودینامیکی تاریخی بست و لیفت چرخشی و همچنین نوسانات آشفتگی که در اکثر مطالعات پیشین از همه یا برخی از آن‌ها صرف‌نظر شده است، مدنظر قرار گرفته‌اند. نتایج مدل در ارتباط با معیار طول پرش برای دو محدوده ماسه و شن به ترتیب در شکل‌های 10 و 11 و در ارتباط با معیار طول پرش در شکل‌های 12 و 13 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت صرف نظر کردن از هر یک از عوامل ذکر شده منجر به فاصله نتایج از داده‌های آزمایشگاهی می‌گردد. در ارتباط با معیار ارتفاع پرش، در میان این سه عامل برای محدوده ماسه نیروی تاریخی بست بیشترین تأثیر را داشته، در جایگاه بعدی اثر نوسانات جریان آشفتگی و در انتها نیز نیروی لیفت چرخشی (مگنوس) قرار دارند. شایان ذکر است، در نظر گرفتن هر سه عامل در جهت کاهش مشخصات پرش هستند. برای محدوده شن، نیروی مگنوس بیشترین تأثیر را داشته است و دو عامل دیگر تأثیرات تقریباً مشابهی دارند. نکته قابل توجه آن است که در نظر گرفتن نیروی‌های مگنوس و تاریخی بست منجر به کاهش مشخصات پرش و در نظر گرفتن نوسانات آشفتگی منجر به افزایش مشخصات پرش در این محدوده می‌گردند. در ارتباط با معیار طول اثر آشفتگی در محدوده ماسه و نیروی مگنوس در محدود شن بیش‌ترین تأثیر را دارند. به این ترتیب مشاهده می‌گردد تمامی نیروهای در نظر گرفته شده برخلاف موارد ذکر شده در مطالعات پیشین، حداقل تحت شرایطی وابسته به قطر دانه و شدت جریان، اهمیت قابل توجهی دارند.



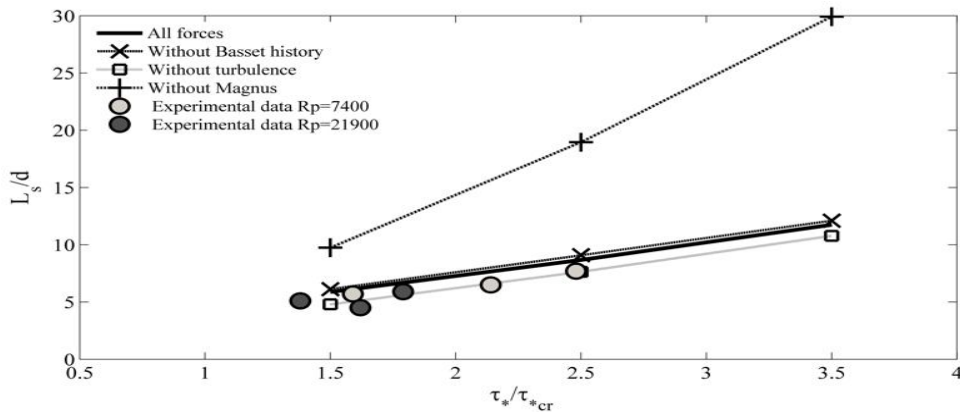
شکل 10 صلاحیت‌سنجی مدل مفهومی در ارتباط با ارتفاع پرش برای محدوده ماسه ( $Rp=50$ )



شکل 11 صلاحیت‌سنجی مدل مفهومی در ارتباط با ارتفاع پرش برای محدوده شن با  $(R_p=13600)$



شکل 12 صلاحیت‌سنجی مدل مفهومی در ارتباط با طول پرش برای محدوده ماسه  $(R_p=50)$



شکل 13 صلاحیت‌سنجی مدل مفهومی در ارتباط با طول پرش برای محدوده شن با  $(R_p=13600)$

## 5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک مدل سه‌بعدی کاملاً تصادفی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب توسعه داده شده است که در آن اثرات مهم هیدرودینامیکی و همچنین نوسانات جریان

مثال بارز این موضوع نیروی تاریخی بست است که در اکثر مطالعات پیشین مثل (van Rijn (1984, Lee et al. (2000, 2006) و Ji et al. (2014) با وجود اجرای مدل‌ها در محدوده ماسه و اهمیت فزاینده این نیرو در این محدوده رسوبات، به دلیل پیچیدگی و هزینه‌بر بودن محاسبات، از آن صرف‌نظر شده است.

