

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری تخصصی (ph.D) مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی

عنوان:

شبیه‌سازی عددی انتقال بار بستر با رویکرد اویلری-لاگرانژی و برخورد

ذرات در جریان‌های آشفته

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

نام دانشجو:

امین نوری

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۸۸/۲۷
تاریخ: ۸۸/۲۷
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی‌های ۹۴ و ماقبل)

بدین وسیله گواهی می‌شود آقای امین نوری دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران به شماره دانشجویی ۹۲۱۶۳۰۵ ورودی ماه مهر سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۹۸/۰۶/۲۶ از رساله نظری ☐ / عملی ☒ خود با عنوان: شبیه‌سازی عددی انتقال بار پستر با رویکرد اویلری-لاگرانژی و برخورد ذرات در جریان‌های آشفته دفاع و با اخذ نمره به درجه: نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☒	ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ ☐	د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	اعضاء
۱	دکتر رامین امینی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر خسرو حسینی	داور خارجی	دانشیار	
۳	دکتر امیرعباس عابدینی	داور داخلی	استادیار	
۴	دکتر علی عباس نژاد	داور داخلی	استادیار	
۵	دکتر مهدی عجمی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش‌آموختگی آقای امین نوری به عمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
دانشکده مهندسی عمران
نام و نام خانوادگی مدیر دانشکده:
آموزش تحصیلات تکمیلی

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایشار و از خودگذشتگی.

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است.

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند...

و تقدیم به همسر عزیزم

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و

آسایش برای من فراهم آورده است...

تقدیر و تشکر

خداوند بزرگ و بلند مرتبه را سپاسگزارم که توفیق داده است در سایه الطاف و مرحمت‌های همیشگی و بیکران‌ش رساله دکتری به پایان رسد.

بر خود لازم می‌دانم از زحمات فراوان و رہنمودهای استاد مهربانم، دکتر رامین ایمنی که در طی این مسیر پژوهشی صبورانه به بنده کمک کرده اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از زحمات دکتر خسرو حسینی، دکتر امیر عباس علیدینی و دکتر علی عباس نژاد که قبول زحمت فرموده و به مطالعه و بررسی این پژوهش همت نهادند، صمیمانه قدردانی می‌کنم.

در پایان از تمامی دوستان خوبم دکتر حامد حق‌نظر، مهندس علیرضا عطریان و دکتر نیاسام خانیانی که در این مدت از بهفکری آن‌ها استفاده کردم، سپاسگزاری می‌کنم.

تعهدنامه

اینجانب امین نوری دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله شبیه‌سازی عددی انتقال بار بستر با رویکرد اوپلری-لاگرانژی و برخورد ذرات در جریان‌های آشفته تحت راهنمایی دکتر رامین امینی به‌عنوان استاد راهنمای اول متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام <<دانشگاه صنعتی شاهرود>> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

*متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیرشده رساله وجود داشته باشد.

چکیده

انتقال ذرات جامد در جریان سیال، یک پدیده‌ی رایج در طبیعت بوده و نمونه‌ی معمول آن در علم هیدرولیک، انتقال رسوب در رودخانه‌ها می‌باشد. در یک کانال با بستری متشکل از مواد رسوبی، در جریان‌های با دبی ناچیز، ذرات بستر هیچ‌گونه حرکتی نداشته و در محل خود ثابت باقی می‌مانند. با افزایش دبی ذرات بستر شروع به حرکت کرده که این لحظه، آستانه حرکت ذرات رسوب نامیده می‌شود.

در این پژوهش با استفاده از یک مدل عددی بر اساس نرم‌افزار OpenFOAM، به شبیه‌سازی دوبعدی انتقال ذرات رسوب به‌صورت انفرادی و گروهی در جریان آشفته پرداخته شده است. رویکرد اتخاذ شده در شبیه‌سازی به‌صورت اویلری-لاگرانژی بوده که در آن فاز پیوسته به‌صورت اویلری و با روش حجم محدود و ذرات رسوب به‌صورت لاگرانژی و با روش ردیابی ذرات شبیه‌سازی می‌شوند. در مدل حاضر اثر سیال بر ذره، ذره بر سیال و همچنین نیروهایی که ذرات رسوب به یکدیگر وارد می‌کنند، در نظر گرفته شده است. برای لحاظ نمودن اثر برخورد ذرات رسوب به یکدیگر، از یک مدل برخورد ذرات رسوب استفاده شده که هزینه‌ی محاسباتی آن در مقایسه با مدل برخورد موجود، کمتر می‌باشد.

پارامترهای تأثیرگذار روی جریان و ذره‌ی رسوب صحت‌سنجی شده و با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی محققین مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب، بر روی بستر زبر شبیه‌سازی شده و سرعت جریان و ذره، نیروهای وارد بر ذره و سرعت افقی و عمودی جهش مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب در قالب روش‌های تنش برشی، سرعت بحرانی و دو معیار دیگر با نتایج محققین مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و یک رابطه برای آستانه حرکت ذرات در روش سرعت بحرانی پیشنهاد شده است. در نهایت پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی شامل عدد رینولدز ذره، شیب طولی بستر و زاویه ایستایی ذرات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدل اویلری-لاگرانژی حاضر به خوبی توانسته پدیده‌های مذکور را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرده و برای مسائل مشابه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: اویلری-لاگرانژی، انتقال رسوب، روش حجم محدود، روش ردیابی ذرات، جهش، غلتش، آستانه حرکت

لیست مقالات مستخرج از رساله

- ✓ شبیه‌سازی عددی معیارهای آستانه حرکت ذرات رسوب با رویکرد اویلری لاگرانژی (مجله‌ی تحقیقات آب و خاک ایران)
- ✓ Numerical simulation of effective parameters on threshold of motion of sediment particles with Eulerian-Lagrangian approach (Journal of Applied Research in Water and Wastewater)
- ✓ بررسی عددی پروفیل سرعت جریان آشفته در کانال با بستر صاف و زبر (شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، شهریور ۹۶)
- ✓ بررسی عددی غلتش ذره‌ی رسوب در کانال با بستر زبر (هفدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۹۷)

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسئله	۲
۳-۱- مودهای انتقال ذرات رسوب	۵
۴-۱- دیدگاه‌های لاگرانژی و اویلری در حل معادلات جریان	۷
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق	۸
۶-۱- نوآوری تحقیق	۱۰
۷-۱- روش انجام تحقیق	۱۱
۸-۱- ساختار رساله	۱۲
فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده	۱۵
۱-۲- مقدمه	۱۶
۲-۲- آستانه حرکت ذرات رسوب	۱۶
۳-۲- پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی	۲۲
۴-۲- مدل‌های حرکت رسوب	۲۶
۵-۲- مطالعات عددی انجام شده	۲۷
۶-۲- مدل‌های برخورد ذرات رسوب	۳۰
۷-۲- جمع‌بندی	۳۱
فصل ۳- روابط و معادلات حاکم	۳۳
۱-۳- مقدمه	۳۴

۳-۲-معادلات فاز پیوسته	۳۴
۳-۳-معادلات جریان آشفته	۳۵
۳-۴-تئوری لایه مرزی	۳۹
۳-۵-روش لاگرانژی ردیابی ذرات	۴۱
۳-۶-نیروهای وارد بر ذرات	۴۳
۳-۷-برخورد بین ذرات	۴۸
۳-۸-تبادل مومنتوم و ذره‌ی سیال	۵۱
۳-۹-آستانه حرکت ذرات رسوب	۵۳
فصل ۴-مدل‌سازی، صحت‌سنجی و بررسی نتایج	۵۵
۴-۱-مقدمه	۵۶
۴-۲-معرفی نرم‌افزار و نحوه‌ی مدل‌سازی	۵۶
۴-۳-اعمال مدل برخورد	۶۱
۴-۴-بررسی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی و همگرایی	۶۸
۴-۵-صحت‌سنجی مدل عددی	۷۱
۴-۵-۱- مدل‌سازی پروفیل سرعت جریان آشفته روی بستر زبر	۷۲
۴-۵-۲- مدل‌سازی سرعت سقوط یک ذره در سیال ساکن	۷۷
۴-۶-شبیه‌سازی غلتش یک ذره‌ی رسوب	۸۰
۴-۶-۱- مدل‌سازی مسیر غلتش	۸۰
۴-۶-۲- بررسی رابطه سرعت جریان و ذره	۸۳
۴-۶-۳- بررسی نیروهای وارد بر ذره	۸۶
۴-۷-شبیه‌سازی جهش یک ذره‌ی رسوب	۸۹
۴-۷-۱- بررسی رابطه بین سرعت جریان و ذره	۹۰
۴-۷-۲- بررسی مسیر جهش ذره	۹۳

۳-۷-۴	بررسی سرعت‌های افقی و عمودی جهش	۹۴
۸-۴	شبیه‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب	۹۶
۱-۸-۴	مدل‌سازی عددی آستانه حرکت ذرات رسوب	۹۷
۲-۸-۴	بررسی معیارهای مختلف آستانه حرکت ذرات	۱۱۰
۳-۸-۴	بررسی اثر شیب طولی بستر روی شیلدز بحرانی	۱۱۴
۴-۸-۴	بررسی اثر زاویه ایستایی ذرات رسوب روی شیلدز بحرانی	۱۱۶
فصل ۵	نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۱۱۹
۱-۵	مقدمه	۱۲۰
۲-۵	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱۲۰
۳-۵	پیشنهادها	۱۲۳
مراجع		۱۲۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ عوامل مؤثر در فرآیند انتقال رسوب [1] ۵
- شکل ۲-۱ مودهای انتقال ذرات رسوب [1] ۶
- شکل ۳-۱ مقایسه‌ی دو دیدگاه متفاوت نسبت به بررسی جریان (a) دیدگاه اویلری (b) دیدگاه لاگرانژی [6] ۸
- شکل ۴-۱ آبشستگی پایه پل که منجر به تخریب پل شده است (چم‌چال، کرمانشاه) ۹
- شکل ۱-۲ دیاگرام Shields جهت تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب [9] ۱۸
- شکل ۲-۲ اصلاحات انجام شده توسط Mantz و Yalin and karahan [11] ۲۰
- شکل ۳-۲ تأثیر استغراق نسبی روی شیلدرز بحرانی [20] ۲۳
- شکل ۴-۲ تغییرات تنش برشی بستر شیب‌دار به افقی در برابر تغییرات شیب بستر برای ذرات با زاویه ایستایی ۴۰ درجه [22] ۲۴
- شکل ۵-۲ بررسی تنش برشی ذره‌ی رسوب تحت شیب طولی و عرضی بستر در آزمایش‌های Dey [23] ۲۴
- شکل ۱-۳ پروفیل سرعت در لایه‌های مختلف جریان نسبت به فاصله تا دیواره (پروفیل قرمز رنگ حاصل داده‌های تجربی) [43] ۴۱
- شکل ۲-۳ رویکردهای مدل‌سازی برخورد ذرات در برخورد با و بدون نفوذ ذره [34] ۴۹
- شکل ۳-۳ سیستم فعال فنر-دمپر در حالت هم‌پوشانی دو ذره‌ی متصادم [34] ۵۰
- شکل ۴-۳ تقسیم‌بندی رژیم‌های جریان در جریان‌های دارای فاز ذره ۵۲
- شکل ۵-۳ تعادل لنگری نیروهای درگ و لیفت و ثقل در نقطه‌ی p [57] ۵۴
- شکل ۱-۴ فلوچارت ساختار حلگر DPMFoam ۵۹
- شکل ۲-۴ فلوچارت ساختار مدل برخورد تصادفی ۶۴
- شکل ۳-۴ شماتیک کانال مورد استفاده در آزمایشگاه با مدل‌سازی یک سرریز و بستر ثابت و بستر [57] ۶۴
- شکل ۴-۴ شماتیک محدوده‌ی محاسباتی با اسامی هر یک از مرزها ۶۶
- شکل ۵-۴ مقایسه‌ی پروفیل آبشستگی بین نتایج دو مدل برخورد و نتایج آزمایشگاهی Gruber ۶۷
- شکل ۶-۴ مقایسه نتایج آبشستگی پای سرریز الف) نتایج آزمایشگاهی ب) شبیه‌سازی عددی ۶۷

- شکل ۷-۴ نمایی از تقسیم‌بندی میدان حل به نواحی چهارگانه ۶۸
- شکل ۸-۴ نحوه استفاده از توابع دیوار به عنوان جایگزین حل عددی ۷۱
- شکل ۹-۴ بررسی همگرایی پارامترهای مختلف مسئله ۷۲
- شکل ۱۰-۴ شماتیک هندسه مدل‌سازی شده ۷۴
- شکل ۱۱-۴ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۷۹ ۷۵
- شکل ۱۲-۴ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی و نتایج تحلیلی در زبری نسبی ۱۰۰ ۷۵
- شکل ۱۳-۴ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۲۸۸ ۷۶
- شکل ۱۴-۴ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۷۴.۵ ۷۶
- شکل ۱۵-۴ مقایسه‌ی پروفیل سرعت در دو حالت استفاده از بستر زبر و ذرات لاگرانژی در زبری نسبی ۱۰۰ ۷۷
- شکل ۱۶-۴ شماتیک مخزن مورد آزمایش و مخزن واقعی حاوی گلیسرین [64] ۷۹
- شکل ۱۷-۴ هندسه، مش‌بندی و موقعیت ذره مدل شده در نرم‌افزار ۷۹
- شکل ۱۸-۴ هندسه‌ی مدل‌سازی شده ذره روی بستر زبر ۸۲
- شکل ۱۹-۴ مقایسه مسیر اندازه‌گیری شده بین نتایج مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی ۸۳
- شکل ۲۰-۴ مراحل مختلف غلتش ذره‌ی رسوب بر روی بستر ۸۳
- شکل ۲۱-۴ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک شیشه‌ای بر حسب سرعت متوسط جریان ۸۵
- شکل ۲۲-۴ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک فولادی بر حسب سرعت متوسط جریان ۸۵
- شکل ۲۳-۴ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک فولادی و شیشه‌ای بر حسب سرعت جریان ۸۶
- شکل ۲۴-۴ تغییرات نیروهای درگ و لیفت برای غلتش یک ذره‌ی رسوب ۸۷
- شکل ۲۵-۴ بزرگنمایی تغییرات نیروی درگ در طول مسیر حرکت ذره ۸۸
- شکل ۲۶-۴ بزرگنمایی تغییرات نیروی لیفت در طول مسیر حرکت ذره ۸۹
- شکل ۲۷-۴ فازهای مختلف جهش یک ذره [66] ۹۰
- شکل ۲۸-۴ سرعت متوسط ذره‌ی شیشه‌ای بر حسب سرعت متوسط جریان برای حالت جهش ذره ۹۱
- شکل ۲۹-۴ سرعت متوسط ذره‌ی فولادی بر حسب سرعت متوسط جریان برای حالت جهش ذره ۹۲
- شکل ۳۰-۴ سرعت متوسط ذره‌ی فولادی در مقایسه با ذره‌ی شیشه‌ای برای حالت جهش ذره ۹۳
- شکل ۳۱-۴ مسیر جهش ذره به قطر ۴ میلی‌متر ۹۴
- شکل ۳۲-۴ سرعت بی‌بعد شده افقی ذره‌ی متحرک در طول مسیر جهش ۹۵

- شکل ۳۳-۴ سرعت بی بعد شده عمودی ذره‌ی متحرک در طول مسیر جهش ۹۶
- شکل ۳۴-۴ شماتیک هندسه‌ی مدل شده در نرم افزار ۹۸
- شکل ۳۵-۴ نمایی از مش بندی هندسه مسئله ۹۹
- شکل ۳۶-۴ خطوط جریان میدان حل پس از آستانه حرکت ذرات رسوب ۹۹
- شکل ۳۷-۴ مراحل مختلف به آستانه حرکت رسیدن ذرات رسوب در $Re^*=910$ ۱۰۰
- شکل ۳۸-۴ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Shields ۱۰۱
- شکل ۳۹-۴ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Iwagaki ۱۰۲
- شکل ۴۰-۴ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Yalin and Karahan ۱۰۲
- شکل ۴۱-۴ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Wiberg and Smith ۱۰۳
- شکل ۴۲-۴ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Dey و همکاران ۱۰۳
- شکل ۴۳-۴ مقایسه‌ی روابط مختلف آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی ۱۰۴
- شکل ۴۴-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت پیش بینی شده توسط رابطه ۱۰۴
- ۱۸-۴ ۱۰۵
- شکل ۴۵-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت پیش بینی شده توسط رابطه ۱۰۵
- ۱۹-۴ ۱۰۶
- شکل ۴۶-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Straub ۱۰۶
- شکل ۴۷-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Bogardi ۱۰۷
- شکل ۴۸-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Shafaei Bejestan ۱۰۷
- شکل ۴۹-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Ghani و همکاران ۱۰۸
- شکل ۵۰-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Bong و همکاران ۱۰۸
- شکل ۵۱-۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Safari و همکاران ۱۰۹
- شکل ۵۲-۴ آستانه حرکت ذرات رسوب طبق معیار Hydraulics Delft ۱۱۱
- شکل ۵۳-۴ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Hydraulics Delft ۱۱۲
- شکل ۵۴-۴ آستانه حرکت ذرات رسوب طبق معیار Graf and Pazis ۱۱۳
- شکل ۵۵-۴ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Graf and Pazis ۱۱۳
- شکل ۵۶-۴ تغییرات α/φ در مقابل پارامتر τ ۱۱۵
- شکل ۵۷-۴ تغییرات شیب طولی بستر در مقابل پارامتر شیلدز بحرانی در زوایای سکون مختلف .. ۱۱۶

شکل ۵۸-۴ تغییرات زاویه ایستایی ذرات در مقابل شیلدز بحرانی در مقایسه با نتایج محققین دیگر

۱۱۷.....

شکل ۵۹-۴ تغییرات شیلدز بحرانی در مقابل تغییرات زاویه ایستایی برای شیب‌های منفی ۱۱۸

شکل ۶۰-۴ تغییرات شیلدز بحرانی در مقابل تغییرات زاویه ایستایی برای شیب‌های مثبت ۱۱۸

فهرست جداول

جدول ۱-۲	اصلاحات وارد شده به دیاگرام شیلدرز در طی زمان [11].....	۱۹
جدول ۲-۲	ضرایب a و b در رابطه‌ی ۲-۳ به دست آمده توسط محققین مختلف	۲۱
جدول ۱-۳	ضرایب ثابت مدل آشفستگی k-ε استاندارد	۳۹
جدول ۱-۴	جزئیات انواع شبکه‌های انتخابی جهت بررسی دقت شبکه	۶۹
جدول ۲-۴	نتایج شیلدرز بحرانی ذرات رسوب برای شبکه‌بندی‌های مختلف	۷۰
جدول ۳-۴	مشخصات ذرات مورد استفاده در آزمایش	۷۸
جدول ۴-۴	سرعت حدی به دست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی	۸۰
جدول ۵-۴	محدوده‌ی متغیرهای مورد بررسی در شبیه‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات	۹۷
جدول ۶-۴	مقایسه نتایج دبی بار بستر به دست آمده از مدل عددی در مقایسه با رابطه‌ی انیشتین	۱۱۰

فصل اول:

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در علم هیدرولیک رسوب تاکنون تحقیقات بسیاری انجام شده است. این علم مدت‌هاست که مورد توجه دانشمندان در رشته‌های مختلف مهندسی و علوم قرار دارد. گفته می‌شود اولین بار تمدن‌های باستانی در هنگام ساخت کانال‌های آب به مطالعه در مورد رسوب احساس نیاز نمودند. از زمان گالیله، انتقال رسوب موضوع تحقیقات محققین با رویکردهای مختلف بوده است و پژوهشگران مختلف هرکدام با تغییر رویکرد سعی نموده‌اند، به جواب قطعی و کامل در شناخت پدیده برسند. به‌طوری که اکنون نام بردن از دانشمندانی که در مورد رسوب تألیفاتی داشته‌اند، کار بسیار مشکل و زمانبری است. با این وجود، تحقیقات بعد از گذشت قرن‌ها هنوز به نقطه مناسبی برای شناخت پدیده انتقال رسوب آن‌چنان‌که در بسیاری از زمینه‌ها دست یافته، نرسیده است. به اعتقاد بسیاری، دانش رسوب هنوز در نیمه‌های راه است و می‌توان گفت پیش‌بینی گالیله در مورد دشواری‌های شناخت این پدیده به واقعیت پیوسته است. به‌طوری که در عصری که بشر به راحتی توان محاسبه و پیش‌بینی طولانی‌مدت و دقیق اجرام آسمانی و حتی پرتاب موشک و قرارگیری دقیق آن‌ها در مدار را دارد، از محاسبه و پیش‌بینی رفتار طبیعت در مورد رسوب ناتوان بوده و همچنان دقت محاسبات بالا نمی‌باشد.

۱-۲- بیان مسئله

درک پدیده‌های طبیعی که در اطراف بشر به وقوع می‌پیوندد از دیرباز دارای اهمیت زیادی بوده است. از این رو همواره محققان در تلاش بوده‌اند تا با یافتن قوانین حاکم بر این پدیده‌ها به کنترل آن‌ها پرداخته و به نحو مطلوب از آن‌ها در جهت رشد و توسعه‌ی زندگی بشر استفاده نمایند.

یکی از این پدیده‌ها که از فضای پیچیده‌ی خاصی نیز برخوردار است، پدیده‌ی رسوب و انتقال آن در رودخانه‌ها و کانال‌ها می‌باشد. هیدرولیک انتقال رسوب و یا به اختصار هیدرولیک رسوب دانشی است که چگونگی حرکت، فرسایش و رسوب‌گذاری مواد رسوبی در کانال‌ها و رودخانه‌ها را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. این علم بر پایه‌ی علوم‌ی چون مکانیک سیالات، هیدرولیک، هیدرولیک رودخانه و رسوب‌شناسی استوار است.

از آنجا که خسارت وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای بر طبیعت، کشاورزی و سازه‌های آبی ساخته شده در کنار رودخانه‌ها، بسیار گسترده و وسیع و در اکثر موارد زیان‌آور است، شناخت دقیق این علم

از اهداف مهم مهندسان هیدرولیک می‌باشد. پیش‌بینی انتقال رسوب در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به سبب اهمیت عملی در زمینه‌ی تحقیقات قابل‌توجه بوده چرا که پیش‌بینی آن جهت محاسبات ریسک آبشستگی سازه یا به‌منظور برآورد تغییرات شکل بستر رودخانه بسیار دارای اهمیت است.

گزارش‌های زیادی از شکست سازه‌های هیدرولیکی به دست رسیده که در آن‌ها انتقال رسوب به‌طور صحیح لحاظ نگردیده و سبب تخریب سازه شده است. به‌طور کلی، یک برآورد دقیق از عمق آبشستگی و پیشروی آن در زمان ضروری می‌باشد. از این رو تجربیات فراوان، بینش فیزیکی از هیدرولیک انتقال رسوب و فرآیند مورفولوژی، لازم می‌گردد.