$I_p$	اینرسی دانه رسوب
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی
$L_e$	طول گردابه
$m$	تعداد برخورد دانه‌ها با بستر
$m_p$	جرم دانه رسوب
$t$	زمان شبیه‌سازی
$t_{cross}$	زمان انقطاع گردابه
$\bar{u}_p$	بردار سرعت خطی رسوبات
$\overline{ua}_{pb}$	سرعت دانه قبل از برخورد
$\overline{ub}_{pb}$	سرعت دانه بعد از برخورد
$\overline{u}_{f0}$	سرعت سیال در لحظه آغازین
$\overline{u}_{p0}$	سرعت دانه در لحظه آغازین
$\overline{u}_r$	سرعت نسبی دانه نسبت به جریان
$u^*$	سرعت برشی
$\overline{x}_p$	بردار موقعیت مکانی دانه‌ها
$\overline{\omega}_p$	بردار سرعت زاویه‌ای رسوبات
$\overline{\omega}_r$	سرعت چرخشی نسبی دانه
$\rho_p$	چگالی دانه رسوب
$\rho_f$	چگالی سیال
$\nu$	لزجت سینماتیکی سیال
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال
$\tau$	متغیر موهومی برای انتگرال‌گیری
$\tau^*$	تنش برشی بدون بعد
$\tau^*_{cr}$	مقدار بحرانی تنش برشی بدون بعد
$\kappa$	ثابت فون کارمن
$\tau_e$	طول عمر گردابه
$\varepsilon$	نرخ استهلاك انرژی آشفته
$\tau_p$	زمان آسایش دانه رسوب

### 7- منابع

سرشتی، ف. و کلاه‌دوزان، م. (1392). "بررسی تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر حرکت ذرات رسوب برای جریان سیال در کانال‌ها"، نشریه هیدرولیک، 8(2)، 41-56.

کیورانی، س. و شانه‌ساززاده، ا. (1392). "شبیه‌سازی و بررسی اثر عوامل مؤثر بر حرکت تصادفی ذرات رسوب بار بستر در جریان ماندگار"، مهندسی عمران مدرس، 14(1)، 95-104.

مهدیزاده، س. س. (1387). "بررسی آزمایشگاهی حرکت ذره رسوبی در نزدیکی بستر با استفاده از دستگاه PIV"، پایان‌نامه

آشفته به صورت مؤثری مدنظر قرار گرفته‌اند. مدل تحت یک فرایند مدون صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و تعیین صلاحیت شده است. صحت سنجی مدل برای دو عامل حداقل تعداد پرش لازم برای رسیدن به استقلال آماری حل و مقدار گام زمانی، صورت گرفته است. اعتبارسنجی نیز از طریق مقایسه نتایج مدل با معتبرترین داده‌های موجود در محدوده وسیعی از قطر دانه و شرایط جریان مدنظر قرار گرفته است. به‌منظور تعیین صلاحیت مدل مفهومی نیز اثر در نظر گرفتن یا حذف نیروهایی که بر روی استفاده از آن‌ها در مطالعات پیشین اتفاق نظر وجود نداشته، تعیین شده است. یکی از نتایج مهم این پژوهش آن است که تغییر روند مشخصات پرش در محدوده تغییر قطر از ماسه به شن (بین 0/15 تا 0/25 سانتی-متر) رخ می‌دهد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت طبقه‌بندی رسوبات در محدوده ماسه و شن علاوه بر اینکه بر اساس معیار فیزیکی اندازه رسوب انجام شده است، بر اساس یافته‌های هیدرولیکی و اثرات نیروهای هیدرودینامیکی مختلف نیز قابل تفسیر می‌باشد.

به طور خلاصه نتایج حاکی از قابلیت کاربرد مدل برای محدوده وسیعی از دانه‌های رسوب از ماسه ریز تا شن درشت و شرایط مختلف جریان است. به این ترتیب این مدل به‌عنوان یک آزمایشگاه عددی قابل بررسی برای شرایط مختلف انتقال رسوب به‌منظور پیش‌بینی شرایط متفاوت با مرحله اعتبارسنجی می‌باشد که در بخش دوم این سری مقالات مد نظر قرار خواهد گرفت.