انتقال رسوب اساساً به سه روش قابل پیش‌بینی است: روش تحلیلی، ساختن مدل فیزیکی و یا به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی عددی. روش‌های تحلیلی تنها می‌توانند برای مسائل ساده‌سازی شده به کار گرفته شوند و به همین جهت به‌کارگیری این روش برای مسائل عملی به‌ندرت قابل استفاده می‌باشد. مدل‌های عددی در مقایسه با روش آزمایشگاهی این مزیت را دارا بوده که نه تنها از لحاظ هزینه به صرفه‌تر می‌باشد بلکه مشکل همانندی با نمونه‌ی اصلی به نحوی که مدل بتواند ابعاد واقعی را شبیه‌سازی کند، نخواهد داشت.

فرآیند انتقال رسوب به علت وجود عوامل نامنظم نظیر شکل بستر و آشفتگی جریان، جزو فرآیندهای تصادفی دسته‌بندی می‌شود. محاسبه‌ی نرخ انتقال رسوب تابع پیچیده‌ای از پارامترهای مختلفی نظیر ارتفاع آب، امواج، خصوصیات بستر، نوع جریان، اندازه و شکل و جنس ذرات و دانه‌بندی آن‌ها و دیگر عوامل است. شکل بستر شامل بی‌نظمی‌های موجود در انواع مختلف مقیاس مانند دیون^۱ و رپل‌ها^۲ است که این بی‌نظمی‌ها باعث حرکت نامنظم ذرات شده و به همین علت تحلیل ساختار فرآیند انتقال رسوب شامل پیچیدگی‌های بسیاری می‌باشد. عوامل مختلف دیگری در نحوه و سرعت رسوب‌گذاری تأثیرگذار هستند که از آن جمله می‌توان به موج، جریان، جذر و مد، باد و فعالیت‌های بشر و نیز فعالیت‌های ارگانیک زنده اشاره نمود.

1 Dune

2 Ripple

پیشرفت‌های دینامیک سیالات محاسباتی، پایه‌ای را برای فهم و درک بیشتر در جریان‌های چندفازی^۱ فراهم آورده است. در سال‌های اخیر دو رویکرد متفاوت به‌منظور محاسبات جریان‌های چندفازی مانند انتقال رسوب یعنی رویکرد اویلری-لاگرانژی^۲ و اویلری-اویلری^۳ وجود داشته است. در رویکرد اویلری-لاگرانژی فاز سیال به‌صورت پیوسته با حل معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری‌شده در زمان به دست آمده درحالی‌که فاز پراکنده از طریق ردیابی تعداد زیادی از ذرات، حباب‌ها^۴ و یا قطرات^۵ در میدان جریان حل می‌شود. فاز پراکنده می‌تواند در تبادل مومنت، جرم و انرژی با فاز سیال باشد. در رویکرد اویلری-اویلری فازهای متفاوت به نحو نفوذناپذیری پیوسته در نظر گرفته شده و از آنجایی که حجم فاز نمی‌تواند توسط دیگر فازها اشغال گردد، مفهوم کسر حجمی فاز معرفی می‌گردد. فرض بر آن است که کسر حجمی دو یا چند فاز در زمان و مکان پیوسته بوده و جمع آن‌ها به این صورت که هر کدام از فازها مقدار حجمی مشخص از حجم واحد را اشغال کرده‌اند، برابر مقدار واحد می‌گردد. به منظور به دست آوردن مجموعه‌ای از معادلات که ساختار یکسانی برای تمامی فازها دارد، معادلات بقا برای هر یک از فازها به دست آمده که این معادلات با استفاده از روابطی تجربی بسته می‌شوند.

فرآیند انتقال رسوب در سیال از زیرفرآیندهایی که ناشی از اندرکنش بین عوامل اصلی در فرآیند انتقال رسوب هستند، تشکیل شده است. در تحقیق حاضر که به‌صورت اویلری-لاگرانژی به بررسی فرآیند انتقال رسوب می‌پردازد، سه عامل سیال، ذره و بستر جهت مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سیال در اینجا فاز پیوسته‌ای را که معادلات آن با رویکردی اویلری حل شده و بیانگر تمامی کنش‌های ناشی از وجود موج، جریان، آشفتگی و غیره است را تشکیل می‌دهد. بستر نماینده‌ی مرزی صلب و ثابت میدان حل مسئله بوده و ذرات فاز گسسته‌ی ذرات رسوب را که قابلیت تحرک و در عین حال کنش و واکنش با فاز پیوسته سیال و بستر صلب و دیگر ذرات را داشته و معادلات آن با رویکردی لاگرانژی حل می‌گردد، تشکیل می‌دهد.

با توجه به اینکه اندرکنش هر کدام از این عوامل قابل تعریف و بررسی می‌باشد، می‌توان تعامل هر کدام از این عوامل با دیگری را به‌صورت شکل ۱-۱ نشان داد. در این تقابل چنانچه صرفاً اثرات ذره بر

1 Multiphase flows

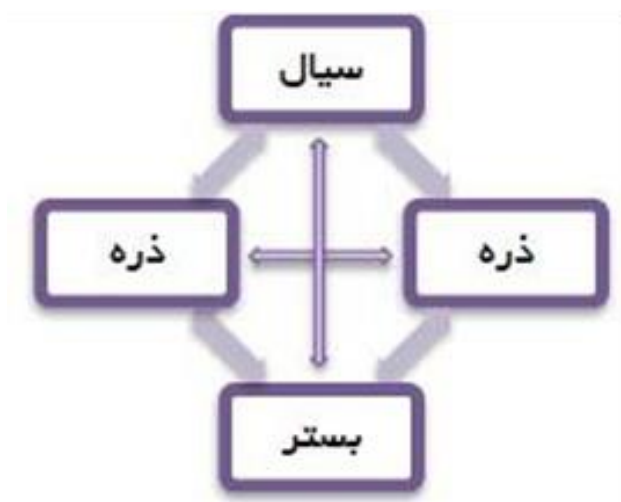
2 Eulerian-Lagrangian Method

3 Eulerian-Eulerian Method

4 Bubbles

5 Drops

سیال یا سیال بر ذره در نظر گرفته شود به آن کوپلینگ یک‌جهته^۱ و اگر اندرکنش سیال و ذره، هر دو بر روی یکدیگر مدنظر باشد به آن کوپلینگ دوجته^۲ و در صورتی که اندرکنش ذره با ذره نیز لحاظ گردد، به آن کوپلینگ چهارجهته^۳ می‌گویند [۱].



شکل ۱-۱ عوامل مؤثر در فرآیند انتقال رسوب [1]

۳-۱- مودهای انتقال ذرات رسوب

رسوبات مواد شکسته و ریز شده‌ای بوده و منشأ شکل‌گیری اغلب آن‌ها در طبیعت، توده‌های سنگی بزرگ هستند که در نتیجه خرد شدن و دیگر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی به‌صورت ذرات رسوب شکل می‌گیرند. دامنه اندازه‌ی این ذرات متغیر و شکل آن‌ها نیز از دانه‌های گردگوشه تا زاویه‌دار و تیزگوشه متغیر است. مؤثرترین علل حرکت ذرات رسوبی در طبیعت نیروهای ثقل، باد و یا آب هستند. از تحقیقات قدیمی تا حال حاضر، سه شیوه حرکتی رسوبات در آب شامل غلتش^۴، جهش^۵ و شناوری یا تعلیق^۶ پذیرفته شده است [۲]. رسوباتی که به‌صورت غلتش و جهش روی بستر رودخانه در حرکت هستند، بار بستر^۷ نامیده می‌شوند. همچنین به رسوباتی که درون آب و بالاتر از لایه بستر در

1 One-way coupling

2 Two-way coupling

3 Four-way coupling

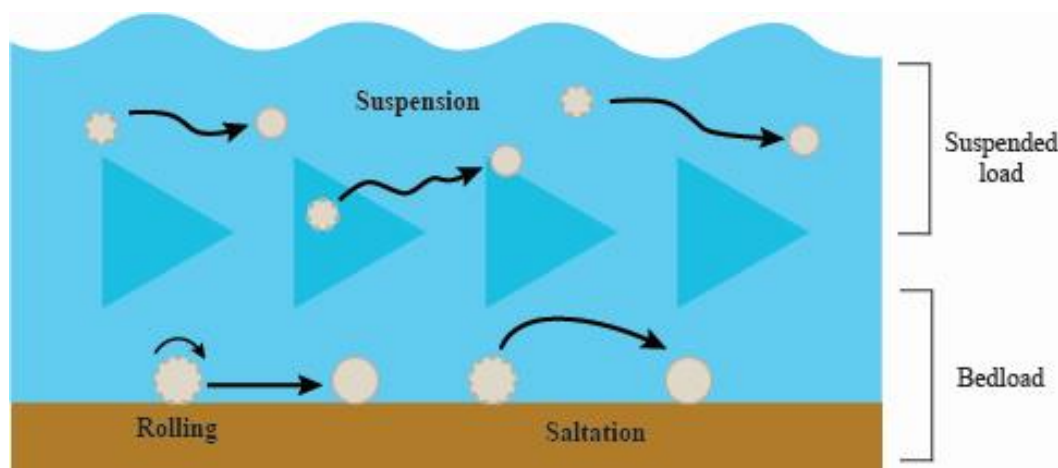
4 Rolling

5 Saltation

6 Suspension

7 Bed Load

حرکت بوده به‌طوری‌که به مدت قابل‌توجهی به‌صورت معلق در آب باشند، بار معلق^۱ اطلاق می‌گردد. این مودها در شکل ۲-۱ به‌صورت شماتیک نمایش داده شده و در ادامه هر کدام از آن‌ها تشریح می‌گردند.



شکل ۲-۱ مودهای انتقال ذرات رسوب [۱]

هنگامی که تنش‌های برشی در بستر نزدیک به آستانه حرکت برسد، رسوبات بالایی که در معرض جریان هستند، در اثر نیروی وارده توسط جریان شروع به غلتیدن به سمت پایین‌دست کرده تا جایی که به موقعیت پایدار جدید برسند. در صورتی که نیروی وارد بر ذرات رسوب برای بلند کردن آن‌ها کافی نباشد، این غلتش تا زمانی که رسوب موقعیت پایداری پیدا کند، ادامه می‌یابد.

وقتی دانه در حال شتاب گرفتن و بلند شدن از روی بستر است، امکان چرخش دانه وجود دارد. در اغلب موارد ذره آهسته‌تر از سیال منتقل می‌شوند زیرا به دلیل اختلاف چگالی ذره با سیال، نیروی وارد بر ذره برای رساندن آن به سرعت سیال کافی نیست. به دلیل نیروی گرانش، وقتی شتاب ذره کاهش یابد، با کاهش نیروی لیفت، برآیند نیروها به سمت پایین در ذرات به وجود می‌آید. در اکثر موارد ذره پس از طی مسافتی به دلیل کاهش سرعت و غلبه‌ی نیروی گرانش بر نیروهای لیفت، دوباره روی بستر می‌افتد. طول جهش طی شده توسط ذره رسوب، به پارامترهای مختلف سیال مانند سرعت، آشفتگی و خواص رسوب مانند چگالی و شکل آن بستگی دارد. طبق پژوهش‌های صورت گرفته اکثر انتقال رسوبات بستر به‌صورت جهش رخ می‌دهد [۳]. همچنین مشاهده گردیده است که جهش ذرات حتی در جریان لایه‌ای نیز به وقوع می‌پیوندد و این امر نشان‌دهنده‌ی آن است که

1 Suspension Load

پدیده‌ی جهش ذره، تنها ناشی از نیروهای آشفته‌گی نیست [۴]. لازم به ذکر است در بار بستر به سبب تماس پی در پی ذرات رسوب و بستر، انتقال ذرات رسوب صورت می‌گیرد.

وقتی مؤلفه‌های قائم سرعت آشفته‌گی تقریباً معادل سرعت سقوط ذره باشد، شکل مسیر حرکت ذره‌ی رسوب تغییر می‌کند. این مسئله باعث بلندتر شدن پرش‌ها شده و این پرش‌ها به قدری بلند می‌گردد که ذرات، به جز تعدادی اندک به ندرت به بستر نزدیک می‌شوند. در این حالت رژیم انتقال رسوب نسبت به بار بستر تغییر کرده و باید از روابط متفاوتی جهت پیش‌بینی رفتار آن استفاده نمود.

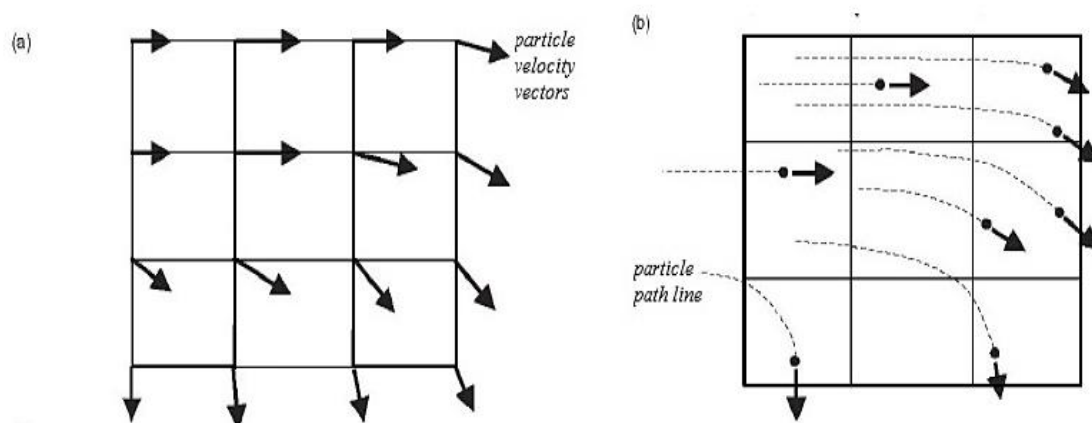
در حالی که برای هر ذره در یک شرایط جریان مشخص، تشخیص نحوه حرکت ساده است، اما وقتی نوبت به بررسی تمام ذرات موجود می‌رسد، از آنجایی که انتقال در دامنه گسترده‌ای، حاوی تمام روش‌های حرکت ذره، صورت می‌پذیرد، تشخیص نحوه انتقال آسان نیست [۵]. بنابراین نمودارها و روابطی برای تعیین میزان هر یک از انواع انتقال پیشنهاد شده است.

۱-۴- دیدگاه‌های لاگرانژی و اویلری در حل معادلات جریان

در مکانیک سیالات حرکت مایع و گاز با استفاده از رویکرد مکانیک پیوسته که در آن سیال توسط مشخصاتی که در تعداد بسیار زیادی از مولکول‌های مجزا جمع شده است، توصیف می‌شود. منظور از ذرات سیال در فرمول‌بندی ریاضی معادلات حاکم بر سیالات، ناحیه‌ای بسیار کوچک دیفرانسیلی در سیال بوده که در هیچ صورتی بزرگ‌تر از متوسط فاصله‌ی بین مولکول‌های سیال نمی‌باشد. هر یک از این ذرات سیال دارای خواص فیزیکی متفاوت خود همچون دما، چگالی، سرعت و مکان می‌باشد. بدین ترتیب دو رویکرد متفاوت اویلری و لاگرانژی در بررسی جریان سیال می‌توان در نظر گرفت. در رویکرد لاگرانژی موقعیت هر یک از ذرات سیال دنبال می‌شود. چنانچه ذره در زمان t_0 در موقعیت مشخص $\vec{r}_0 = \vec{r}_0(\vec{x}_0, t_0)$ و در زمان t_1 در موقعیت مشخص $\vec{r}_1 = \vec{r}_1(\vec{x}_1, t_1)$ قرار بگیرد، مسافت پیموده شده به صورت $\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + \Delta \vec{r}$ مشخص می‌شود. بنابراین می‌توان در تمامی زمان‌ها همه‌ی ذرات را با دنبال کردن حرکت آن‌ها به صورت $\vec{r} = \vec{r}(r_0, t_0)$ بیان کرد. با مشتق‌گیری از این رابطه می‌توان مقادیر سرعت و شتاب را به دست آورد.

در رویکرد اویلری یک موقعیت ثابت در میدان جریان در نظر گرفته شده و مشخصات ذراتی که در زمان‌های مختلف از این نقطه عبور می‌کنند، بر حسب زمان تعیین می‌گردد. به‌طور کلی در دیدگاه اویلری ناظر در یک موقعیت ثابت قرار گرفته و تغییرات زمانی و مکانی میدان جریان در تمامی نقاط

ثبت می‌شود. این در حالی است که در دیدگاه لاگرانژی ناظر با یک المان سیال یا حجم مادی همراه بوده و تغییرات اساسی آن را در حین حرکت ثبت می‌کند. در شکل ۳-۱ تعریف دو دیدگاه مزبور نشان داده شده است تا استنباط مناسب‌تری از این دو دیدگاه حاصل آید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در دیدگاه اویلری یک شبکه بر روی میدان جریان تعریف شده و در نقاط تقاطع خطوط، مشخصات ذرات عبوری به دست می‌آید. در صورتی که در دیدگاه لاگرانژی ذرات به صورت جداگانه دنبال شده و تغییرات میدان جریان با استفاده از دنبال کردن آن‌ها حاصل می‌گردد [۶]. با استفاده از روش‌های مختلفی می‌توان قوانین پیوستگی را در هر یک از سیستم‌ها استخراج کرده و با حل آن‌ها مشخصات موردنظر در میدان حل را به دست آورد.



شکل ۳-۱ مقایسه‌ی دو دیدگاه متفاوت نسبت به بررسی جریان (a) دیدگاه اویلری (b) دیدگاه لاگرانژی [6]

۵-۱- ضرورت انجام تحقیق

بیش از یک قرن است که انتقال رسوب در رودخانه‌ها با هدف تخمین نرخ انتقال و تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ته‌نشینی و انباشتگی غیرقابل پیش‌بینی در بستر رودخانه می‌تواند به سبب کاهش مقطع جریان، ایمنی در برابر سیلاب‌ها را کاهش داده و در مقابل، فرسایش می‌تواند به‌طور مثال منجر به بی‌ثباتی خاکریزها و پایه‌های پل گردد (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱ آبشستگی پایه پل که منجر به تخریب پل شده است (چمچال، کرمانشاه)

از این رو پیش‌بینی قابل اطمینانی از فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها مسئله حائز اهمیتی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و یا انجام کارهای تصحیحی در رودخانه می‌باشد که ضرورت انجام تحقیقاتی در زمینه فرسایش و انتقال رسوب را نشان می‌دهد. بالأخص اینکه در سال‌های اخیر جنبه‌های بوم‌شناسی در ترکیب با ابعاد تجدید حیات همچون عریض شدن مقطعی رودخانه‌ها به دلیل انتقال رسوب، چالش‌های جدیدی را برای مهندسان رودخانه به وجود آورده است.

تحقیقات موجود در زمینه مورفولوژی رودخانه عمدتاً پیشنهادی تجربی دارد. فرآیندهای مورد مطالعه در انتقال رسوب، همچون آستانه حرکت، فرآیند انتقال به خودی خود و نهشت رسوب معمولاً به روابطی تجربی تنزل پیدا کرده و به صورت یک فرمول انتقال با یکدیگر ترکیب می‌شوند. مخصوصاً مفهوم عمومی آستانه حرکت، که در آن حرکت رسوب به یک شرایط آستانه وابسته می‌باشد، باید مورد سؤال قرار گیرد. رویکردهای جایگزینی که بر پایه توزیع‌های احتمالاتی هستند به منظور شرح وضعیت رسوب قابل اطمینان‌تر به نظر می‌رسند، چرا که مفهوم کلی آن‌ها با حرکت پیوسته و طبیعی رسوبات مطابقت دارد. به علاوه، نیروهای وارده بر ذرات رسوب که انتقال آن‌ها را باعث می‌شود، معمولاً از مقادیر متوسط‌گیری شده‌ی جریان به دست می‌آیند. بنابراین با وجود اینکه این رویکردها در کارهای عملی و مهندسی مفید و دارای اهمیت بالایی می‌باشند ولیکن آن‌ها صرفاً انتقال رسوب را به صورت متوسط‌گیری شده در زمان و مکان تعیین و ارائه می‌کنند. این مسائل و موضوعاتی از این

دست، که ناشی از اتخاذ روش‌های تجربی و آزمایشگاهی می‌باشد، ضرورت پیش گرفتن روشی دیگر به غیر از روش تحلیلی، یعنی روش عددی را نمایان می‌سازد.

با وجود موفقیت‌های محدود، محققان زیادی در دهه‌های گذشته در فائق آمدن به کاستی‌های فیزیکی رویکردهای متداول، تلاش بسیاری از خود نشان داده‌اند. علیرغم صورت پذیرفتن تحقیق‌هایی که از آخرین تکنولوژی روز در اندازه‌گیری و فراهم آوردن یک نگاه عمیق در نیروهای وارده بر بستر رسوبی بهره جسته، به نظر نمی‌رسد یک رویکرد قابل قبول، که بدون نیاز به کالیبراسیون در کاربردهای عملی نیز مناسب باشد در آینده‌ی نزدیک حاصل آید. با این حال، این تحقیقات پیچیدگی فرآیندهای دخیل در انتقال رسوب را وضوح بخشیده و ضرورت بیش از پیش تحقیق و بررسی این موضوع به روش عددی را تا رسیدن به مقصود مطلوب، نشان می‌دهد.

۱-۶- نوآوری تحقیق

با توجه به اقبال عمومی محققان نسبت به روش‌های لاگرانژی در بسیاری از زمینه‌ها، از جمله در مدل‌سازی رسوب، تعداد مقالات و گزارش‌ها و تجربیات بسیار اندکی در زمینه‌ی روش لاگرانژی ردیابی ذرات^۱ (LPT) در مقایسه با دیگر روش‌های لاگرانژی و در مقایسه با تعداد مقالات موجود در ادبیات کلی انتقال رسوب موجود می‌باشد. از طرف دیگر پیچیدگی‌های حل مسائل انتقال بار بستر رسوب چه به لحاظ تجربی و چه به لحاظ عددی به دلیل اجزای مختلف دخیل در این مکانیسم همواره محل بحث و بررسی بوده است.

در بررسی مطالعات انجام شده در گذشته مشاهده گردیده عمده تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی انتقال رسوب و آستانه حرکت گروهی ذرات به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بوده است. کارهای عددی انجام شده در این حوزه نیز با فرضیات ساده شونده به مدل‌سازی این پدیده پرداخته‌اند. برخی از تحقیقات انجام شده جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی جریان را مدل نکرده و فقط پروفیل سرعت لگاریتمی را به ذرات رسوب اعمال نمودند که منجر به نادیده گرفته شدن اثر ذرات رسوب بر سیال می‌شود. در تحقیقات دیگر که در فصل دوم به آن پرداخته می‌شود به دلیل پیچیدگی در مدل‌سازی و هزینه‌ی محاسباتی زیاد، مدل‌های عددی به بررسی آستانه حرکت با یک یا چند ذره‌ی محدود

1 Lagrangian particle Tracking (LPT)

پرداخته شده که عملاً به دلیل در نظر نگرفتن اندرکنش ذرات رسوب روی یکدیگر، دارای خطای زیادی نسبت به واقعیت می‌باشند.

از این رو در پژوهش حاضر به مدل‌سازی انتقال ذرات رسوب به صورت کوپلینگ چهارجهته و با رویکرد اوپلری-لاگرانژی پرداخته شده است. جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی از مدل برخورد تصادفی^۱ بین ذرات استفاده شده که نسبت به مدل‌های برخورد مشابه سرعت اجرای بیشتری دارد. همچنین با مدل حاضر به شبیه‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب پرداخته شده که تاکنون مدل‌های عددی مشابه به آن نپرداخته‌اند.

از دیگر مزایای مدل حاضر این است که با تمامی کتابخانه‌های محیط نرم‌افزاری OpenFOAM سازگار بوده و از این رو قابلیت لحاظ شدن این مدل به‌عنوان حلگری استاندارد در ویرایش‌های بعدی این نرم‌افزار برای مدل‌سازی انتقال رسوب وجود دارد.

۱-۷- روش انجام تحقیق

هدف تحقیق حاضر مدل‌سازی پدیده‌ی انتقال رسوب بار بستر در رودخانه‌ها با رویکرد اوپلری-لاگرانژی می‌باشد. برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز یک پژوهش به روش‌ها و راه‌های مختلف عمل می‌شود. در این تحقیق ابتدا با استفاده از منابع کتابخانه‌ای و پایگاه‌های پیوسته آنلاین، اطلاعات مربوط به تحقیقات انجام شده در گذشته تکمیل و دسته‌بندی گردیده است. همچنین با مراجعه به دانشگاه‌های مختلف کشور پایان‌نامه‌های مرتبط در دسترس مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و با استفاده از پایگاه‌های آنلاین مختلف از پایان‌نامه‌های در دسترس دیگر کشورها کمک گرفته شد.

برای نیل به هدف تحقیق از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM استفاده گردید که باید با اعمال اصلاحات و تغییراتی در برنامه، به هدف موردنظر دست یافت. این نرم‌افزار یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل‌سازی هر نوع مسئله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده می‌باشد. هسته‌ی انعطاف‌پذیر و کارآمد OpenFOAM از مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده به زبان C++ ایجاد شده است. این نرم‌افزار دارای

1 Stochastic Collision Model

حلگروهایی است که قابل توسعه و ویرایش می‌باشند. روش مورد استفاده در این برنامه برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل، روش عددی حجم محدود^۱ می‌باشد.

برای این منظور ابتدا منابع اطلاعاتی و مطالب مرتبط با موضوع جمع‌آوری و تکمیل شده و سپس با مطالعه کتابخانه‌های مختلف نرم‌افزار متن‌باز، بهترین حلگر انتخاب شده است. حلگر مذکور باید بتواند فاز سیال را با رویکرد اوپلری و فاز رسوب را با رویکرد لاگرانژی به خوبی مدل‌سازی کند.

برای ساخت هندسه‌ی مدل و مش‌بندی از نرم‌افزار GAMBIT استفاده شده و جهت مشاهده نتایج به‌صورت گرافیکی از نرم‌افزار Paraview و TecPlot بهره برده شده است. در ضمن نرم‌افزار OpenFOAM کلیه‌ی نتایج مربوط به سرعت و فشار و دیگر پارامترها را به‌صورت فایل‌های مجزا در زمان‌های مختلف و دلخواه ذخیره می‌کند که می‌توان برای تحلیل بیشتر به راحتی از آن‌ها استفاده نمود.

پس از تهیه مدل با پارامترهای هدف گفته شده، توانایی کد حاضر در شبیه‌سازی غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب به صورت انفرادی و شبیه‌سازی گروهی ذرات رسوب صحت‌سنجی می‌شوند. برای این منظور از نتایج تحقیقات انجام شده در گذشته استفاده می‌شود. سپس اطلاعات به دست آمده از مدل با استفاده از روش‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و این اطلاعات در قالب روابط و یا نمودارهای مقایسه‌ای استخراج می‌شوند.

۸-۱- ساختار رساله

علاوه بر فصل اول که شامل مقدمه، بیان مسئله، تعاریف مربوط به بحث انتقال رسوب و مرتبط با تحقیق حاضر، ضرورت، نوآوری و روش انجام تحقیق بوده است، در فصول بعدی موارد زیر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد:

❖ فصل دوم: در این فصل مطالب مربوط به مطالعات صورت گرفته در گذشته که با پژوهش حاضر مرتبط هستند، گنجانده می‌شود. مطالعات انجام شده در گذشته بسته به موضوع در بخش‌های مختلفی دسته‌بندی شده و نتایج محققین مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

1 finite-volume method

- ❖ فصل سوم: در فصل سوم ابتدا مختصری در مورد معادلات حاکم بر جریان سیال گفته شده و سپس معادلات مربوط به جریان‌های آشفته، تئوری لایه مرزی، روش لاگرانژی ردیابی ذرات، نیروهای وارد بر ذرات رسوب، مدل‌های برخورد ذرات رسوب و مبحث آستانه حرکت تشریح می‌گردد. در این فصل بیشتر قابلیت‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرد که مدل حاضر توانایی شبیه‌سازی آن‌ها را داراست.
- ❖ فصل چهارم: در این فصل ابتدا به معرفی نرم‌افزار و حلگر مورد استفاده پرداخته شده و در ادامه مدل برخورد به کار رفته و صحت‌سنجی مدل برخورد مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس سرعت جریان و نیروهای وارد بر ذره‌ی رسوب صحت‌سنجی شده و غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب مورد بررسی و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی محققین دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت به مدل‌سازی و تحلیل آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب و پارامترهای تأثیرگذار بر روی شیلدز بحرانی پرداخته می‌شود.
- ❖ فصل پنجم: در فصل آخر نیز جمع‌بندی مطالب فصول قبل، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد.

فصل دوم:

مروری بر مطالعات انجام شده

۲-۱- مقدمه

مطالعاتی که در زمینه‌ی شبیه‌سازی جریان‌های ذره‌ای با استفاده از جریان‌های دوفازی، نیروهای وارد بر ذرات سیال، انتقال رسوب به‌صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی آن با استفاده از دیدگاه ردیابی ذرات و جریان‌های دوفازی انجام شده، منابع ارزشمندی است که می‌توان برای پیشبرد مطالعه حاضر از آن‌ها بهره برد. اما به دلیل حجم بالای مطالعات انجام شده پیرامون هیدرولیک رسوب از قرن‌های گذشته تاکنون و محدودیت در ارائه مطالب، بخشی از پژوهش‌های صورت گرفته و مرتبط با تحقیق حاضر ارائه می‌شود.

مطالب مربوط به سابقه مطالعات صورت گرفته در بخش‌های آستانه حرکت ذرات، پارامترهای مؤثر بر شیلدر بحرانی، مدل‌های حرکت رسوب، مطالعات عددی صورت گرفته و مدل‌های برخورد ذرات رسوب دسته‌بندی شده که در ادامه تشریح می‌گردد.

۲-۲- آستانه حرکت ذرات رسوب

ته‌نشینی رسوب در کانال‌ها موجب پدید آمدن عوامل نامطلوب زیادی از جمله، تغییر شکل سطح مقطع کانال، تغییر زبری، تغییر توزیع سرعت و تنش برشی و در نتیجه کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال خواهد بود. آستانه حرکت ذره‌های رسوبی یکی از معیارهای طراحی کانال‌ها با جداره صلب می‌باشد. شرایط آستانه حرکت ذرات رسوب زمانی اتفاق می‌افتد که این نیروها به حد بحرانی خود رسیده و جریان به‌اندازه کافی برای حرکت ذره رسوبی نیروهای محرک ایجاد کند. در پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون تعریف واحدی از آستانه حرکت وجود نداشته و تفاوت قابل‌توجهی در تعریف آستانه حرکت بین مطالعات مختلف وجود دارد و این بدان معناست که در نمونه‌های عملی جریان آشفته، هیچ معیار واحدی برای آغاز حرکت رسوب وجود ندارد.

بررسی مطالعات آزمایشگاهی آستانه حرکت ذره‌های رسوبی نشان می‌دهد که تعریف‌های ارائه شده توسط Kramer رایج‌ترین روش برای تعیین این شرایط می‌باشد [۷]. وی چهار وضعیت حرکت رسوب

در بستر کانال برای تعیین آستانه حرکت ذره‌های رسوبی مشخص کرد که شامل بدون انتقال^۱، انتقال ضعیف^۲، انتقال متوسط^۳ و انتقال کلی^۴ می‌باشد. طبق تعریف وی در شرایط بدون انتقال هیچ ذره‌ی رسوبی حرکت نکرده و در انتقال ضعیف تعداد بسیار کمی از ذره‌ها با کوچک‌ترین اندازه، حرکت می‌کنند. در شرایط انتقال متوسط تعداد نسبتاً زیادی از ذره‌ها با اندازه متوسط حرکت کرده و در انتقال کلی تمامی ذرات در هر زمان، هر مکان و هر اندازه‌ای حرکت می‌کنند.

در بحث کمی اغلب معیارهای آستانه حرکتی با استفاده از دو روش تنش برشی و سرعت بحرانی استخراج شده‌اند. روش تنش برشی که بر مبنای آزمایش‌های Shields [۸] استوار بوده از گذشته تا به امروز مورد استفاده محققین قرار گرفته است. وی معتقد بود که بیان تحلیلی نیروهای وارد بر یک ذره رسوب بسیار دشوار است، به همین دلیل با استفاده از تحلیل ابعادی پارامترهای بدون بعد، نموداری را مطابق شکل ۱-۲ به عنوان معیاری برای آستانه حرکت ارائه نمود. در دیاگرام Shields محور افقی و عمودی به ترتیب عدد رینولدز ذره (Re^*) و پارامتر شیلدز بحرانی (θ_c) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re^* = \frac{u_* D}{\nu} \quad 1-2$$

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD} \quad 2-2$$

در این روابط u_* سرعت برشی، D قطر ذره‌ی رسوب، ν ویسکوزیته سینماتیک سیال، τ_c تنش برشی بستر، ρ_s چگالی ذرات رسوب، ρ چگالی سیال و g شتاب ثقل می‌باشد.

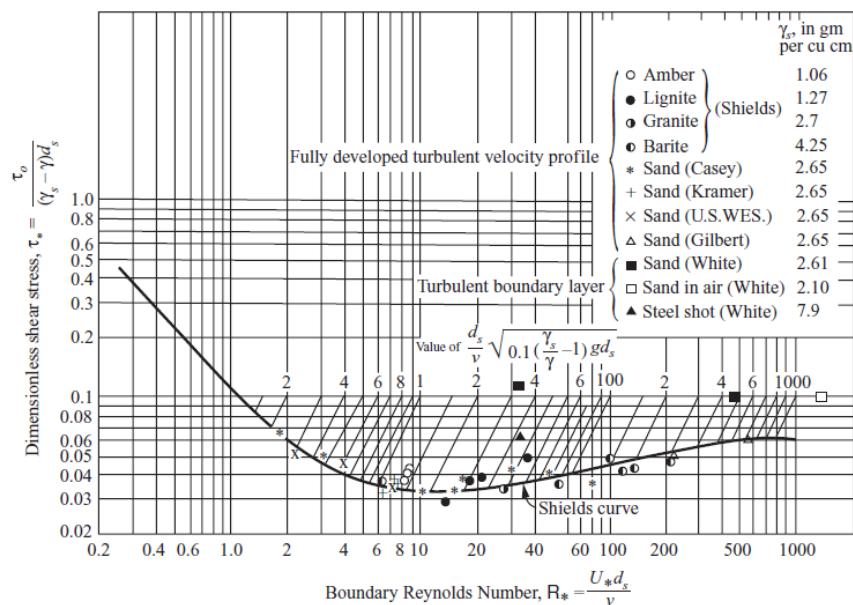
در صورت قرار گرفتن تنش برشی ذرات رسوب در بالای منحنی، ذره حرکت خواهد کرد اما در نقاط پایین منحنی، جریان قادر به حمل ذره نمی‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که Shields منحنی واحدی را بر داده‌ها منطبق نداشت، بلکه نواری به عرض قابل توجه را به نمایش گذاشت. Shields در آزمایش‌های خود مقادیر مختلف پارامتر شیلدز را دست‌کم تا دو برابر مقدار بحرانی اندازه‌گیری کرده و سپس به نقطه مربوطه به دبی صفر رسوب برونمایی نمود. این روش غیرمستقیم جهت پرهیز از مشکل مربوط به تعیین دقیق شرایطی که در آن ذره رسوب باید حرکت کند، مورد استفاده واقع شد.

1 No transport

2 Weak transport

3 Medium transport

4 General transport



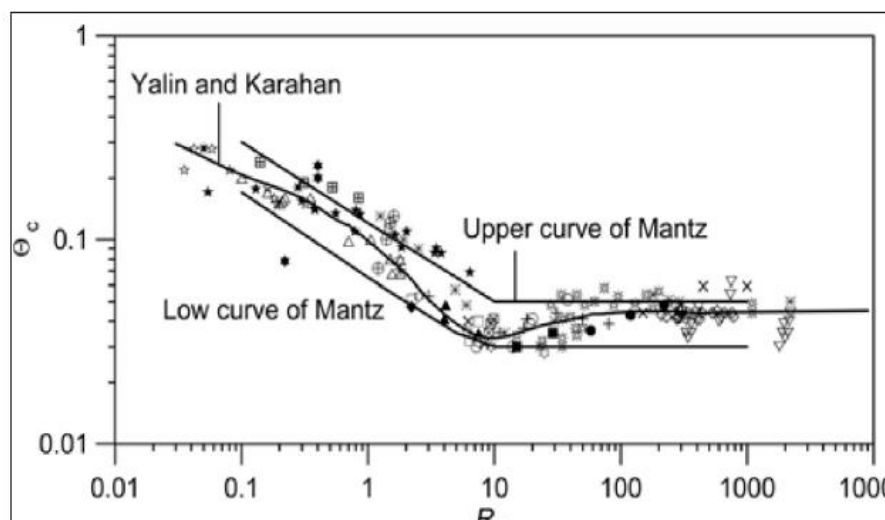
شکل ۱-۲ دیاگرام Shields جهت تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب [۹]

علی‌رغم استفاده فراوان محققین از دیاگرام Shields انتقاداتی نیز به آن مطرح است. اصلی‌ترین مشکل در نمودار آن است که تنش برشی و سرعت برشی به‌صورت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که این دو متغیر مستقل نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند. بعدها محققین دیگری بر مبنای تنش برشی پژوهش‌هایی را انجام داده و اصلاحاتی در دیاگرام Shields اعمال نمودند که خلاصه‌ای از این اصلاحات در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

با توجه به دیاگرام Shields جریان را می‌توان به سه ناحیه دسته‌بندی کرد. منطقه‌ی جریان با بستر صاف ($Re^* < 5$) که پارامتر شیلدز تابعی از عدد رینولدز ذره بوده و در این شرایط لزجت مایع بر حرکت ذرات تأثیر دارد. منطقه‌ی بینابین ($5 < Re^* < 400$) و منطقه‌ی با جریان با بستر زبر ($Re^* > 400$) که در آن نیروی لزجت تأثیری روی حرکت ذره نداشته و شیلدز بحرانی مقدار ثابتی است [۱۰].

جدول ۱-۲ اصلاحات وارد شده به دیاگرام شیلدز در طی زمان [۱۱]

نام محقق	رابطه‌ی ارائه شده برای تصحیح دیاگرام	توضیحات
Rouse	$Re^* = \frac{D\sqrt{0.1(s-1)gD}}{v}$	برای عدم وابستگی محور افقی به سرعت برشی تعریف جدیدی برای عدد رینولدز ذره بیان گردید.
White	$\theta_c = \frac{\pi}{6} P_f T_f \tan\varphi \quad Re^* > 3.5$ $\theta_c = \frac{\pi}{6} P_f a_f \tan\varphi \quad Re^* < 3.5$	$T_f = 4, P_f = 0.4$ $P_f a_f = 0.34$
Iwagaki	$\theta_c = \frac{\tan\varphi}{\varepsilon_x \psi_s Re^*}$	این رابطه برای آستانه حرکت یک ذره‌ی منفرد ارائه شده است.
Egiazaroff	$\theta_c = \frac{1.33}{C_D [a_r + 5.75 \log(0.63)]}$	نتایج این تحقیقات با دیاگرام شیلدز همخوانی ندارد.
Mantz	پیشنهاد کرد که برای اطمینان از حصول پایداری ذرات نمودار شیلدز به صورت یک پوش در نظر گرفته شود.	(شکل ۲-۲)
Yalin and Karahan	با جمع‌آوری داده‌های بسیار زیاد از محققین مختلف، رابطه بین θ_c و Re^* را به صورت گرافیکی ارائه دادند	نمودار ارائه شده توسط این محققین کمی بالاتر از نمودار شیلدز قرار می‌گیرد (شکل ۲-۲).
Van Rijn	$\theta_c (4 < D_* \leq 10) = 0.14/D_*^{0.64}$ $\theta_c (10 < D_* \leq 20) = 0.04/D_*^{0.1}$ $\theta_c (20 < D_* \leq 150) = 0.013D_*^{0.29}$ $\theta_c (D_* \geq 150) = 0.055$	$D_* = D(\Delta g v^2)^{\frac{1}{3}}$
Smith and Wiberg	$\theta_c = \frac{2}{C_D \alpha_0} \cdot \frac{1}{f(\frac{Z}{Z_0})} \cdot \frac{\tan\varphi}{1 + \left(\frac{F_L}{F_D}\right) \cdot \tan\varphi}$	
Soulsby and Whitehouse	$\theta_c = \frac{0.24}{D_*} + 0.055[1 - e^{-0.02D_*}]$	$D_* = D(\Delta g v^2)^{\frac{1}{3}}$
Julien	$\theta_c (D_* \leq 0.3) = 0.5 \tan\varphi$ $\theta_c (0.3 < D_* \leq 19) = 0.25 \tan\varphi$ $\theta_c (19 < D_* \leq 150) = 0.013 D_*^{0.4} \tan\varphi$ $\theta_c (D_* \geq 150) = 0.06 \tan\varphi$	$D_* = D(\Delta g v^2)^{\frac{1}{3}}$



شکل ۲-۲ اصلاحات انجام شده توسط Mantz و Yalin and karahan [11]

اما تعدادی از محققین علم هیدرولیک رسوب، به جای استفاده از تنش برشی سرعت جریان را به عنوان مهم ترین فاکتور در روابط پدیده آستانه حرکت مورد استفاده قرار داده اند. روابطی که پیشنهاد گردیده، عمدتاً بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی و روابط تجربی بوده است. Novak and Nalluri [۱۲] با استفاده از آنالیز تحلیلی روی نیروهای وارد بر یک ذره رسوب در کانال با مقاطع دایره ای و مستطیلی نشان دادند عمده روابط ارائه شده برای توصیف آستانه حرکت ذرات با روش سرعت بحرانی به صورت رابطه ی زیر نشان داده می شود:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = a \left(\frac{R}{D} \right)^b \quad ۳-۲$$

که در آن V_c سرعت آستانه حرکت، R شعاع هیدرولیکی، G_s نسبت جرم مخصوص رسوب به سیال، a و b ضرایبی هستند که به صورت تجربی به دست می آیند. Shafai Bejestan [10] نیز رابطه ی مشابهی ارائه نمود که در آن به جای پارامتر شعاع هیدرولیکی از عمق جریان (H) استفاده شده است. عبارت سمت چپ رابطه ی ۳-۲ عدد فرود بحرانی ذره رسوب (Fr_c) و $\frac{R}{D}$ (یا $\frac{H}{D}$) پارامتر اندازه نسبی ذره نامیده می شود. جدول ۲-۲ ضرایب a و b به دست آمده توسط برخی از پژوهشگران را نشان می دهد.

جدول ۲-۲ ضرایب a و b در رابطه‌ی ۲-۳ به دست آمده توسط محققین مختلف

نام محقق	a	b	توضیحات
Straub	۱.۴۹	۰.۱۶۷	کانال مستطیلی عریض
Neil	۱.۵۸	۰.۱	بستر ماسه‌ای با قطر یکنواخت
Bogardi	۱.۷	۰.۰۹۵	کانال مستطیلی
Novak and Nalluri	۰.۵	۰.۴	کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای
Shafai Bejestan	۲.۲	۰	D/H<0.1
	۱.۲۳۷	۰.۲۵	D/H>0.1
El-Zaemey	۰.۷۵	۰.۳۴	کانال دایره‌ای
Nalluri and Ghani	۰.۲۸۷	۰.۴	مجاری بسته مستطیلی
Ab Ghani et al.	۱.۰۷	۰.۲۳	کانال مستطیلی
Mei	۰.۱۲۵	۰.۴۷	مجاری بسته دایره‌ای
Safari et al.	۰.۴۸	۰.۴۷	کانال مستطیلی

علاوه بر روابط فوق، محققین دیگری با استفاده از روش سرعت بحرانی پژوهش‌هایی انجام داده و روابطی متفاوت از رابطه‌ی ۲-۳ ارائه نمودند. رابطه‌ی زیر با آنالیز ۲۵۰۰ داده‌ی آزمایشگاهی در شرایط آب کم‌عمق برای پیش‌بینی سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب توسط Rottner ارائه گردیده است [۱۳]:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = \frac{5.53}{4.75 + \left(\frac{H}{D}\right)^{0.67}} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.5} \quad ۴-۲$$

Ackers and White برای بستر رسوبی با ذرات بزرگ‌تر از ۲.۴ میلی‌متر و استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی و میدانی موجود، رابطه‌ی زیر را پیشنهاد نمودند [۱۴]:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = 0.96 \log\left(\frac{H}{D}\right) + 1.04 \quad ۵-۲$$

Garde and Ranga Raju با انجام آزمایش بر آستانه حرکت ذرات رسوب روی سطوح زبر رابطه‌ی زیر ارائه کردند [۱۵]:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = 0.5 \log\left(\frac{R}{D}\right) + 1.63 \quad ۶-۲$$

Bong et al. با بررسی آزمایشگاهی اثر ضخامت لایه‌ی رسوب (t_s) بر روی سرعت آستانه حرکت ذرات در کانال مستطیلی به عرض ۰.۶ متر ثابت کردند اثر ضخامت لایه‌ی رسوب بر روی عدد فرود بحرانی

ذره‌ی رسوب با افزایش عمق جریان کاهش می‌یابد [۱۶]. ایشان همچنین یک رابطه به صورت زیر برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی بر اساس ضخامت لایه‌ی رسوب توصیه کردند:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = 0.85 \left(\frac{R}{D}\right)^{0.18} \left(\frac{t_s}{D}\right)^{0.21} \quad ۷-۲$$

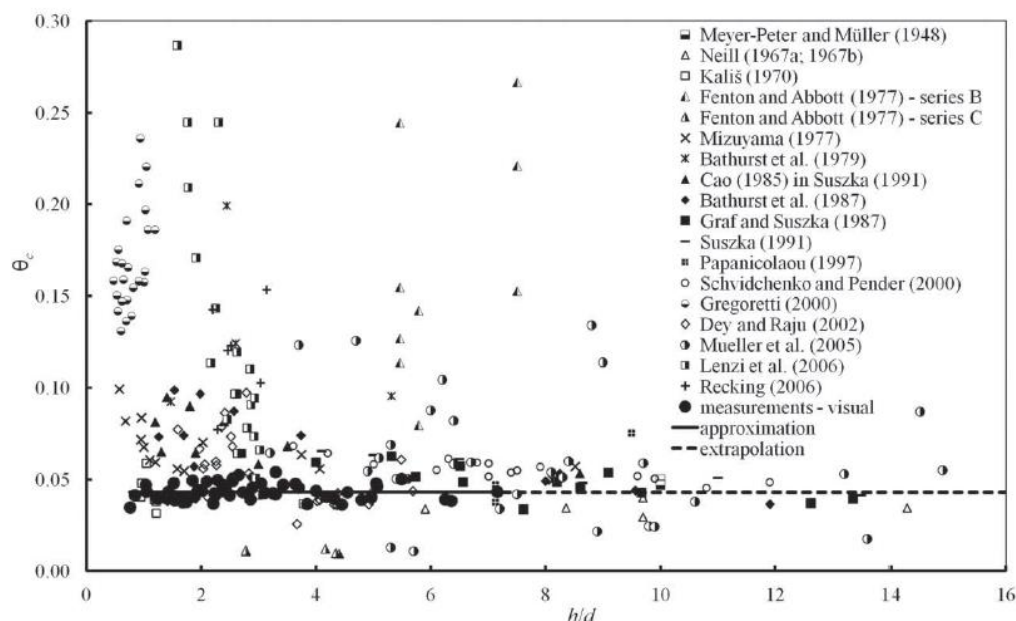
۲-۳- پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی

علاوه بر عدد رینولدز ذره که تأثیر آن بر شیلدز بحرانی در بخش‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت، از جمله عوامل تأثیرگذار روی شیلدز بحرانی می‌توان به استغراق نسبی، شیب طولی بستر و زاویه ایستایی ذرات رسوب اشاره کرد. عمده تحقیقات انجام شده در گذشته در مورد پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی به صورت آزمایشگاهی بوده که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌گردد.

بررسی اثر استغراق نسبی بر روی شیلدز بحرانی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته اما نتایج آن‌ها تضاد زیادی با یکدیگر دارد. Shields بیان نمود که اثر استغراق نسبی بر روی شیلدز بحرانی برای $R/d < 25$ نشان داده می‌شود که در آن R شعاع هیدرولیکی می‌باشد، اما نتایج به دست آمده از آزمایش‌های Meyer Peter and Muller این رابطه را تأیید نمی‌کند [۱۷]. Yalin اثر استغراق نسبی را در نظر نگرفت زیرا وی فرض کرد ساختار جریان نزدیک بستر با H/D تغییر نمی‌کند. Suszka and Graf به یک رابطه برای اثر استغراق نسبی اشاره نکرده اما داده‌های آزمایشگاهی ایشان وجود یک رابطه را تأیید می‌کند [۱۸]. شکل ۲-۳ نتایج اثر استغراق نسبی را بر روی شیلدز بحرانی توسط محققین مختلف نشان می‌دهد که بیانگر یک رابطه‌ی مشخص بین این دو پارامتر نمی‌باشد.

با بررسی نیروهای وارد بر ذره‌ی رسوب در کف آبراهه، این مطلب به روشنی درک می‌شود که با افزایش شیب بستر، مؤلفه نیروی وزن در راستای حرکت ذره بیشتر شده و بنابراین ذره رسوب با سهولت بیشتری شروع به حرکت کرده و به عبارتی تنش برشی بحرانی کاهش می‌یابد. Van Rijn رابطه‌ی زیر را برای تعیین آستانه حرکت ذرات در مجاری شیب‌دار ارائه کرد [۱۹]. در این رابطه τ_{ca} تنش برشی بحرانی بر روی بستر شیب‌دار و k_1 و k_2 ضرایب تصحیح هستند.

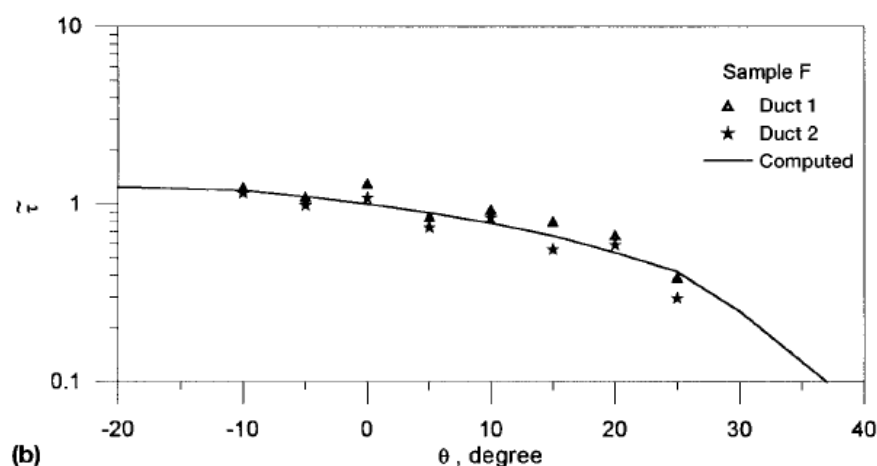
$$\tau_{ca} = k_1 k_2 \tau_c \quad ۸-۲$$



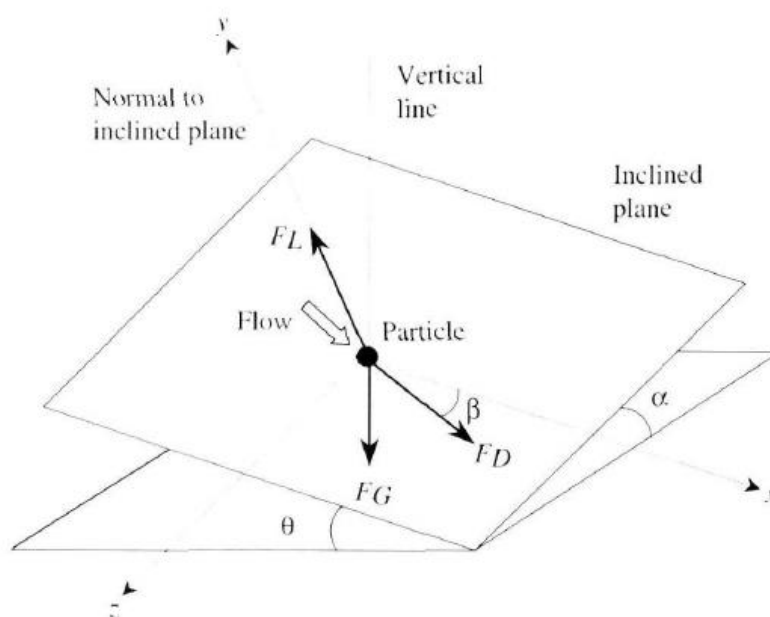
شکل ۲-۳ تأثیر استغراق نسبی روی شیلدز بحرانی [۲۰]

Chiew and Parker با انجام آزمایش در کانال دایره‌ای بسته به بررسی تأثیر شیب مثبت و منفی بستر بر روی تنش برشی بحرانی پرداختند [۲۱]. در نهایت این محققین تغییرات نسبت شیب طولی بستر به زاویه ایستایی ذرات را در برابر تنش برشی بستر شیب‌دار به افقی، با حل تحلیلی مقایسه کردند. بازه‌ی تغییر زاویه شیب بستر در پژوهش آن‌ها بین ۱۰- و ۳۰ درجه بوده و تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و حل تحلیلی مشاهده گردید.

Dey and Debnath به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوبی در مجاری شیب‌دار با شیب مثبت و منفی پرداختند [۲۲]. این محققین ۹ دسته ذرات رسوب با دانه‌بندی متفاوت در دو مجرای آزمایشگاهی در نظر گرفته که محدوده‌ی زاویه ایستایی این ذرات بین ۳۲ تا ۴۰ درجه بوده است. آن‌ها با بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی و استفاده از رسوبات با زاویه ایستایی مختلف به این نتیجه رسیدند که هرچه مقدار جبری شیب بیشتر باشد، تنش برشی بحرانی نیز کمتر می‌شود. همچنین این محققین در نمودارهای جداگانه اثر تغییرات شیب بستر را روی پارامتر شیلدز بحرانی بستر شیب‌دار مورد بررسی قرار دادند (شکل ۲-۴). در پژوهش آزمایشگاهی دیگری که توسط Dey صورت گرفت، مطابق شکل ۲-۵ وضعیت آستانه حرکت برای یک ذره واقع بر بستر شیب‌دار طولی و عرضی مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]. مشابه تحقیق قبلی ذکر شده، تغییرات نسبت تنش برشی بستر شیب‌دار طولی و عرضی به بستر صاف در برابر تغییرات شیب بستر برای ذرات رسوب با قطرهای مختلف بررسی گردید.



شکل ۴-۲ تغییرات تنش برشی بستر شیب‌دار به افقی در برابر تغییرات شیب بستر برای ذرات با زاویه ایستایی ۴۰ درجه [22]



شکل ۵-۲ بررسی تنش برشی ذره‌ی رسوب تحت شیب طولی و عرضی بستر در آزمایش‌های Dey [23]

با این وجود Lamb و همکاران با تجزیه و تحلیل داده‌های بسیار زیادی که در شرایط آزمایشگاهی و میدانی جمع‌آوری شده‌اند، نموداری را ارائه کردند که بر طبق آن با افزایش شیب بستر، تنش برشی بحرانی آستانه حرکت ذرات رسوبی افزایش می‌یابد [۲۴]. به عبارت دیگر به ازای یک تنش برشی مشخص، ذرات با اندازه یکسان بر روی شیب‌های تند، پایداری بیشتری در برابر حرکت از خود نشان می‌دهند. این یافته‌ها در تضاد با یافته‌های سایر محققین از جمله Day and Debnath است. Lamb و همکاران درصدد برآمدند تا افزایش تنش برشی بحرانی در اثر افزایش شیب بستر را به عواملی همچون

شکل‌های بستر، زاویه اصطکاک داخلی، میزان بیرون‌زدگی ذره از بستر، ورود هوا به درون جریان، تغییر نیروی درگ و تغییر در سرعت‌های موضعی و نوسانات آشفتگی ارتباط دهند.

در نقد دلایل Lamb و همکاران می‌توان بیان نمود که در داده‌های میدانی، معمولاً فرم‌های بستر و طیف وسیعی از ذرات با زاویه اصطکاک متفاوت حضور دارند، درحالی‌که در شرایط آزمایشگاهی معمولاً اثر فرم‌های بستر در نظر گرفته نمی‌شود و ذرات مورد استفاده عمدتاً یکنواخت هستند. بنابراین عوامل اول و دوم یعنی فرم‌های بستر و زاویه اصطکاک داخلی برای توجیه رابطه بین شیب بستر و تنش برشی بحرانی نمی‌تواند چندان اهمیتی داشته باشد. از طرفی دیگر، ورود هوا به جریان معمولاً در شیب‌های زیاد اتفاق می‌افتد و مانند میزان بیرون‌زدگی ذره از بستر، نمی‌تواند توجیه‌گر پدیده موردنظر در شیب‌های کم باشد. همچنین ضرایب رانش و برگشده با افزایش شیب افزایش می‌یابند و در تضاد با روند مورد بررسی هستند. بنابراین از میان دلایل احتمالی برای افزایش تنش برشی بحرانی در اثر افزایش شیب، فقط کاهش سرعت‌های موضعی و نوسانات آشفتگی باقی می‌ماند. بررسی‌های آزمایشگاهی نیز نشان داده است که به ازای یک تنش برشی ثابت، سرعت موضعی و نوسانات آشفتگی در نزدیکی بستر هر دو با افزایش شیب، کاهش می‌یابند. به نظر می‌رسد این تغییرات در سرعت موضعی و نوسانات آشفتگی در نزدیکی بستر، به دلیل تغییر در اختلاط عمقی و ساختار گردابه‌ها در اثر افزایش زبری نسبی باشد [11].

اثر خصوصیات هندسی ذرات رسوب مانند بافت سطح، گرد گوشه بودن، شکل و اندازه ذرات بر روی عدد رینولدز ذره و زاویه ایستایی ذرات رسوب تأثیر می‌گذارد. به دلیل پیچیدگی کار با این پارامترها محققین تمایل دارند از زاویه ایستایی برای اعمال تأثیر خصوصیات هندسی ذرات استفاده کنند. اثر زاویه ایستایی بر پارامتر شیلدز بحرانی توسط محققین مختلفی از جمله Wiberg and Smith [۲۵] و Zanke [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است. Dey و همکاران با انجام آزمایش‌های گسترده روی آستانه حرکت ذرات رسوب برای زوایای سکون در محدوده ۲۵ تا ۴۵ درجه دیاگرام شیلدز را استخراج کردند. [۲۷] Rousar و همکاران نیز با انجام آزمایش‌های مختلف برای ذرات در ناحیه بستر زیر رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی پارامتر شیلدز بحرانی برای مقادیر مختلف زاویه ایستایی پیشنهاد دادند:

$$\theta_c = \frac{\tan \varphi}{6.5 + 14 \tan \varphi} \quad ۹-۲$$

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد داده‌های آزمایشگاهی دارای پراکندگی بوده و یک رابطه‌ی مشخصی را بین زاویه ایستایی ذرات رسوب و شیلدز بحرانی نشان نمی‌دهد.

۲-۴- مدل‌های حرکت رسوب

بسیاری از محققان به جای بررسی صرف لحظه شروع حرکت ذرات، به بررسی نحوه و میزان جهش ذرات پس از شروع حرکت پرداخته‌اند. این مطالعات خود طیف گسترده‌ای از رویکردها را شامل شده که در ادامه سعی می‌شود به برخی از آن‌ها اشاره گردد.

Francis مطالعه وسیعی روی حرکت ذرات در راستای بستر انجام داد [۲۸]. در این پژوهش مطالعه حرکت ذرات تنها، به صورت آزمایشگاهی روی بستری به اندازه همان ذرات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته که نتایج سه حالت حرکتی چرخش، جهش و معلق شدن را نشان داد. در حالت جهش ذرات مسیر هموار و کوتاهی را دنبال کرده در حالی که در حالت تعلیق ذرات مسیرهای بلندتر و طولانی‌تری را به صورت موجی که نشان دهنده تأثیر آشفتگی است، تجربه می‌کنند. در این آزمایش‌ها محدوده‌ی وسیعی از تنش برشی، شکل، اندازه ذره و عمق جریان بررسی شده و تأثیر آن‌ها بر روی حرکت ذرات مورد مطالعه قرار گرفت. مسیر حرکت ذرات مؤید این مطلب بوده که تغییر حالت حرکتی ذره از جهش به سوی تعلیق زمانی اتفاق می‌افتد که مؤلفه‌های عمودی سرعت آشفتگی تقریباً معادل با سرعت سقوط ذرات باشد. همچنین در این مطالعه یک مدل تحلیلی تهیه شده که شرایط حرکت ذرات را تا قبل از توقف بررسی و بیان می‌کند.

Van Rijn روشی برای محاسبه انتقال بار بستر و تعیین ارتفاع جهش، سرعت ذره و غلظت بار بستر ارائه نمود [19]. ایشان در تحقیق خود با استفاده از معادلات حرکت بر روی یک ذره و حل آن‌ها، طول و ارتفاع جهش یک ذره را برای شرایط مختلف هیدرولیکی در یک جهش تعیین کرد. همچنین ایشان با استفاده از نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی‌ها رابطه‌ای برای محاسبه مشخصات جهش ذره ارائه نمود. نیروهای مؤثر بر حرکت ذره در تحقیق وی نیروی درگ، لیفت و وزن مستغرق ذره می‌باشند. نتایج پژوهش‌های Van Rijn نشان می‌دهد که در جهش یک ذره‌ی کوچک، نیروی درگ و در ذرات بزرگ‌تر نیروی لیفت غالب می‌باشد. همچنین در نزدیکی بستر نیروی لیفت در مقایسه با وزن مستغرق ذره برای هر دو ذره‌ی بزرگ و کوچک نسبتاً قابل توجه است.

Lee and Hsu با مطالعه حرکت ذرات، جهش یک ذره را در یک گام شبیه‌سازی کرده‌اند [۲۹]. در تحقیق ایشان حرکت و سرعت ذرات در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و پارامترهای مختلفی از قبیل عمق جریان، شیب کانال و اندازه ذرات مورد آزمایش قرار گرفته تا تأثیر این پارامترها بر روی حرکت ذره مشخص گردد. همچنین یک مدل عددی برای شبیه‌سازی یک گام جهش ذره توسعه داده شده که با استفاده از آن تغییرات طولی سرعت، شتاب و نیروهای وارد بر ذره مانند درگ و لیفت محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که مشخصات جهش مانند طول و ارتفاع جهش با افزایش تنش برشی افزایش یافته و ارتفاع و طول جهش با در نظر گرفتن نیروی مگنوس تا ۱۲ درصد افزایش می‌یابد و این محققین نتیجه گرفتند که نمی‌توان از این نیرو صرف‌نظر کرد.

مهدی‌زاده و صالحی نیشابوری مطالعات گسترده‌ای روی نحوه‌ی جهش ذره و پارامترهای مؤثر بر آن انجام دادند [3]. ایشان برای بررسی خصوصیات جهش ذره‌ی رسوبی در یک جریان آشفته با مشخص بودن مقدار تنش برشی بستر، از سیستم تصویربرداری با سرعت بالا استفاده کرده و مشخصه‌های جهش شامل طول، ارتفاع، سرعت، چرخش و زوایای برخورد به بستر و بلند شدگی برای شرایط هیدرولیکی مختلف را با سرعت ۲۵۰ فریم بر ثانیه اندازه‌گیری کرده و درباره ارتباط آن‌ها با خصوصیات جریان به طور کیفی بحث کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش آشفتگی بر طول، ارتفاع و سرعت ذره افزوده شده و برعکس از زوایای برخورد به بستر و بلند شدگی مجدد آن کاسته می‌شود. همچنین ایشان چرخش ذره را در طول یک گام جهش، دارای روند نزولی دانستند. نتایج آزمایش‌های ایشان حاکی از این امر است که با افزایش قطر متوسط ذرات بستر، تمامی خصوصیات جهش تمایل به افزایش دارند.

۲-۵- مطالعات عددی انجام شده

Shams و همکاران مطالعه‌ای بر روی مدل‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌های مئاندری انجام دادند [۳۰]. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLUENT مشخصات جریان رودخانه، شامل میدان سرعت متوسط و مؤلفه‌های تنش رینولدز به دست آمدند. مدل مسیریابی لاگرانژی برای یک ذره انجام شده و انتقال و ته‌نشینی ذرات در مئاندر برای اندازه‌های مختلف ذرات مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نیروهای در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل نیروهای ثقلی و نیروی غیرخطی درگ بوده است. الگوی جریان به دست آمده از این نرم‌افزار با مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰۰ مورد مقایسه قرار

گرفت که نتایج نشان داد جریان‌های ثانویه شکل گرفته در قوس رودخانه بر الگوهای ته‌نشینی ذرات مؤثر می‌باشد.

Zou با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ (SPH) مدلی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب ساحلی ارائه نمود [۳۱]. مدل او از اولین مدل‌های SPH در مدل‌سازی رسوب است و او با توجه به در اختیار داشتن مدلی که با دقت پدیده‌های هیدرودینامیک ساحلی مانند شکست موج را مدل می‌کرد، اقدام به تهیه مدلی برای رسوب معلق نمود. از دیدگاه Zou، حل معادلات انتقال رسوب به کمک فرمولاسیون SPH از رفتار با سنگ به عنوان یک ذره واقعی، از نظر محاسباتی مقرون به‌صرفه‌تر بود. لذا وی پیشنهاد نمود از ترکیب SPH به عنوان مدل هیدرودینامیک با یک مدل اسکالر انتقال رسوب با در نظر گرفتن غلظت استفاده شود.

Yeganeh و همکاران در یک مطالعه برای شبیه‌سازی انتقال بار بستر در حالت سه‌بعدی از مدل المان مجزا استفاده نموده و از توزیع لگاریتمی سرعت برای فاز سیال بهره گرفتند [۳۲]. در پژوهش ایشان برای در نظر گرفتن تأثیر ذرات همسایه بر روی نیروی درگ از یک ضریب آرمورینگ استفاده شده که مقدار آن از ۰.۴ برای لایه با غلظت زیاد تا یک لایه جهش متغیر است. همچنین در این مطالعه مشخصات سرعت و غلظت ذرات و تبادل مومنتوم در لایه‌های مختلف بار بستر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نصراهی مطالعات گسترده‌ای روی مدل‌های مختلف حرکتی بار بستر انجام داد [۶]. ایشان برای اولین بار با استفاده از مدل برخورد نرم (روش المان مجزا) برای محاسبه برخورد بین ذرات، مدل‌های مختلف حرکتی بار بستر از آستانه حرکت تا جهش پیوسته به‌صورت یک ذره و گروهی از ذرات را شبیه‌سازی کردند. در تمامی مراحل شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده از مدل را با نتایج مختلف آزمایشگاهی و تحلیلی مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار داده و پارامترهای مختلف را واسنجی کردند. ایشان نتایج مدل را با منحنی شیلدز مقایسه کرده و روند این منحنی را به طرز مناسبی شبیه‌سازی کردند. ایشان همچنین غلتش و یک جهش یک ذره را شبیه‌سازی کرده و نتایج پایدار و دقیقی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست آوردند. در شبیه‌سازی جهش پیوسته ذره نیز تأثیر پارامترهای مختلف بر روی جهش ذره را مورد ارزیابی قرار داده و تغییرات ضریب ارتجاعی در شرایط مختلف هیدرولیکی و مدهای متفاوت مورد ارزیابی قرار دادند.

1 Smoothed particle hydrodynamics

Shakibaeinia and Jin با استفاده از ایده سیال غیر نیوتنی، در یک مدل دو فازی با روش MPS¹ اقدام به مدل سازی نمودند [۳۳]. برای دو فازی کردن مدل آن ها به جای رویکرد مرسوم که در آن از دو دسته معادله برای هر یک از فازها استفاده می شود، از یک دسته معادله کلی استفاده نمودند و در عوض مشخصات سیال از جمله چگالی و ویسکوزیته را برای هر یک از سیالات جداگانه در نظر گرفتند. برای مدل سازی سیال غیر نیوتنی مدل های رئولوژیک مختلفی اتخاذ شده، از جمله مدل پلاستیک بینگهام، مدل هرشل - بالکی و یا مدل ویسکو پلاستیک تعمیم یافته، که در نهایت با یکدیگر مقایسه شده اند. مدل Shakibaeinia and Jin در MPS توانست به خوبی مسئله شکست سد در بستر قابل حمل را شبیه سازی کند. نکته دیگر در مورد این تحقیق استفاده از تعداد ذرات زیاد در مدل دوبعدی است، زمان محاسبات آن ها برای هر گام زمانی ۰.۱ ثانیه ای به حدود ۵ ساعت می رسید. به همین دلیل آن ها مدل سه بعدی را به صرفه ندانسته و توصیه کردند در مدل های آتی از GPU استفاده شود.