### 6- فهرست علائم

$A$	سطح مقطع دانه رسوب
$C_D$	ضریب درگ
$C_L$	ضریب لیفت
$C_m$	ضریب جرم اضافه‌شده
$C_T$	ضریب گشتاور چرخشی
$C_\mu$	پارامتر آشفتگی
$D$	قطر دانه رسوب
$e$	ضریب بازگشت
$f$	ضریب اصطکاک
$g$	شتاب ثقل

- channel bed," *Journal of Hydraulic Research*, 44(3), 374-389.
- Lukerchenko, N., Piatsevich, S., Chara, Z., Vlasak, P., Chára, Z., and Vlasák, P. (2009). "3D numerical model of the spherical particle saltation in a channel with a rough fixed bed," *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57(2), 100-112.
- Maxey, M. R., and Riley, J. J. (1983). "Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow," *Physics of Fluids*, 26(4), 883-889.
- Murphy, P. J., and Hooshier H. (1982). "Saltation in water dynamics," *Journal of the Hydraulics Division*, 108(11), 1251-1267.
- Nezu, I. (1977). Turbulent structure in open-channel flows. PhD Thesis, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Niño, Y. (1995). Particle motion in the near bed region of a turbulent open channel flow: implications for bedload transport by saltation and sediment entrainment into suspension, PhD Thesis, University of Illinois, USA.
- Niño, Y., and García, M. (1998). "Using Lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling," *Hydrological Processes*, 12(8), 1197-1218.
- Niño, Y., and García, M. (1994). "Gravel saltation: 2. Modeling," *Water Resources Research*, 30(6), 1915-1924.
- Oberkampf, W. L., Sindir, M. M., and Conlisk, A. T. (1998). Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- Papanicolaou A. N., Elhakeem M., Krallis G., Prakash S. and Edinger J. (2008). "Sediment transport modeling review—current and future developments," *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 134(1), 1-14.
- Reizes, J. A. (1978). "Numerical study of continuous saltation," *Journal of the Hydraulics Division*, 104(9), 1305-1321.
- Sekine, M., and Kikkawa, H. (1992). "Mechanics of saltating grains. II," *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), 536-558.
- Tian, L., and Ahmadi, G. (2007). "Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions," *Journal of Aerosol Science*, 38(4), 377-397.
- Tsuchiya, Y. (1969). "Mechanics of the successive
- کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- نصراللهی، ع. (1389). "شبیه‌سازی عددی انتقال بار بستر با استفاده از جریان دوفازی اولری-لاگرانژی"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- Abbott, J. E., and Francis, J. R. D. (1977). "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 284(1321), 225-254.
- Bagnold, R. A. (1973). "The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water." *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), 473-504.
- Barati, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A., and Ahmadi, G. (2014). "Development of empirical models with high accuracy for estimation of drag coefficient of flow around a smooth sphere: an evolutionary approach," *Powder Technology*, 257, 11-19.
- Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. (2011). *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press.
- Francis, J. R. D. (1973). "Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream." In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 332(1591) 443-471.
- García, M. H. (Ed.). (2008). *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice* (No. 110). ASCE Publications.
- Gosman, A. D., and Loannides, E. (1983). "Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors," *Journal of Energy*, 7(6), 482-490.
- Ji, C., Ante, M., Eldad, A., Xu, D., and John, W. (2014). "Numerical investigation of particle saltation in the bed-load regime," *Science China Technological Sciences*, 57(8), 1500-1511.
- Lee, H. Y., and Hsu, I. S. (1994). "Investigation of saltating particle motions." *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7), 831-845.
- Lee, H. Y., Chen, Y. H., You, J. Y., and Lin, Y. T. (2000). "Investigations of continuous bed load saltating process," *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 691-700.
- Lee, H. Y., Lin, Y. T., Yunyou, J., and Wenwang, H. (2006). "On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the



- Wiberg, P. L., and Smith, J. D. (1985). "A theoretical model for saltating grains in water," *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 90(C4), 7341-7354.
- Yalin, M. S. (1992). *River mechanics*. Pergamon Press, New York.
- Yeganeh-Bakhtiary, A., Shabani, B., Gotoh, H., and Wang, S. S. (2009). "A three-dimensional distinct element model for bed-load transport" *Journal of Hydraulic Research*, 47(2), 203-212
- saltation of a sand particle in a turbulent stream," *Bull. Dis. Pre. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 19(152), 31-44.
- Tsuji, Y., Oshima, T., and Morikawa, Y. (1985). "Numerical simulation of pneumatic conveying in a horizontal pipe," *KONA Powder and Particle Journal*, 3, 38-51.
- van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, part I: bed load transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.