Vetsch برای مدل سازی انتقال رسوب به وسیله روش های بدون شبکه، از روش SPH برای مدل سازی سیال و از روش المان مجزا برای شبیه سازی رسوب بهره برد [۳۴]. این شیوه که در تحقیقات دیگری نیز استفاده شده، می تواند از مزایای هر دو روش نامبرده استفاده کند. وی توانست مدل خود را برای پدیده های نیروی ارشمیدس و وزن غوطه ور، سقوط آزاد ذره در سیال و شبیه سازی جریان در کانال کالیبره کند و پس از آن در زمینه آبشستگی ناشی از یک جت آب و آبشستگی پایه ی پل مدل سازی هایی را انجام داد. مدل او اگرچه در زمینه شبیه سازی برخورد از دقت بسیار بالایی برخوردار است، اما به دلیل تلاش محاسباتی بالای مورد نیاز روش المان مجزا و همچنین گام های زمانی کوچکی که روش المان مجزا به مدل SPH تحمیل می کند از نظر هزینه ی محاسباتی طاقت فرسا است.

عطریان در مدل عددی خود که سه فاز جریان، رسوب و هوا را در نظر گرفته به مدل سازی جریان و فرسایش در پایین دست یک سرریز پرداخته و نتایج را با تحقیقات آزمایشگاهی مشابه مورد مقایسه قرار داده است [۳۵]. وی برای مدل سازی جریان و رسوب از رویکرد اویلری-لاگرانژی و برای مدل سازی فصل مشترک سیال و هوا از روش حجم سیال^۲ (VOF) استفاده کرده است. استفاده از

1 Moving Particle Semi-implicit

2 Volume of fluid

معادلات هم‌زمان بسیار زیاد به کار رفته شده برای شبیه‌سازی سه فاز گفته شده، زمان اجرای مدل ایشان را بسیار زیاد می‌کند.

۲-۶- مدل‌های برخورد ذرات رسوب

مطالعه برخورد بین اجسام در سینماتیک و دینامیک سابقه‌ای طولانی دارد. نیوتن ضریب بازپایی سینماتیک را برای اولین بار بر اساس آزمایش‌هایی که روی برخورد مستقیم کره‌های هم‌اندازه با جنس‌های متفاوت انجام داد، پیشنهاد نمود. بعدها به دلیل مشکلات این ضریب در برخوردهای دارای اصطکاک، پواسون ضریب بازگشت انرژی جنبشی را پیشنهاد نمود. از آنجایی که این ضریب نیز در شبیه‌سازی برخوردهای با خروج از مرکزیت اجسام، به ویژه در شرایطی که جهت لغزش بین دو جسم در هنگام برخورد تغییر می‌کند با کاستی‌هایی مواجهه می‌شود، Strong ضریب بازگشت انرژی^۱ را پیشنهاد نمود [۳۶].

در سال‌های اخیر بررسی برخورد اجسام صلب در صفحه توسط محققان مختلفی صورت گرفته است. لازم به ذکر است شبیه‌سازی تعداد زیادی از ذرات به خودی خود به لحاظ محاسباتی طاقت‌فرسا بوده و در نظر گرفتن الگوریتم‌هایی برای برخورد ذرات می‌تواند آن را پیچیده‌تر سازد. به همین دلیل بسیاری از محققان در شبیه‌سازی انتقال رسوب جهت ساده‌سازی معادلات و کاهش هزینه‌ی محاسباتی از تعامل میان ذرات صرف‌نظر کرده‌اند.

به طور کلی برای مدل‌سازی برخورد بین ذرات دو رویکرد برخورد نرم^۲ و سخت^۳ وجود دارد. در رویکرد برخورد نرم به ذرات اجازه داده می‌شود که مقداری در هم نفوذ کرده و بعد از نفوذ ذرات در یکدیگر، توابع جریمه وارد عمل شده و ذرات را به حالت اولیه باز می‌گردانند. در برخورد نرم در استفاده از تعداد ذرات لاگرانژی محدودیتی وجود نداشته و تنها هزینه‌ی محاسباتی ملاک استفاده از تعداد ذرات موردنیاز می‌باشد. در رویکرد سخت از تغییر شکل ذرات در حین برخورد صرف‌نظر شده و مسیریابی ذرات به وسیله بقای تکانه در برخوردهای متقابل مشخص می‌گردد. در این حالت فرض می‌شود که برخورد بین ذرات به صورت آنی بوده و اثر تمام برخوردها با جمع آثار هر یک از برخوردها محاسبه می‌گردد. استفاده از معادلات بقای تکانه و انرژی در حین برخورد توسط بسیاری از محققان

1 Energetic coefficient of restitution

2 Soft contact

3 Hard contact

برای محاسبه‌ی سرعت پس از برخورد مورد استفاده قرار گرفته است. به لحاظ برنامه‌نویسی استفاده از روش برخورد سخت معمولاً نیاز به سعی و خطا داشته که این موضوع تعداد ذرات مسئله را محدود می‌کند [34].

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های آماری در شبیه‌سازی عددی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها که در برخورد بین ذرات نیز استفاده گردیده، مدل برخورد تصادفی ذرات لاگرانژی می‌باشد. این مدل توسط Oesterle and Petitjean معرفی شده [۳۷] و توسط sommerfeld برای جریان دو فازی گاز-جامد گسترش پیدا کرده است [۳۸]. ایده‌ی این روش دنبال کردن ذرات به صورت مکرر و استفاده از اطلاعات ذرات دیگر برای محاسبات برخورد می‌باشد. این مدل برخورد برای اولین بار در نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX پیاده‌سازی و مورد استفاده قرار گرفته است [۳۹]. همچنین Bialik با استفاده از مدل sommerfeld و تغییر اندکی در معادلات مربوط به احتمال برخورد ذرات، مدل مذکور را برای جریان دوفازی سیال-جامد توسعه داد [۴۰]. وی در تحقیقات خود جهش‌های متوالی ذرات لاگرانژی در برخورد با بستر زبر را شبیه‌سازی کرده که تطابق مناسب نتایج مدل عددی با تحقیقات آزمایشگاهی نشان از موفقیت مدل برخورد تصادفی در حوزه‌ی جریان دوفازی سیال-جامد دارد.

۲-۷- جمع‌بندی

با توجه به مطالب گفته شده در این فصل مشاهده گردید عمده پژوهش‌های انجام شده در بحث انتقال رسوب به صورت آزمایشگاهی بوده و به دلیل پیچیدگی و هزینه‌ی محاسباتی کمتر مدل‌سازی عددی برای بررسی این پدیده مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقات عددی صورت گرفته نیز تاکنون به بررسی آستانه حرکت گروهی ذرات و پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی پرداخته نشده است. از این رو با توجه به اهمیت بحث آستانه حرکت ذرات رسوب و پارامترهای مؤثر بر آن در طراحی کانال‌های فرسایش پذیر، در این رساله به شبیه‌سازی گروهی آستانه حرکت ذرات پرداخته می‌شود. همچنین معیارهای مختلف آستانه حرکت و پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

فصل سوم:

روابط و معادلات حاکم

۳-۱- مقدمه

در این فصل معادلات و روابطی که برای مدل‌سازی ذرات رسوب به صورت انفرادی و گروهی و با رویکرد اویلری-لاگرانژی در جریان آشفته مورد نیاز بوده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا معادلات حاکم بر سیال بیان و روابط جریان آشفته و تئوری لایه‌ی مرزی بیان می‌گردد. سپس معادلات انتقال ذرات رسوب در روش ردیابی ذرات مطرح و روابط نیروهای وارد بر این ذرات و نحوه‌ی مدل‌سازی برخورد آن‌ها به صورت عددی تشریح می‌گردد. در نهایت بحث آستانه حرکت و نحوه‌ی استخراج معادلات آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است نحوه‌ی مدل‌سازی و نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی در فصل چهارم بیان می‌گردد.

۳-۲- معادلات فاز پیوسته

سیالات می‌توانند در یک مدل پیوسته توصیف گردند. این تئوری مادامی معتبر است که فرض بر متشکل بودن مایع از المان‌های میکروسکوپی باشد. حجم این المان‌ها در مقایسه با ابعاد مولکولی می‌بایست بزرگ باشد. در تئوری پیوستگی، سیال با ثابت‌های میکروسکوپیک ماده تشکیل‌دهنده‌ی خود به طور مثال ویسکوزیته و چگالی در نظر گرفته می‌شود که مستقل از متغیرهای ترمودینامیک بوده و می‌تواند از طریق تئوری‌های میکروسکوپیک (تئوری سینماتیک، مکانیک استاتیک) و یا از مدل‌های آزمایشگاهی به دست آید.

جریان سیال می‌تواند با دو دیدگاه متفاوت لاگرانژی یا اویلری بیان گردد. درحالی‌که دیدگاه اول مسیر حرکت المان‌های مشخصی از سیال را فرض می‌دارد، دیدگاه دوم حجم کنترل ثابتی را در نظر می‌گیرد. یک حجم کنترل، ناحیه‌ی معین و ثابتی در فضا بوده که المان‌های میکروسکوپیک سیال از آن عبور می‌کند. پس از آن حالت پیوستگی در این حجم‌های کنترل ثابت با میدان‌های متغیر در زمان توصیف می‌گردد.

قوانین حاکم بر جریان یک سیال نیوتنی، تراکم ناپذیر و لزج توسط یک معادله‌ی پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهات محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند،

بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتوم به بیان ریاضی می‌باشند. معادله پیوستگی یا معادله بقای جرم در یک جریان سیال به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad 1-3$$

معادله‌ی فوق در جریان‌های تراکم‌ناپذیر و با چگالی ثابت، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad 2-3$$

معادله ناویر استوکس، معادلات مومنتوم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزج می‌باشد. فرم تانسوری این معادلات در مختصات کارتزین به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i - S_p \quad 3-3$$

در روابط بالا ρ چگالی، u_i بردار سرعت در سه جهت، P فشار، τ_{ij} تنش برشی و g_i بردار شتاب ثقل می‌باشد. ترم مازاد S_p در معادله ناویر استوکس به سبب در نظر گرفتن اثر ذرات لاگرانژی روی میدان سیال بوده که بسته به غلظت ذره می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. جمله سمت چپ معادله ۳-۳، بیانگر شتاب سیال است که شامل تغییرات زمانی و مکانی سرعت بوده و جملات سمت راست این رابطه معادل نیرو در واحد جرم هستند.

۳-۳- معادلات جریان آشفته

جریان‌های کانال‌های باز در کنار غالب جریان‌های طبیعی و صنعتی آشفته هستند، به این معنی که جریان در میدان سرعت با نوسان‌های نامنظمی قابل توصیف است. شبیه‌سازی‌های مستقیم عددی^۱ توان محاسباتی بسیار بالایی را جهت حل مقیاس‌های کوچک آشفتگی لازم دارند. معمولاً وابستگی جریان بیش از آنکه بر جزئیات آشفتگی باشد، بر مشخصات متوسط جریان متکی است؛ بنابراین متوسطی از معادلات حرکت می‌تواند به‌منظور یک راه‌حل مکفی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد منجر به معادلات ناویر استوکس با رینولدز متوسط‌گیری شده^۲ خواهد شد که در ادامه

1 Direct numerical simulations (DNS)

2 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations

مورد بررسی قرار گرفته شده است [۴۱]. به منظور لحاظ نمودن مجموعه معادلات تشکیل دهنده، اثر نوسانات آشفتگی در معادلات RANS از طریق مدل آشفتگی در مدل سازی دیده شده است.

در ابتدا، سرعت را می توان به دو قسمت سرعت متوسط $\bar{u}$ و سرعت نوسانی u' (تجزیه ی رینولدز) تجزیه نمود:

$$u = \bar{u} + u' \quad ۴-۳$$

یا برای هر متغیر دیگری از جریان $\xi(x, t)$ مانند فشار برای آشفتگی ایستا با متوسط گیری زمانی داریم:

$$\bar{\xi}(x, t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(x, t) dt \quad ۵-۳$$

که در این معادله بازه ی زمانی T در مقایسه با مقیاس زمانی نوسانات باید بزرگ باشد. کلی ترین حالت متوسط گیری، که می تواند برای جریان های آشفتگی غیردائمی نیز به کار گرفته شود، متوسط گیری مجموع است.

$$\bar{\xi}(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi_n(x, t) \quad ۶-۳$$

در این رابطه N تعداد اعضای مجموع می باشد. چنانچه معادلات مومنتوم و پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر متوسط گیری شده و تجزیه ی رینولدز مورد استفاده واقع شود، آنگاه تبدیل به معادلات RANS خواهند شد.

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad ۷-۳$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'}{\partial x_j} \quad ۸-۳$$

در این معادله $\bar{\tau}_{ij} = \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ تانسور تنش ویسکوز متوسط^۱ بوده و لازم به ذکر است دیگر نیروهای بدنه لحاظ نشده اند. بر اساس معادله ی مومنتوم متوسط گیری شده آخرین ترم در معادله ی بالا پدید می آید

1 Mean viscous stress tensor

که $\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ تنش‌های رینولدز^۱ نامیده می‌شوند و در جریان‌های آشفته تنش‌های رینولدز معمولاً بزرگ‌تر از تنش‌های ویسکوز هستند.

با مقایسه تانسور تنش ویسکوز متوسط و بر مبنای فرضیه‌ی بوزینسک تنش‌های رینولدز می‌توانند به صورت زیر مدل شوند:

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k}) \delta_{ij} \quad ۹-۳$$

که در این رابطه k انرژی جنبشی آشفتگی^۲ بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$k = 0.5 \bar{u}_i' \bar{u}_i' \quad ۱۰-۳$$

همچنین ویسکوزیته آشفتگی^۳ $\mu_t = C_\mu \rho \sqrt{k} l$ یک ثابت تجربی و l اندازه بزرگی آشفتگی^۴ است. ویسکوزیته‌ی آشفتگی به صورت همسان^۵ فرض شده که اگرچه فرض کاملاً صحیحی نمی‌باشد اما برای بسیاری از جریان‌ها صحیح می‌باشد.

فشار $\bar{P}$ می‌تواند به صورت فشار متوسط اصلاح شده نوشته شود:

$$\bar{p} = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k \quad ۱۱-۳$$

تانسور تنش کلی و یا مؤثر برای جریان‌های غیرقابل تراکم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau = \mu_{eff} (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) - \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \bar{u}) I \quad ۱۲-۳$$

ویسکوزیته مؤثر $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$ جمع ویسکوزیته‌ی سیال و ویسکوزیته‌ی آشفتگی می‌باشد. بنابراین معادلات RANS فرمی مشابه معادلات ناویر استوکس داشته با این تفاوت که در آن سرعت متوسط $\bar{u}$ نوشته شده و به جای فشار p فشار متوسط اصلاح شده $\bar{p}$ استفاده می‌شود و همچنین ویسکوزیته‌ی مؤثر مستقل از زمان و مکان، جایگزین ویسکوزیته آرام خواهد شد. تانسور تنش مؤثر را می‌توان به صورت زیر مرتب کرد:

1 Reynolds stresses

2 Turbulent kinetic energy

3 Turbulent viscosity

4 Length scale of the turbulence

5 Isotropic

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot (\tau) &= \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \bar{u})^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \cdot \bar{u}) I) \\
&= \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \nabla \mu_{eff} (\nabla \bar{u})^T + \mu_{eff} \nabla ((\nabla \bar{u})^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \cdot \bar{u}) I) \\
&= \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \nabla \mu_{eff} (\nabla \bar{u})^T + \mu_{eff} \nabla ((\nabla \cdot \bar{u})) - \frac{2}{3} \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \cdot \bar{u}) I)
\end{aligned}
\tag{۱۳-۳}$$

با فرض $\nabla \cdot \bar{u} = 0$ خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot (\tau) = \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \nabla \mu_{eff} (\nabla \bar{u})^T \tag{۱۴-۳}$$

و یا

$$\nabla \cdot (\tau) = \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \nabla u \nabla \mu_{eff} \tag{۱۵-۳}$$

که معادله‌ی اخیر در نرم‌افزار OpenFOAM به کار برده شده است.

یکی از معمول‌ترین مدل‌هایی که معادلات RANS را می‌بندد، مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بوده که توسط Launder and Spalding پیشنهاد شده است [۴۲]. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل نیمه تجربی بوده که بر پایه‌ی مدل‌سازی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال آشفتگی^۱ (ε) استوار می‌باشد. رابطه انتقال برای k از رابطه صریح و برای ε با استفاده از استدلال فیزیکی به دست می‌آید. در استخراج مدل $k-\varepsilon$ فرض بر این است که جریان کاملاً آشفته بوده و اثر لزجت مولکولی قابل صرف‌نظر کردن است. معادلات انتقال k و ε در این مدل به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) + \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \tag{۱۶-۳}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{C_1 \mu_t}{\rho} \frac{\varepsilon}{K} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} \tag{۱۷-۳}$$

μ_t لزجت اغتشاش است که با استفاده از K و ε از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \tag{۱۸-۳}$$

ضرایب ثابت مدل $k-\varepsilon$ استاندارد در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود.

1 Turbulent dissipation rate

جدول ۳-۱ ضرایب ثابت مدل آشفتگی k-ε استاندارد

σ_k	σ_ε	C_μ	C_1	C_2
۱	۱.۳	۰.۰۸۵	۱.۴۴	۱.۹۲

۳-۴- تئوری لایه مرزی

سیال‌های واقعی ویسکوز بوده و از این رو اصطکاکی بین المان‌های سیال و نیز بین المان‌های سیال با مرزها وجود دارد. به همین سبب در مرزها سرعت سیال برابر با سرعت مرز بوده که برای دیواره‌های ثابت برابر با صفر می‌باشد. طبق تعریف لایه‌ی مرزی، ناحیه‌ای از جریان سیال در مجاور مرزها می‌باشد که تحت تأثیر مرز جامد قرار دارد. در نتیجه‌ی اصطکاک، سیال یک نیروی برشی بر دیواره‌ها اعمال می‌کند که تنش برشی دیواره نام داشته و برابر است با:

$$\tau_w = \mu \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad ۱۹-۳$$

در این معادله y مؤلفه‌ی قائم فاصله تا دیواره بوده و سرعت برشی u_* با تنش برشی روی مرز از طریق معادله‌ی زیر در ارتباط می‌باشد:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad ۲۰-۳$$

این معادله در واحد سرعت بوده ولیکن به صورت سرعت فیزیکی شناخته نمی‌شود. در جریان‌های مجاور دیواره به سبب وجود مرز، نوسانات آشفتگی ناپدید شده و در نتیجه‌ی آن تنش برشی ظاهری نیز محو می‌شود. بنابراین در نزدیکی دیواره‌های صاف یک لایه‌ی نازک ورقه‌ای شروع به گسترش یافتن کرده که رابطه‌ی زیر معتبر می‌باشد:

$$\tau_w = \mu \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad ۲۱-۳$$

در بالای این لایه‌ی ورقه‌ای جریان آشفته بوده و به همین دلیل گرادیان سرعت بیشتری در لایه‌ی نازک ورقه‌ای ظاهر می‌گردد. در این ناحیه‌ی آشفته تنش برشی کل τ ترکیبی از تنش برشی متوسط $\bar{\tau}$ و تنش برشی ظاهری τ' می‌باشد که این تنش برشی کل می‌تواند ثابت فرض شود:

$$\tau_w = \tau = \mu \frac{\partial \bar{u}_t}{\partial y} - \rho \overline{u'_t u'_y} \quad ۲۲-۳$$

در این معادله سرعت مماس به صورت $\overline{u_t} = |\overline{u}|$ بوده چرا که هیچ سرعت متوسط عمود بر دیوارها رخ نمی‌دهد. با تعریف $u^+ = \frac{\overline{u_t}}{u_*}$ می‌توان این سرعت را به فرم بدون بعد نیز ارائه کرد و فاصله‌ی بدون بعد تا دیواره نیز به صورت $y^+ = \frac{yu_*}{\nu}$ تعریف شود. در نتیجه توزیع سرعت می‌تواند به صورت تابعی از این فاصله تعریف شود:

$$u^+ = f(y^+) \quad ۲۳-۳$$

برای حالت زیرلایه‌ی ورقه‌ای^۱ ($y^+ < 5$) در معادله‌ی ۲۲-۳ آخرین ترم صفر می‌باشد:

$$u^+ = y^+ \quad ۲۴-۳$$

و در نتیجه $\frac{\partial \overline{u_t}}{\partial y} = \frac{u_*^2}{\nu}$ به دست می‌آید. در لایه‌ی آشفته ($30 < y^+ < 300$) تنش‌های رینولدز بسیار بزرگ‌تر از تنش‌های برشی ویسکوز می‌باشد چرا که در این حالت این لایه وابسته به ویسکوزیته نیست (تنش برشی ویسکوز رو به صفر می‌رود) و از این‌رو در این حالت، تابع u_* و y می‌باشد و رابطه $\frac{\partial \overline{u_t}}{\partial y}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \overline{u_t}}{\partial y} = \frac{1}{k} \frac{u_*}{y} \quad ۲۵-۳$$

با انتگرال‌گیری و با در نظر گرفتن سرعت و فاصله‌ی بی‌بعد داریم:

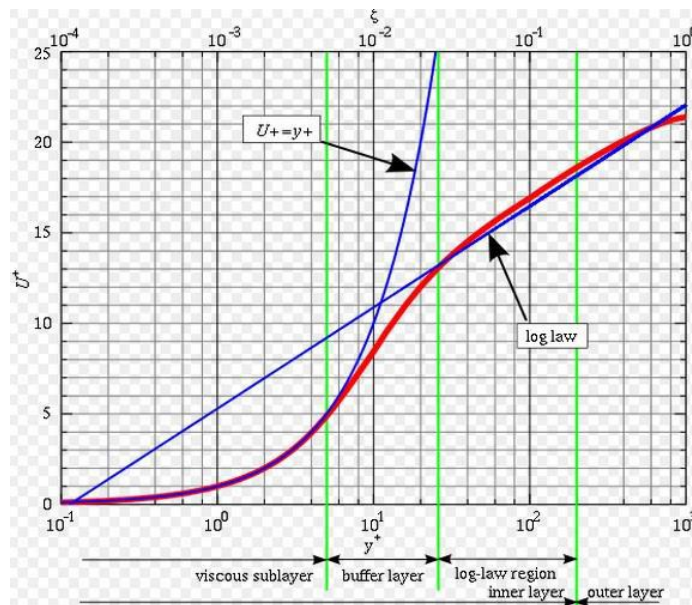
$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B \quad ۲۶-۳$$

در این رابطه k ثابت Von Karman و برابر ۰.۴۱ و ضریب B تقریباً برابر ۵.۴۵ در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است معادله‌ی ۲۶-۳ به نام قانون دیواره‌ها شناخته می‌شود.

در شکل ۱-۳ نتیجه‌ی تجربی پروفیل سرعت (خط قرمز) در مقایسه با خط به دست آمده از معادله‌ی قانون دیواره (خط آبی رنگ) و ناحیه‌ی زیر ورقه‌ای (منحنی آبی رنگ) برای هر یک از ناحیه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در ناحیه‌ی $5 < y^+ < 30$ یعنی لایه‌ی میانی^۲ منحنی به دست آمده از داده‌های تجربی با هر دو منحنی آبی به دست آمده از قوانین لایه‌ی زیر ورقه‌ای و دیواره متفاوت است.

1 Laminar sublayer

2 Buffer layer



شکل ۳-۱ پروفیل سرعت در لایه‌های مختلف جریان نسبت به فاصله تا دیواره (پروفیل قرمز رنگ حاصل داده‌های تجربی) [۴۳]

۳-۵- روش لاگرانژی ردیابی ذرات

مطالعه و ردیابی حرکت ذرات جامد در محیط سیالاتی بحث کاملاً جدیدی در علم مکانیک سیالات بوده و از دیدگاه لاگرانژی به عنوان یک جنبش و تحول محسوب می‌شود. مزیت این روش در مقایسه با روش تعیین میانگین غلظت در سلول‌ها از طریق معادلات اویلری حرکت و پخش در این است که در رویکرد لاگرانژی امکان ردیابی فرایند حرکت هر یک از ذرات با جزئیات و دقت بیشتری میسر می‌باشد. اما با زیاد شدن تعداد ذرات، هزینه‌ی محاسباتی در این روش بسیار افزایش یافته چرا که سرعت پردازش‌کننده‌های کامپیوتر و نیز مقدار حافظه‌ی توزیع‌یافته اهمیت به سزایی دارد.

روش لاگرانژی ردیابی ذرات، روشی است که تک‌تک ذرات فاز پراکنده را در جریان سیال ردیابی می‌کند. نکته‌ی مهم آنکه این روش برای ذرات کوچک‌تر از بعد شبکه‌ی مش باید استفاده شود. ذره‌ی p با مختصات مرکز آن x_p ، قطر آن D_p ، سرعت U_p ، و چگالی ρ_p تعریف می‌شود. حجم ذره برابر با $V_p = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3$ بوده و جرم آن $m_p = \rho_p V_p$ می‌باشد. در چارچوب لاگرانژی، بردار مکانی x_p هر ذره توسط معادله‌ی ساده‌ی شتاب آن ذره محاسبه می‌شود:

$$U_p = \frac{dx_p}{dt} \quad ۲۷-۳$$

انتقال هر ذره توسط قانون دوم نیوتن بیان می‌شود:

$$\sum F = \frac{m_p dU_p}{dt} \quad 28-3$$

$\sum F$ نیروهای وارد بر ذرات رسوب بوده که در بخش بعدی تشریح می‌گردد. با فرض جریان رقیق، نیروی غالب وارده بر ذره از طرف سیال، نیروی درگ خواهد بود که به جهت خلاصه‌نویسی در فرمول‌بندی روش لاگرانژی ردیابی ذرات، در روابط زیر از تأثیر دیگر نیروها و نیز از تأثیر نیروی ناشی از برخورد صرف‌نظر شده است. با این فرض خواهیم داشت:

$$\sum F = F_D + m_p g \quad 29-3$$

نیروی درگ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$F_D = -\frac{m_p(U_p - U)}{\tau_p} \quad 30-3$$

در این رابطه U سرعت متوسط جریان و τ_p زمان استراحت ذره، یعنی زمانی که طول می‌کشد تا یک ذره به تغییرات محلی سرعت جریان پاسخ دهد، می‌باشد:

$$\tau_p = \frac{4}{3} \frac{\rho_p D_p}{\rho C_D |U_p - U|} \quad 31-3$$

برای محاسبه ضریب C_D برای ذرات کروی از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده و در صورت فرض ذرات سخت می‌تواند به صورت ارائه شود [۴۴]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & Re_p < 0.1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.167 Re_p^{0.67}) & 0.1 < Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad 32-3$$

از آنجا که سرعت سیال به دست آمده از معادلات اوپلری (U) به منظور محاسبه‌ی نیروی درگ در معادلات لاگرانژی موردنیاز می‌باشد، از این رو مقدار سرعت در موقعیت ذره ($U_{@p}$) را با استفاده از معادلات مربوطه و از روی گره‌های شبکه در رویکرد اوپلری به دست آمده و با توجه به معادله‌ی ۲۹-۳ خواهیم داشت:

$$m_p \frac{U_p^{t+\Delta t} - U_p^t}{\Delta t} = -m_p \frac{U_p^{t+\Delta t} - U_{@p}^t}{\tau_p} + m_p g \quad 33-3$$

از این رو سرعت ذره بعد از گام زمانی لاگرانژی Δt به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$U_p^{t+\Delta t} = \frac{U_p^t + U_{@p}^t \frac{\Delta t}{\tau_p} + g\Delta t}{1 + \frac{\Delta t}{\tau_p}} \quad 34-3$$

بر این اساس موقعیت جدید ذره نیز با استفاده از معادله‌ی ۳-۲۷ به صورت زیر می‌باشد:

$$x_p^{t+\Delta t} = x_p^t + U_p^t \Delta t \quad 35-3$$

چنانچه گام زمانی اوپلری در چندین گام زمانی لاگرانژی پیایی کامل شود، سرعت و موقعیت در nامین گام زمانی لاگرانژی به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$U_p^{t+\sum_{i=1}^n \Delta t_i} = \frac{U_p^{t+\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i} + U_{@p}^t \frac{\Delta t_n}{\tau_p} + g\Delta t_n}{1 + \frac{\Delta t_n}{\tau_p}} \quad 36-3$$

$$x_p^{t+\sum_{i=1}^n \Delta t_i} = x_p^{t+\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i} + U_p^{t+\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i} \Delta t_n \quad 37-3$$

سپس با محاسبه‌ی همه نیروها معادلات ۳-۲۷ و ۳-۲۸ با مشخص بودن $U_p(0)$ و $x_p(0)$ در گام زمانی قبل به صورت زیر در یک سیستم ODE حل می‌گردد [۴۵]:

$$\dot{x}_p = U_p, \quad \dot{U}_p = \frac{1}{m_p} \sum F \quad 38-3$$

۳-۶- نیروهای وارد بر ذرات

جریان سیال با ذرات جامد در کنش بوده و بنابراین سیال نیروهای مختلفی را بر ذرات رسوب وارد می‌سازد. این نیروها شامل چندین نیروی فیزیکی با طبیعت‌های متفاوت می‌باشند. علاوه بر نیروی درگ^۱ که ناشی از یک سرعت نسبی بین ذرات و سیال می‌باشد، نیروی لیفت (برکنش)^۲ و نیروی گرادیان فشار^۳ بسیار حائز اهمیت هستند. دیگر نیروها شامل نیروی تاریخی بست^۴ و نیروی جرم افزوده^۵ که ناشی از شتاب ذره نسبت به سیال می‌باشند، نیروی ناشی از چرخش ذره یعنی نیروی

1 Drag force

2 Lift force

3 Pressure gradient force

4 Basset history force

5 Virtual mass force

مگنوس^۱ و همچنین نیروی ویسکوز^۲ که ناشی از تانسور تنش برشی سیال (اصطکاک سیال و ذره) می‌باشد به دلیل تأثیر کم در انتقال ذرات در تحقیق حاضر مدل نشده‌اند.

با به کارگیری روش ردیابی ذرات تمامی ذرات به روش لاگرانژی انتقال داده شده و بنابراین ردیابی هر کدام از ذرات به تنهایی محاسبه می‌شود. به این ترتیب هر ذره می‌تواند دارای حرکات چرخشی و انتقالی بوده و بنا بر قانون دوم نیوتن تعادل نیروی و چرخشی آن به صورت زیر خواهد بود:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = f_n + f_t + f_{pf} + f_b \quad 39-3$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = r_c \times f_t + T_r \quad 40-3$$

در صورت استفاده از رویکرد برخورد نرم، ذرات می‌توانند به اندازه Δx_p در یکدیگر نفوذ داشته باشند. بر این اساس و نیز بر اساس مؤلفه عمودی سرعت نسبی دو ذره در نقطه برخوردشان $\Delta u_{p,n}$ ، نیروی عمودی حاصل می‌شود که دو ذره را از یکدیگر دور کرده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_n = -k_n \Delta x_p + d_n \Delta u_{p,n} \quad 41-3$$

f_t نیز مؤلفه مماسی حاصل از برخورد ذرات بوده که بر سطح تماس دو ذره وارد شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_t = \min \left\{ \left| k_t \int_0^t \Delta u_p dt + d_t \Delta u_{p,t} \right|, \mu_c f_n \right\} \quad 42-3$$

پارامترهای k_n ، k_t ، d_n و d_t به ترتیب ضرایب سختی و دمپینگ در جهات مماس و عمودی می‌باشد [۴۶]. I_p ممان اینرسی و ω_p سرعت چرخشی ذره و r_c برداری از مرکز جرم ذره به سمت نقطه‌ی برخورد دو ذره می‌باشد. پیچش وارد بر ذره به دو دلیل ایجاد می‌شود:

❖ ناشی از مؤلفه‌ی مماسی نیروی برخورد دو ذره در سطح آن‌ها

❖ ممان چرخشی اصطکاکی T_r که مانع از چرخش حول ذرات دیگر می‌شود.

f_b نیروهای بدنه شامل گرانش، الکترواستاتیک و اینرسی بوده که در تحقیق حاضر نیروی بدنه شامل تنها نیروی گرانش می‌شود:

$$f_b = m_p g \quad 43-3$$

1 Magnus force

2 Viscous Force

f_{pf} نشان دهنده نیروهایی است که سیال بر ذره وارد می‌سازد که به صورت زیر در نظر گرفته شده و در ادامه همین بخش به طور مفصل ارائه خواهد شد:

$$f_{pf} = f_g + f_D + f_{\nabla p} + f_L + f_B \quad 44-3$$

در حالی که نیروی وارده از طرف سیال و نیروهای بدنه بر مرکز جرم ذره وارد می‌شوند، نیروهای برخورد ذره-ذره بر نقطه‌ی برخورد دو ذره وارد می‌شود. هر ذره‌ی فیزیکی به صورت یک کره است که شتاب انتقالی و زاویه‌ای آن مبتنی بر تعادل مومنتوم ذره است. در ادامه هر یک از این نیروها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نیروی گرادیان فشار $f_{\nabla p}$ نیرویی است که بر اثر اختلاف فشار وارده بر یک ذره حاصل می‌شود و به صورت زیر محاسبه می‌گردد [47]:

$$f_{\nabla p} = -\nabla(p)V_p \quad 45-3$$

به منظور بازنویسی رابطه‌ی فوق به صورت تابعی از فشار پیزومتریک $p_{rgh} = p - \rho_f(g \cdot x)$ این معادله بر حسب گرادیان فشار پیزومتریک به صورت $f_{\nabla p rgh} = -\nabla(p_{rgh})V_p$ خواهد بود که گرادیان فشار می‌تواند با گرادیان سرعت سیال به صورت $\nabla p_{rgh} = -\rho_f(u_f \cdot \nabla)u_f$ جایگزین شود [48]. در نهایت نیروی گرادیان فشار پیزومتریک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{\nabla p} = (\rho_f(u_f \cdot \nabla)u_f)V_p \quad 46-3$$

به نیرویی که در جهت بالا به جسم کاملاً و یا نیمه غوطه‌ور در آب وارد شده و برابر با وزن سیال هم‌حجم جسم می‌باشد، نیروی شناوری گفته شده و رابطه‌ی آن با لحاظ نمودن وزن خود جسم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_B = m_p \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) g \quad 47-3$$

نیروی درگ f_D نتیجه‌ی مقاومت یک ذره در سیال بوده که به سرعت نسبی بین سیال و ذره بستگی دارد. مؤلفان در گذشته روابط متفاوتی برای نیروی درگ پیشنهاد داده که برخی از متداول‌ترین آن‌ها در ادامه تشریح می‌گردد.

مدل درگ Ergun به طور مستقیم از تئوری فضای متخلخل¹ برگرفته شده و برای فضای متراکم ($\alpha_f < 0.8$) به صورت زیر خواهد بود [49]:

1 Porous media

$$f_{D,Ergun} = \left(150 \frac{(1 - \alpha_f)^2 \rho \nu}{\alpha_p D_p^2} + 1.75 \frac{\rho(1 - \alpha_f)|\bar{u}_r|}{D_p} \right) \frac{V_p}{\alpha_p \bar{u}_r} \quad ۴۸-۳$$

که در آن $\bar{u}_r$ سرعت متوسط نسبی ذره، α_p نسبت حجمی ذره و α_f نسبت حجمی سیال می‌باشد. Wen and Yu روابط زیر را برای نیروی درگ پیشنهاد می‌دهند [۵۰]:

$$F_{D,WenYu} = 0.75 C_D \frac{\alpha_f(1 - \alpha_f)\rho|\bar{u}_r|}{D_p} \alpha_f^{-2.65} \frac{V_p}{\alpha_p \bar{u}_r} \quad ۴۹-۳$$

ضریب درگ C_D و عدد رینولدز ذره Re_p با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad ۵۰-۳$$

$$Re_p = \frac{\alpha_f D_p |\bar{u}_r|}{\nu} \quad ۵۱-۳$$

ترکیب دو رابطه‌ی فوق توسط Gidaspow و همکاران ارائه شده است [۵۱]:

$$F_D = \begin{cases} F_{D,Ergun} & \text{for } \alpha_f < 0.8 \\ F_{D,WenYu} & \text{for } \alpha_f > 0.8 \end{cases} \quad ۵۲-۳$$

مدل ترکیبی اخیر به دلیل قابلیت بالا در مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از کسر حجمی در شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل نیروی درگ دیگر که توسط Di Felice ارائه شده به صورت زیر می‌باشد [47]:

$$F_{D,Di Felice} = 0.125 C_D \rho_f \pi d_p^2 \alpha_f^2 |u_r| u_r \alpha_f^{-\xi} \quad ۵۳-۳$$

در این رابطه C_D و ξ از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_D = \left(0.63 + \frac{32}{\sqrt{Re_p}} \right)^2 \quad ۵۴-۳$$

$$\xi = 3.7 - 0.65 \exp\left(-\frac{1.5 - \log Re_p^2}{2}\right) \quad ۵۵-۳$$

ذرات کوچک در یک میدان برشی متحمل نیرویی به نام نیروی لیفت می‌شوند که عمود بر راستای حرکت نسبی دو فاز می‌باشد. نیروی لیفت وارد بر ذره به این دلیل است که فشار در پایین ذره نسبت به سطح بالای آن بیشتر می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که در مقادیر زیاد عدد رینولدز ذره نیروی لیفت تقریباً برابر با مقدار نیروی درگ خواهد بود. شواهدی نیز نشان‌دهنده‌ی آن است که در مقادیر بسیار کم عدد رینولدز ذره نیروی لیفت تا حد منفی شدن ضعیف می‌گردد.

روش‌های متعددی در مدل‌سازی این نیرو وجود دارد که از معروف‌ترین آن‌ها به مدل Saffman Mei و مدل Tomiyama می‌توان اشاره نمود که در ادامه روابط آن‌ها تشریح می‌گردد [48].

مدل لیفت Saffman Mei عمدتاً برای ذرات جامد کروی کاربرد دارد، گرچه این مدل می‌تواند برای قطرات مایع که شکستگی و خمیدگی قابل ملاحظه‌ای ندارند نیز به کار رود. این مدل، توسعه‌یافته‌ی مدل Saffman بوده که برای محدوده‌های کم عدد رینولدز ذره (نسبت به مدل اخیر) قابل استفاده است. Saffman نیروی لیفت را برای ذره‌ی کروی و در جریانی با مقدار رینولدز کم به صورت زیر فرمول‌بندی کرد [52]:

$$F_{L,Saffman} = \frac{\frac{3}{2\pi}\sqrt{v_c}}{d_p\sqrt{\nabla \times u_c}} \dot{C}_L r_d \rho_c (u_d - u_c) \times (\nabla \times u_c + 2\Omega) \quad 56-3$$

در رابطه Ω بردار چرخش و $\dot{C}_L$ ضریبی که برابر ۶.۴۶ می‌باشد. رابطه‌ی Saffman توسط Mei برای محدوده گسترده‌تری از اعداد رینولدز بازنویسی شد [53]:

$$F_L = \begin{cases} 6.46 \cdot f(Re_p, Re_\omega) & Re_p < 40 \\ 6.46 \times 0.0524 \cdot \sqrt{\beta Re_p} & 40 < Re_p < 100 \end{cases} \quad 57-3$$

که در آن $f(Re_p, Re_\omega) = (1 - 0.3314\sqrt{\beta})e^{-0.1Re_p} + 0.3314\sqrt{\beta}$ و $\beta = 0.5(\frac{Re_\omega}{Re_p})$ و $Re_\omega = \frac{\rho_c \omega_c d_p^2}{\mu_c}$ و $Re_p = \frac{\rho_c |u_c - u_d| d_p}{\mu_c}$ می‌باشد.

مدل Tomiyama برای لحاظ نمودن نیروی لیفت وارد بر حباب‌هایی با تغییر شکل زیاد در رژیم‌هایی با کلاهک‌های کروی یا بیضوی شکل کاربرد دارد. بنابراین در این مدل نیاز به تعیین تنش سطحی بین فازهای پراکنده و پیوسته می‌باشد. خصوصیات اصلی این مدل در پیش‌بینی نقطه‌ی بحرانی در اندازه‌ی حباب است که در آن نقطه خمیدگی ذره منجر به تغییر علامت نیروی لیفت می‌گردد. Tomiyama نیروی لیفت را به صورت زیر تعریف نمود [54]:

$$F_L = \begin{cases} \min[0.228 \tanh(0.121Re_p), f(E\acute{O})] & E\acute{O} \leq 4 \\ f(E\acute{O}) & 4 < E\acute{O} \leq 10 \\ -0.27 & E\acute{O} > 10 \end{cases} \quad 58-3$$

پارامتر $f(E\acute{O})$ در معادله‌ی بالا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(E\acute{O}) = 0.00105E\acute{O}^3 - 0.0159E\acute{O}^2 - 0.0204E\acute{O} + 0.474 \quad 59-3$$

تعریف $E\acute{O}$ نیز توسط Tomiyama در تحقیق وی ذکر شده است.

افزایش یا کاهش شتاب یک ذره به افزایش یا کاهش شتاب قسمت عمده‌ای از سیال اطراف ذره بستگی دارد. معمولاً ذره در حال حرکت قسمتی از سیال پیرامون خود را جابجا می‌کند که این مقدار باعث ایجاد نیرویی به نام جرم افزوده می‌گردد. برای اعداد رینولدز بالا نیروی جرم افزوده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

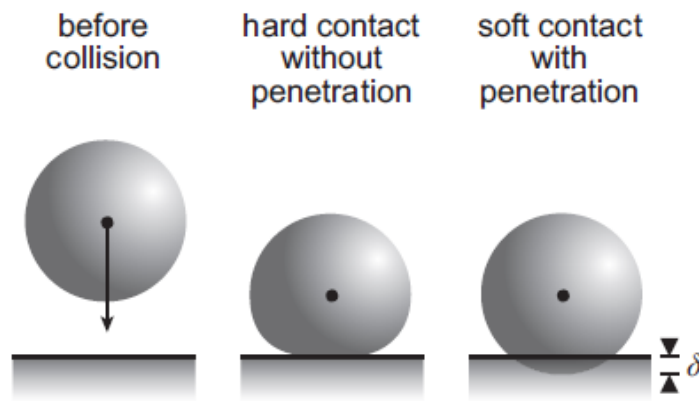
$$F_{AM} = 0.5 C_A \rho \frac{m_p}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) , \quad C_A = 2.1 - \frac{0.132}{A_c^2 + 0.12} , \quad A_c = \frac{|\vec{u} - \vec{u}_p|^2}{d_p \left| \frac{d|\vec{u} - \vec{u}_p|}{dt} \right|} \quad ۶۰-۳$$

۳-۷- برخورد بین ذرات

در شبیه‌سازی اجسام صلب، نیاز به لحاظ نمودن اثرات برخورد و تعادل نیروهای برخورد به وجود آمده می‌باشد. Cundall and Hart بین تماس سخت که نفوذ ذرات غیر فیزیکی در نظر گرفته می‌شود و تماس نرم که در آن ذره اجازه‌ی نفوذ دارد، تمایز قائل شده‌اند (شکل ۳-۲) [۵۵]. برای اجسام، اولین حالت از لحاظ فیزیکی معقول به نظر می‌رسد، چرا که برخورد منجر به تغییر شکل سطح ذره می‌شود. بدین صورت، مدل شبیه‌سازی باید حداقل بتواند مومنتوم تماس ذره را مدل‌سازی کند (شبیه‌سازی تغییر سطح ذره می‌تواند انجام نگیرد). در حالت تماس سخت، به کارگیری یک روش تکرار لازم می‌باشد و به همین خاطر، نرم‌افزارهای مرتبط معمولاً به یک تعداد مشخصی از اجسام در حال برخورد محدود می‌باشند [34].

در صورتی که برخورد نرم موردنظر باشد، مقدار نفوذ معادل تغییر شکل سطح به اندازه‌ی δ خواهد بود. یک مثال معروف برای این حالت، تئوری برخورد هرتز^۱ می‌باشد که برخورد بین دو ذره‌ی تغییر شکل‌پذیر را توصیف می‌کند. لازم به ذکر است، از آنجایی که رویکرد تماس نرم، اجازه‌ی مدل‌سازی پایدار و دقیق برخورد اجسام صلب را می‌دهد، لذا این روش مفهوم اولیه‌ی روش المان مجزا را تشکیل می‌دهد که می‌تواند برای تعداد غیر محدودی از ذرات (تا آنجا که منابع محاسباتی اجازه می‌دهد) به کار گرفته شود.

¹ Hertz contact theory



شکل ۳-۲ رویکردهای مدل سازی برخورد ذرات در برخورد با و بدون نفوذ ذره [34]

یک روش متداول جهت مدل سازی نیروهای بازگشتی^۱ بین دو ذره ی متصادم استفاده از مدل فنر-دمپر-اصطکاک^۲ می باشد. با فرض وجود دو ذره ی P_i و P_j وضعیت سیستم بسته به موقعیت قرارگیری ذرات و مقدار عمق هم پوشانی آنها، پارامتر δ به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\delta = (r_i + r_j) - r_{ij} \begin{cases} \leq 0 : \text{ غیر فعال} \\ > 0 : \text{ فعال} \end{cases} \quad ۶۱-۳$$

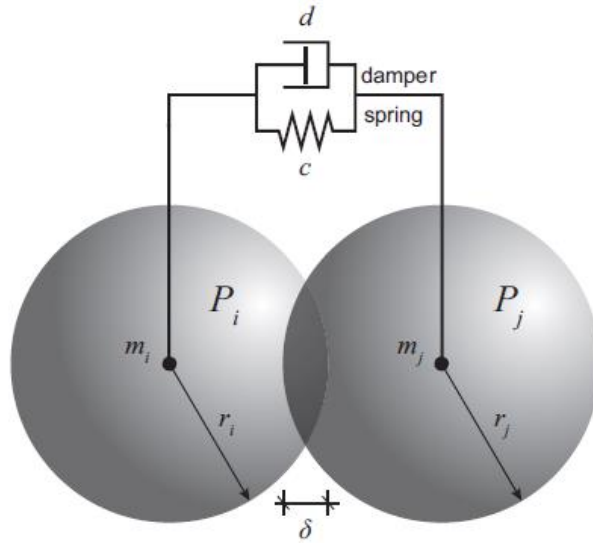
که در این رابطه، r_i و r_j شعاع هر یک از ذرات و r_{ij} فاصله ی بین مراکز دو ذره می باشد. شکل ۳-۳ یک سیستم فنر-دمپر فعال را نشان می دهد. فنر موجود در سیستم مسئولیت بازگرداندن ذرات را به حالت اولیه ی تماس دارد. این فنر نیروی بازگشتی $\vec{F}_n(k(\delta))$ را با توجه به خواص و جنس ماده و همچنین عمق هم پوشانی در جهت محور سیستم $\vec{e}_{sd}$ یعنی عمود بر سطح تماس وارد می سازد.

$$\vec{F}_n(k(\delta)) = -k(\delta)\vec{e}_{sd} \quad ۶۲-۳$$

نیروی بازگشتی $\vec{F}_n(k(\delta))$ با استفاده از دو رویکرد خطی و غیر خطی (بسته به سختی فنر) قابل تعیین می باشد.

1 Penalty forces

2 Spring-dashpot-slider system



شکل ۳-۳ سیستم فعال فنر-دمپر در حالت هم‌پوشانی دو ذره‌ی متصادم [34]

یک روش ساده در مدل‌سازی نیروی ناشی از دمپر به کار بردن دمپر ویسکوز می‌باشد. نیروی وارده از دمپر به سرعت برخورد بین دو ذره‌ی متصادم یعنی $\dot{\delta} = |v_i - v_j|$ در راستای محور سیستم بستگی دارد:

$$\vec{F}_d = -d\dot{\delta}\vec{e}_{sd} \quad ۶۳-۳$$

در این رابطه d ضریب دمپینگ ویسکوز با واحد $\left[\frac{N.s}{m}\right]$ می‌باشد. با استفاده از معادلات گفته شده نیروی برخورد F_c به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_c = \vec{F}_n(k(\delta)) + F_d \quad ۶۴-۳$$

با فرض اینکه سیستم فنر-دمپر با عمق هم‌پوشانی برابر صفر باشد، در این صورت یک مسئله یک‌بعدی حاصل می‌شود. برای یک سیستم با دو جرم که به یکدیگر در حال نزدیک شدن می‌باشند، جرم مؤثر یا جرم کاهش‌یافته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mu_m = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad ۶۵-۳$$

با به کار بردن قانون دوم نیوتون خواهیم داشت:

$$\mu_m \ddot{\delta} \vec{e}_{sd} = F_c \quad ۶۶-۳$$

که در نهایت منجر به معادله‌ی حرکت زیر خواهد شد که وابسته به مدل نیروی بازگشتی مرتبط با $k(\delta)$ می‌باشد:

$$\mu_m \ddot{\delta} + d\dot{\delta} + k(\delta) = 0 \quad ۶۷-۳$$

متداول ترین مدل جهت تعیین نیروی لازم برای جابجایی یک فنر قانون هوک بوده که در این حالت فنر به صورت کاملاً الاستیک در نظر گرفته می شود. برای یک فنر با سختی c و جابجایی δ که در راستای سیستم فنر می باشد، قانون نیروی خطی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{F}_s(\delta) = -c\delta\vec{e}_{ij} = \vec{F}_n(k(\delta)) \quad , \quad k(\delta) = c\delta \quad ۶۸-۳$$

مدل دیگر برخورد دو کره کاملاً الاستیک با سطح بدون اصطکاک و بر اساس تئوری هرتز می باشد. قانون نیروی غیرخطی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{F}_n(k(\delta)) = -K\delta^n\vec{e}_{ij} \quad ۶۹-۳$$

به این صورت $k(\delta) = K\delta^n$ بوده که K ثابت سختی فنر می باشد و توان n بسته به توزیع تنش های ثابت بر اساس کار اصلی انجام شده توسط هرتز، مقدار ۱.۵ به خود می گیرد. سختی فنر بر اساس شعاع و خواص جنس ذرات متضاد i و j به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K = \frac{4}{3(\sigma_i + \sigma_j)} \left| \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \right|^{0.5} \quad ۷۰-۳$$

پارامترهای σ_i و σ_j از رابطه‌ی $\sigma_k = \frac{1-\vartheta_k^2}{E_k}$ به دست آمده که ϑ_k و E_k به ترتیب ضریب پواسون و مدول ینگ می باشند.

۳-۸- تبادله مومنتوم و ذره‌ی سیال

همان طور که در معادله ۳-۳ بیان گردید، ترم s_p اثر ذرات لاگرانژی را روی سیال در نظر می گیرد. نیروی وارده از طرف ذره به حجم واحد سیال متناسب با اختلاف مومنتوم ذره بین زمان های ورود (t_{in}) و خروج (t_{out}) ذره از حجم کنترل می باشد:

$$s_p \propto m_p((U_p)_{t_{out}} - (U_p)_{t_{in}}) \quad ۷۱-۳$$

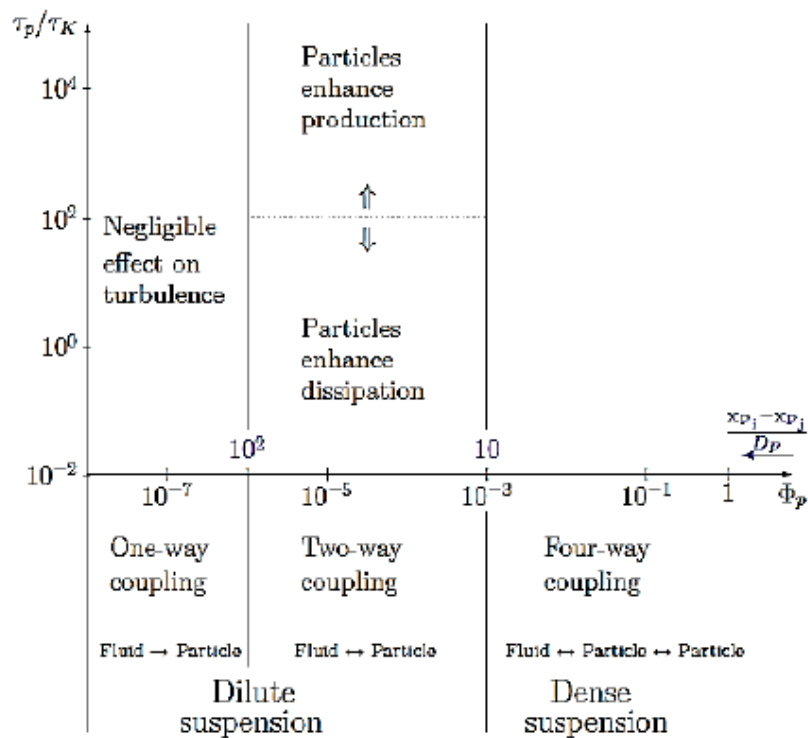
نکته‌ی مهم آنکه بسته به غلظت تراکم ذره، می توان با فرضیاتی از ترم s_p در معادله‌ی مومنتوم صرف نظر کرد. در حالت تعلیق رقیق^۱ ($\frac{x_{pi}-x_{pj}}{D_p} > 10$) با کسر حجمی ذرات کمتر از 10^{-6} جریان بر ذرات تأثیر گذاشته اما ذرات بر جریان تأثیری ندارد که به این حالت اندرکنش یک طرفه گفته می شود

¹ Delute suspension

و به دلیل کسر حجمی بسیار پایین ذرات، از برخورد بین ذرات نیز صرف نظر می شود. برای کسر حجمی بالاتر ذرات پراکندگی ذرات بیشتر شده (شکل ۳-۴) که این حالت اندرکنش دوطرفه نامیده شده و در این حالت ترم s_p روی سیال اثرگذار می باشد. برای تعلیق های غلیظ^۱ ذرات $(\frac{x_{p_i} - x_{p_j}}{D_p} > 10)$ با مدل سازی برخورد ذرات، اندرکنش ذرات بین یکدیگر نیز باید به حساب آید.

گام زمان لاگرانژی، زمانی است که ذره برای ترک سلول اشغال شده صرف می کند. ترم مومنتوم از طریق ذره در طول گام زمانی اویلری dt با عبور از هر یک از سلول هایی که در طول مسیرش قرار دارد تولید می شود. سهم تمامی ذرات در طول گام زمانی اویلری dt که در سلول k با حجم کنترل v_k بوده است به صورت زیر بیان می گردد:

$$s_{p@cell k} = \frac{1}{v_k dt} \sum m_p ((U_p)_{t_{outcellk}} - (U_p)_{t_{incellk}}) \quad ۷۲-۳$$



شکل ۳-۴ تقسیم بندی رژیم های جریان در جریان های دارای فاز ذره

¹ Dense suspension

۳-۹- آستانه حرکت ذرات رسوب

با در نظر گرفتن جریان سیال بر روی بستری که به عنوان مرز متشکل از ذرات فرسایش پذیر است، نیروهای هیدرودینامیکی که مورد بحث قرار گرفته شد، بر روی این ذرات اثر می کنند. چنانچه جریان و به تبع آن نیروهای هیدرودینامیکی یک مقدار معین را بر ذرات وارد کنند، ذرات رسوب شروع به حرکت می کنند. فرآیند آغاز حرکت ذرات، طبیعتی احتمالاتی داشته و از این رو تمام ذرات به صورت یکسان آغاز به حرکت نکرده و برخی از آن ها شروع به حرکت کرده و باقیمانده ی آن ها مقاومت می کنند. این مقدار معینی که آغاز حرکت را توصیف می کند معمولاً شرط بحرانی یا فرسایش بحرانی نام داشته و می تواند با سه رویکرد سرعت بحرانی، تنش برشی بحرانی و نیروی لیفت بحرانی مورد بررسی قرار گیرد [۵۶].

نیروهای اصلی وارده بر ذره نیروهای درگ f_D و نیروی لیفت f_L و نیروی شناوری f_G هستند. نیروی لیفت در مقایسه با نیروی درگ به صورت زیر تعریف می گردد:

$$f_L = \frac{1}{2} C_L \rho A_p |U - U_p|^2 \quad ۷۳-۳$$

نیروی وزن غوطه وری نیز به صورت زیر تعریف می گردد:

$$f_G = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_p - \rho) g \quad ۷۴-۳$$

در شکل ۳-۵ برای یک ذره ی مشخص تعادل لنگری نیروهای درگ و لیفت و ثقل در نقطه ی p نشان داده شده است. بر این اساس رابطه ی زیر را می توان به دست آورد:

$$f_D \times r'_c = -(f_G + f_L) \times r_c \quad ۷۵-۳$$

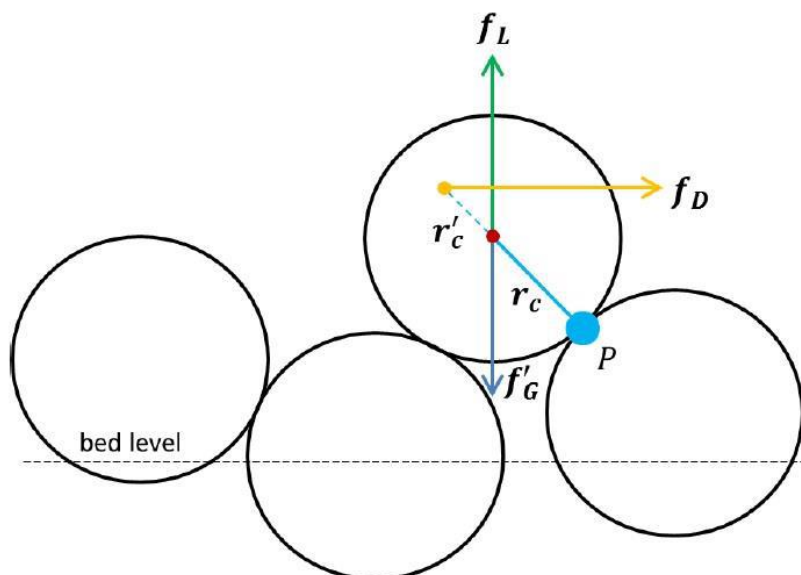
که $r'_c = \beta r_c$ و دلیل آن این می باشد که نیروی درگ مؤثر در ارتفاع نامعینی بالاتر از مرکز جرم اثر کرده که ناشی از حضور ذرات اطراف می باشد.

افزایش نیروی لیفت یا درگ با توجه به تعادل، باعث آغاز حرکت ذره خواهد شد. چنانچه زاویه ی بین نیروی ثقلی f_G و r_c برابر با φ_{gc} بوده و با بستر به صورت افقی در نظر گرفته شود، معادله ی قبلی به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\beta f_D \frac{D}{2} \cos(\varphi_{gc}) = (f_G - f_L) \times \frac{D}{2} \sin(\varphi_{gc}) \quad ۷۶-۳$$

که معادله ی زیر را می توان از آن استخراج نمود:

$$\tan(\varphi_{gc}) = \frac{\beta f_D}{(f_G - f_L)}$$



شکل ۳-۵ تعادل لنگری نیروهای درگ و لیفت و ثقل در نقطه‌ی p [۵۷]

در این رابطه φ زاویه ایستایی بوده که غالباً به جای زاویه نامشخص φ_{gc} به کار برده می‌شود. با جایگذاری روابط نیروها در معادله‌ی فوق و صرف‌نظر کردن از ارتفاع، تأثیر نیروی درگ و فرض اینکه u_p هنگام آغاز حرکت صفر می‌باشد، می‌توان معیار سرعت بحرانی را به دست آورد [56]:

$$\frac{u_c^2}{(\frac{\rho_p}{\rho} - 1)gD} = \frac{\frac{4}{3}\tan(\varphi)}{C_D - C_L\tan(\varphi)} \quad ۷۸-۳$$

زیرنویس c علامت شرایط تنش بحرانی است که توسط بسیاری از محققین مورد استفاده قرار گرفته است.

مفهوم نیروی لیفت بحرانی نیز نیروی ناشی از اختلاف فشار وارده بر ذره، جهت قرار دادن ذره در آستانه حرکت را بیان می‌دارد. این نیرو به دلیل گرادیان سرعت در کف و در نتیجه گرادیان فشار و همچنین به دلیل سرعت رو به بالای وارده بر ذره که پیامد آشفتگی است، پدید می‌آید. می‌توان فرض کرد که نوسانات سرعت ناشی از آشفتگی از توزیع نرمال تبعیت کرده و در ارتباط با سرعت اصطکاک می‌باشد. با وجود اینکه آشکار است که نیروی لیفت تأثیر عمده‌ای بر تحریک رسوب جهت حرکت دادن آن دارد، ولیکن هیچ رابطه‌ی مناسبی برای نیروی لیفت بحرانی یافت نشده است [56].

فصل چهارم:

مدل سازی، صحت سنجی و بررسی نتایج

۴-۱- مقدمه

با توجه به مقدمات گفته شده در فصل‌های گذشته، در این فصل به بیان نحوه‌ی مدل‌سازی و نتایج پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا نرم‌افزار مورد استفاده و قابلیت‌های آن بیان و سپس شرایط ساخت مدل و فرضیات به کار رفته در پژوهش تشریح می‌شود. در بخش بعدی مدل به کار رفته برای اعمال برخورد مناسب بین ذرات رسوب و مقایسه‌ی آن با مدل برخورد فعلی ذکر می‌شود. در ادامه بررسی استقلال حل عددی از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و با انتخاب چند شبکه، بهترین گزینه با توجه به دقت و هزینه‌ی محاسباتی انتخاب می‌شود. سپس برای بررسی کد حاضر، سرعت و نیروهای وارد بر ذره‌ی رسوب صحت سنجی شده و در ادامه غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت پایانی فصل چهارم نیز آستانه حرکت گروهی ذرات و پارامترهای مؤثر بر شیلدر بحرانی بررسی شده است.

۴-۲- معرفی نرم‌افزار و نحوه‌ی مدل‌سازی

در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی و نیل به اهداف موردنظر از بسته نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی OpenFOAM استفاده شده است. این نرم‌افزار به زبان ++C نوشته شده و ابزاری معمول و با قابلیت‌های بالا در محدوده‌ی گسترده‌ای از شبیه‌سازی‌های متفاوت، از جریان‌های پیچیده‌ی سیال گرفته تا دینامیک جامدات و الکترومغناطیس می‌باشد. شایان ذکر است که این نرم‌افزار، شامل کتابخانه‌هایی از پیش تعیین شده با کلیدواژه‌هایی جهت فراخوانی هر یک از فرایندهای حل می‌باشد. ساختار این نرم‌افزار بر پایه حل مسائل سه‌بعدی بنا نهاده شده و از تانسور با مرتبه‌های مختلف برای توصیف مشخصات فیزیکی مسئله استفاده می‌کند. دیدگاه نرم‌افزار OpenFOAM ایجاد یک نمونه مطالعاتی و حل آن با استفاده از حلگری از پیش تعیین شده است که متناسب با نیاز کاربر تغییر می‌کند.

مجموعه کدهای نرم‌افزار در ایجاد حلگرهایی برای شبیه‌سازی مسائل مطرح در مهندسی مکانیک و یا ایجاد کاربردها برای اعمال پیش‌پردازش و پس‌پردازش و همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حلگرها قابل دسترسی باشند و یا برای مدل‌های فیزیکی، مورد

استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار با تعدادی حلگر از پیش ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها ارائه گردیده که می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد.

نرم‌افزار OpenFOAM از روش حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که به هر شبکه‌بندی غیر ساختاریافته سه‌بعدی، سلول‌های چندوجهی نسبت داده می‌شود. در این نرم‌افزار حلگرهای جریان، با استفاده از یک چارچوب تکرار برای سرعت و فشار گسترش یافته‌اند. موازی‌سازی، جدا کردن یا بخش‌بندی دامنه‌ی حل از مبانی این نرم‌افزار بوده و حلگرها بدون نیاز به کد نویسی ویژه به منظور حل موازی قابل توسعه می‌باشند. این نرم‌افزار دارای کتابخانه لاگرانژی نیز بوده و می‌تواند هم‌زمان با جریان اویلری سیال مورد استفاده قرار بگیرد.

حلگر مورد استفاده در تحقیق حاضر DPMFoam بوده که فاز پیوسته را به صورت اویلری و فاز گسسته را به صورت ذرات پراکنده و به روش لاگرانژی ردیابی ذرات انتقال می‌دهد. این حلگر با توجه به ویژگی‌هایی که داراست، یکی از حلگرهای مناسب برای شبیه‌سازی ذرات رسوب می‌باشد. این حلگر با رویکرد اویلری-لاگرانژی معادلات فاز رسوب-جامد را با استفاده از معادلات ناویر استوکس که در فصل سوم تشریح شد، حل کرده و حرکت ذرات نیز با استفاده قانون دوم نیوتون و معادلات روش المان مجزا دنبال می‌کند. نیروهای رایج برای در نظر گرفتن اندرکنش فاز جامد و سیال شامل نیروهای درگ، شناوری، گرادیان فشار، وزن، جرم افزوده، بست و لیفت می‌باشد که بسته به هر مسئله می‌توان از نیروهای کم‌اهمیت صرف‌نظر کرد.

روش حل معادلات فاز پیوسته با استفاده از روش حجم محدود بوده که با استفاده از شکل انتگرالی معادلات بقا، معادلات اویلری را گسسته‌سازی می‌کند. اساس گسسته‌سازی معادلات در حلگر بر اساس الگوریتم PIMPLE بوده که ترکیبی از الگوریتم‌های PISO و SIMPLE می‌باشد و همبستگی بین سرعت و فشار را با استفاده از روش پیش‌بینی تصحیح دنبال می‌کند. در شکل ۴-۱ ساختار حلگر DPMFoam با رویکرد اویلری-لاگرانژی ارائه شده است.

برای ساخت هندسه و ایجاد شبکه مدل موردنظر از نرم‌افزار Gambit و یا قابلیت blockMesh برای نرم‌افزار کمک گرفته می‌شود. در صورتی که هندسه‌ی مدل پیچیده باشد از Gambit و برای هندسه‌های ساده‌تر از blockMesh استفاده می‌شود. هندسه، ابعاد، اندازه‌ی مش و نام شرایط مرزی در Gambit ایجاد شده و سپس توسط یک فایل واسط این اطلاعات به نرم‌افزار اصلی منتقل می‌گردد.

این در حالی است که برای استفاده از blockMesh پارامترهای گفته شده تنها با یک دستور در نرم افزار اجرا می شوند.

به منظور حل معادلات در یک مسئله ی معین، شرایط مرزی و اولیه لازم می باشد. چنانچه محدوده ی محاسباتی مرزهای نامحدودی نداشته باشند آنگاه، به منظور تعریف کامل محدوده با یکی از شرایط مرزی زیر، لازم است که سرعت جریان و فشار به نحو صحیحی تعریف گردند. شرایط مرزی Drichlet برای هر پارامتر در مرز یک مقدار تعریف شده اختصاص می دهد. در حالی که شرط مرزی Neumann توسط گرادیان نرمال در مرز تعریف می گردد. به دلیل آنکه شار عمود بر سطح دیواره برابر با صفر است بنابراین گرادیان نرمال فشار استاتیک p باید برابر با صفر باشد. لازم به ذکر است حلگر فشار را بدون در نظر گرفتن فشار هیدرواستاتیک ρgh یعنی $p_{rgh} = p - \rho gh$ حل کرده و مقادیر p را بر اساس p_{rgh} به دست می آورد چون معادلات فشار بر اساس p_{rgh} حل می شوند. این کار به آن دلیل است که از بی تعادلی نیروی فشار در شبکه بندی های نامنظم و غیر عمود برهم جلوگیری شود [57].

بدین شرح، شرایط مرزی فشار در کف بستر کانال به صورت $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ بوده که به فرم زیر تغییر خواهد کرد:

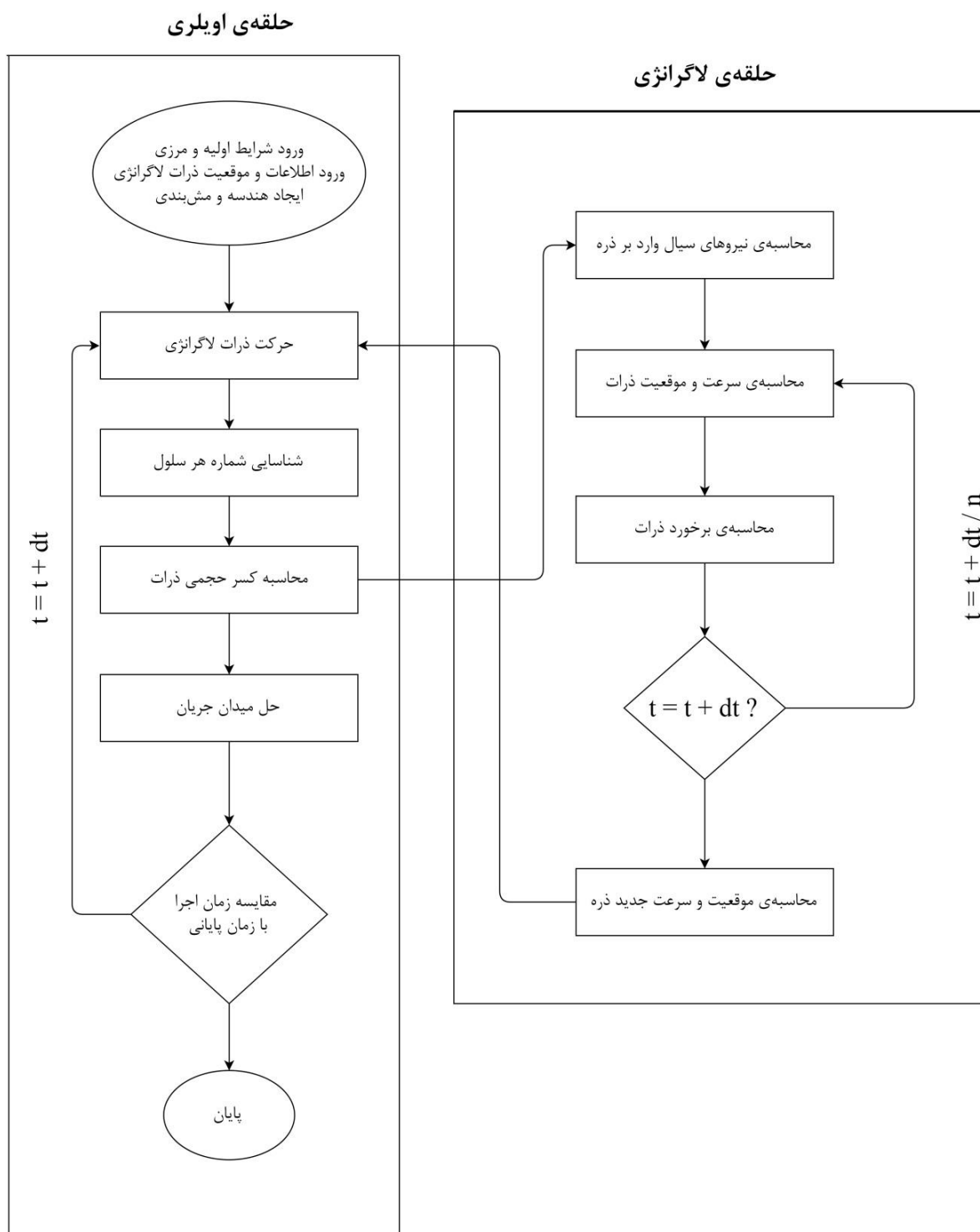
$$\frac{\partial p_{rgh}}{\partial n} = -\frac{\partial}{\partial n}(\rho g z) \quad 1-4$$

برای افزایش دقت در مدل سازی از اثر ذرات رسوب بر روی جریان سیال صرف نظر نگردیده است. بنابراین در این پژوهش نیاز به حل معادلات جریان و شکل گیری پروفیل سرعت لگاریتمی و سپس اعمال نیروی وارده از طرف جریان به ذرات رسوب می باشد. سرعت در مرز ورودی به صورت یک عدد ثابت بوده و در مرز جامد به نحوی اعمال گردیده که شرایط عدم لغزش ارضا شود. شرط مرزی فشار نیز به صورت مقدار ثابت صفر در مرز خروجی و گرادیان صفر در بقیه مرزها به کار گرفته شده است.

شروط مرزی مربوط به انرژی جنبشی آشفته و نرخ اضمحلال آشفتگی نیز برای ورودی برابر مقدار ثابت و از روابط زیر و برای بقیه مرزها برابر شرط مرزی Neumann منظور شده است.

$$k = 1.5u'^2, \quad \varepsilon = \frac{c_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l}, \quad \nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 2-4$$

در این روابط l بزرگی طول آشفتگی است که برابر با ۷٪ قطر هیدرولیکی و u' نیز برابر ۵ درصد سرعت متوسط جریان قرار داده می شود.



شکل ۴-۱ فلوچارت ساختار حلگر DPMFoam

لازم به ذکر است در برخی موارد مانند شبیه‌سازی آستانه حرکت ذرات رسوب به یک شرط مرزی سرعت نیاز بوده که با گذشت زمان افزایش یابد. برای این منظور از قابلیت groovyBC در نرم‌افزار استفاده شده که امکان وابسته کردن سرعت یا فشار به مکان و زمان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

در این حالت سرعت ورودی تابعی از زمان بوده و با نرخ ثابت و افزایش زمان اجرا، سرعت ورودی نیز افزایش می‌یابد.

برای انفصال معادلات حاکم در جملات دارای ترم زمانی از روش اویلر، جملات گرادیان از روش خطی گاوس، جملات دیورژانس از روش خطی گاوس و Upwind، جملات لاپلاس از روش خطی گاوس اصلاح شده و درونیابی خطی استفاده شده است. همچنین برای حل دستگاه معادلات به دست آمده برای ماتریس ضرایب، از روش $GAMG^1$ برای حل ماتریس فشار و از روش تکرار برای حل ماتریس سرعت با خطای قابل پذیرش 10^{-6} به کارگیری شده است.

به منظور تأمین همگرایی حل عددی، مقدار مجاز عدد کورانت² معادل ۰.۵ در نظر گرفته شد و گام زمانی به صورت متغیر انتخاب گردید. به این صورت در هر گام زمانی عدد کورانت محاسبه شده و با توجه به سقف در نظر گرفته شده برای این عدد گام زمانی در قدم بعدی محاسبه می‌شود. این موضوع در مقایسه با انتخاب یک گام زمانی یکسان در طول فرایند اجرا هزینه‌ی محاسباتی کمتری به مسئله تحمیل می‌کند.

یکی از نکات مهم در نرم‌افزار امکان تعریف جریان دوبعدی به صورت کامل است. به این معنی که با باز گذاشتن مرزهای جامد در امتدادی که جریان قابل توجهی وجود نداشته و مورد نظر نمی‌باشد، جریان به طور حقیقی دوبعدی می‌شود. این امکان ایجاد شده بدون نیاز به افزایش عرض کانال برای خنثی نمودن اثرات دیواره‌های جامد کانال، بتوان عرض را به حداقل ممکن رساند و از این طریق تعداد سلول‌های محاسباتی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در حالت استفاده از حالت دوبعدی لازم است مرزهای قائم جلو و عقب کانال به صورت empty تعریف شوند. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به عدم حل معادلات حاکم در امتدادی که فاقد جریان است، تعریف یک سلول محاسباتی در این راستا الزامی می‌باشد.

نیروهای در نظر گرفته بر ذرات لاگرانژی شامل نیروی درگ پیشنهادی توسط Gidaspow، نیروی لیفت Saffman Mei، نیروی وزن و شناوری می‌باشد. بسته به جنس ذرات استفاده شده در مسئله مشخصات آن‌ها شامل چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون ذرات رسوب به برنامه معرفی می‌شود.

1 Geometric agglomerated algebraic multigrid

2 Courant number

همچنین قطر ذرات رسوب، موقعیت آن‌ها، نحوه‌ی ورود به میدان حل، سرعت اولیه ذرات و پارامترهای موردنیاز مدل برخورد ذرات توسط کاربر وارد فایل مشخصات ذره در نرم‌افزار می‌شود.

۴-۳- اعمال مدل برخورد

همان‌طور که در بخش‌های گذشته ذکر گردید، برای در نظر گرفتن اثر برخورد ذرات رسوب به یکدیگر باید از مدل برخورد مناسب استفاده کرد. این مدل اندرکنش ذرات لاگرانژی با یکدیگر در نظر گرفته و نیروی برخورد و یا سرعت ذرات پس از برخورد را محاسبه می‌کند. تنها مدل برخورد در نرم‌افزار OpenFOAM مدل برخورد کروی نرم بوده که با استفاده از سیستم فنر-دمپر برخورد ذرات با یکدیگر را در نظر می‌گیرد. مدل مذکور برای شبیه‌سازی یک ذره‌ی رسوب مناسب بوده اما با افزایش تعداد ذرات و مدل‌سازی گروهی آن‌ها که هدف اصلی رساله می‌باشد، استفاده از این مدل به دلیل هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالا، طاقت‌فرسا می‌شود. علاوه بر آن مدل برخورد کروی نرم دارای ضرایب زیادی بوده که به دلیل حساسیت بیش از حد مدل به این ضرایب، احتمال واگرایی حل در طول شبیه‌سازی بسیار زیاد می‌گردد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر هدف نهایی مدل‌سازی گروهی ذرات رسوب و آستانه حرکت آن‌ها در شرایط مختلف می‌باشد، اعمال مدل برخورد مناسب به کتابخانه نرم‌افزار OpenFOAM در دستور کار قرار گرفت.

برای جبران نقاط ضعف گفته شده، مدل برخورد تصادفی sommerfeld به کتابخانه نرم‌افزار اعمال گردید [38]. این مدل در ابتدا برای جریان دوفازی گاز - جامد مورد استفاده قرار گرفته و در ادامه برای جریان دو فازی سیال - جامد نیز گسترش داده شد [40]. در این مدل، برخورد بین ذرات لاگرانژی بر اساس محاسبه احتمال برخورد، صورت می‌گیرد. در صورت روی دادن برخورد، ذره‌ی مجازی در نظر گرفته شده و با فرض برخورد با این ذره مجازی، با استفاده از پایداری تکانه خطی، سرعت ذره پس از برخورد محاسبه می‌شود. یکی از مزیت‌های این روش این بوده که نیازی به اطلاعات مکانی ذرات اطراف خود نداشته و از این رو در ردیابی پی در پی ذرات کاربرد دارد، همان‌طور که در رویکرد اوپلری-لاگرانژی در جریان‌های ساکن دنبال می‌شود. در هر گام زمانی برای محاسبه‌ی مسیر ذرات لاگرانژی، یک ذره‌ی دوم مجازی ایجاد شده که سرعت و قطر آن به صورت تصادفی از توابع توزیع محلی گرفته می‌شود.

برای محاسبه‌ی قطر ذره‌ی مجازی نیاز به اطلاعاتی از قطر ذرات محلی پیرامون می‌باشد. از آنجا که در شرایط عملی توزیع اندازه‌ی ذرات ممکن است در طول جریان به دلیل پاسخ‌های مختلف ذرات

به جریان تغییر کند، توزیع اندازه‌ی ذرات باید برای هر حجم کنترل از کل محاسبات ایجاد و ذخیره شود. این امر نیاز به توزیع اندازه ذرات توسط تعدادی دسته داشته که در عمل تعداد ۲۰ دسته برای این منظور کافی می‌باشد. در بسیاری موارد تفاوت اندازه‌ی ذرات ممکن است توسط یک تابع توزیع لگاریتمی که با یک قطر متوسط و یک انحراف استاندارد مشخص می‌شود، نشان داده شود. در چنین حالتی باید این دو خاصیت برای هر حجم کنترل دامنه‌ی محاسباتی ذخیره شود. بدین ترتیب اندازه ذرات مجازی به طور تصادفی از چنین عملکرد توزیعی ساخته می‌شود.

مؤلفه‌های سرعت ذرات مجازی با استفاده از میانگین سرعت محلی و از طریق تابع توزیع سرعت گاوس با مقدار میانگین جذر مربع محلی تشکیل می‌شود. همچنین باید همبستگی اندازه-سرعت ذرات برای هر حجم کنترل به دست آید، یعنی میانگین ذرات و سرعت برای هر طبقه اندازه‌ی ذره اندازه‌گیری و ذخیره می‌شوند. پاسخ سرعت ذرات به نوسانات آشفتگی از طریق عدد استوکس^۱ (St) پاسخ داده می‌شود که طبق تعریف نسبت زمان پاسخ ذره به زمان مقیاس آشفتگی می‌باشد. تابع همبستگی پیشنهاد شده توسط sommerfeld بر حسب عدد استوکس به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R(St) = \exp(-0.55 St^{0.4}) \quad ۳-۴$$

سرعت نوسانی ذره‌ی مجازی نیز با استفاده از تابع همبستگی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$v'_{2,i} = R(St)v'_{1,i} + \sigma_{p,i}\sqrt{1 - R(St)^2}\xi \quad ۴-۴$$

در این رابطه اندیس ۱ به ذره‌ی واقعی، اندیس ۲ به ذره‌ی مجازی و اندیس i نیز به محورهای مختصات دکارتی اشاره دارد. $\sigma_{p,i}$ سرعت نوسانی متوسط در حجم کنترل و ξ عدد تصادفی گاوس با میانگین صفر و انحراف استاندارد واحد می‌باشد. فرکانس برخورد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_c = \frac{\pi}{4}(d_{p1} + d_{p2})^2 |\vec{v}_1 - \vec{v}_2| n_p \quad ۵-۴$$

در این رابطه d_{p1} و d_{p2} قطر ذرات واقعی و مجازی، $\vec{v}_1$ و $\vec{v}_2$ سرعت‌های ذره‌ی واقعی و مجازی و n_p تعداد ذره در واحد حجم می‌باشد. احتمال برخورد نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$P_c = 1 - \exp(-f_c \Delta t) \quad ۶-۴$$

Δt گام زمانی محلی بوده و برای دقت و پایداری روش پیشنهاد می‌گردد:

¹ Stokes number

$$\Delta t \leq \frac{0.05}{f_c} \quad ۷-۴$$

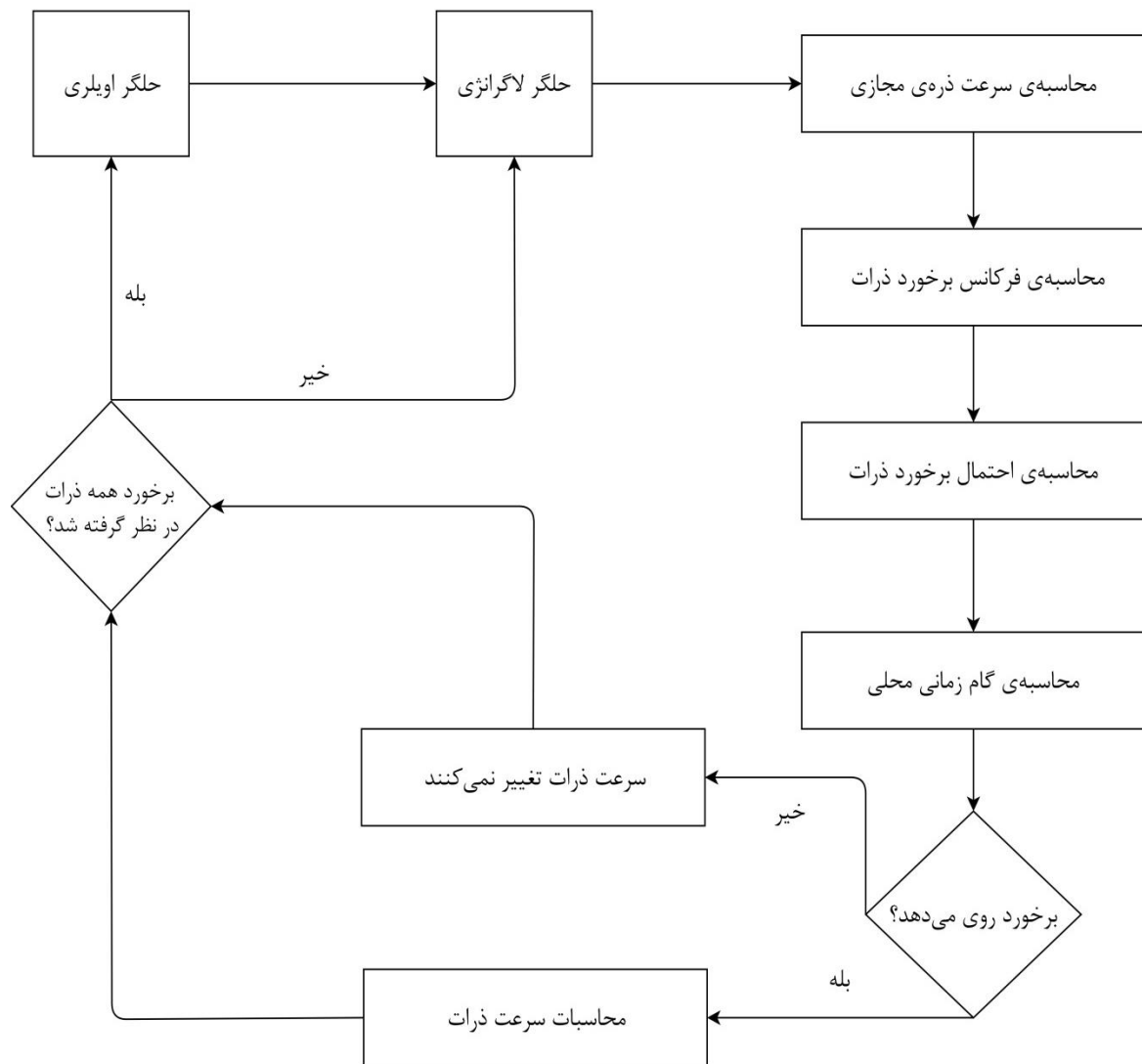
سپس یک عدد تصادفی (RN) بین صفر و یک تولید شده و با P_c مقایسه می‌شود. در صورت $P_c > RN$ برخورد رخ داده و در غیر این صورت برخوردی بین ذرات رخ نداده و سرعت واقعی ذره بدون تغییر باقی می‌ماند. در نهایت سرعت طولی و عرضی ذره پس از برخورد از روابط زیر محاسبه می‌شود [38]:

$$u_{out} = u_{in} \left(1 - \frac{1+e}{1+m_1/m_2} \right) \quad ۸-۴$$

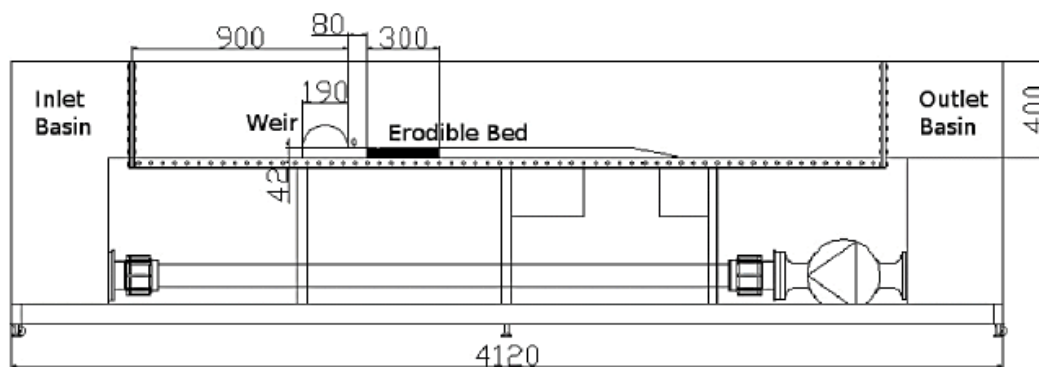
$$v_{out} = v_{in} \left(1 - \mu \frac{u_{in}}{v_{in}} \frac{1+e}{1+m_1/m_2} \right) \quad ۹-۴$$

در این روابط e و μ ضرایب بازگشت و اصطکاک، m_1 و m_2 جرم دو ذره‌ی واقعی و مجازی در نظر گرفته شده می‌باشد. در شکل ۲-۴ فلوچارت ساختار مدل برخورد تصادفی ذرات نشان داده شده است. در ادامه برای مقایسه دقت و هزینه‌ی محاسباتی دو مدل برخورد کره نرم و مدل برخورد تصادفی که به کتابخانه‌های OpenFOAM اضافه گردید، از یک تحقیق آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه‌ی آزمایشگاهی موردنظر، آبشستگی در پایین‌دست یک سرریز بوده که توسط Gruber در یک کانال باز و بدون شیب انجام شده است [57].

کانال مورد استفاده در پژوهش Gruber عبارت است از یک آبگذر به طول ۴.۱۲ متر و عرض ۰.۴ متر و با مقطع مستطیلی به‌طوری که یک سرریز به شکل نیم استوانه و با شعاع ۹۵ میلی‌متری در موقعیت ۰.۹ متری از مقطع ورودی نصب شده است (شکل ۳-۴). مبدأ محور مختصات در انتهای سرریز واقع شده است. محور x در راستای جریان، محور y در راستای ثقل و به سمت بالا و محور z که توصیف‌کننده‌ی عرض کانال است، در صفحه پشته‌ی کانال قرار دارد.



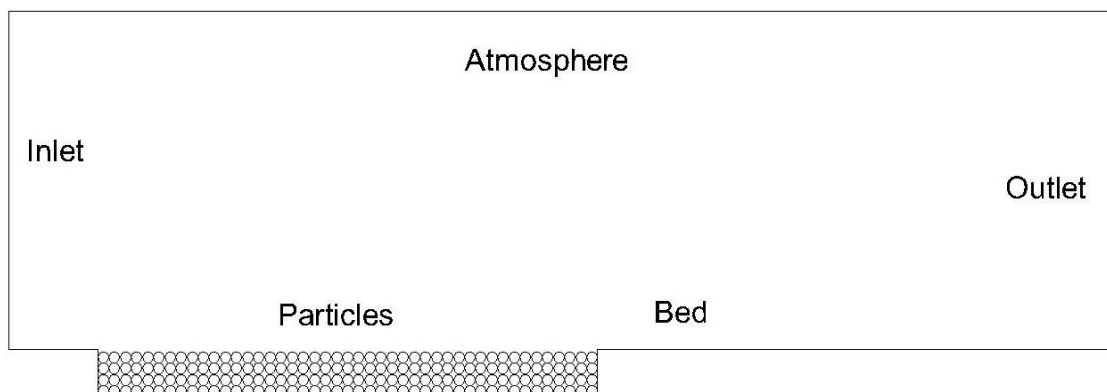
شکل ۲-۴ فلوجارت ساختار مدل برخورد تصادفی



شکل ۳-۴ شماتیک کانال مورد استفاده در آزمایشگاه با مدل‌سازی یک سرریز و بستر ثابت و بستر [57]

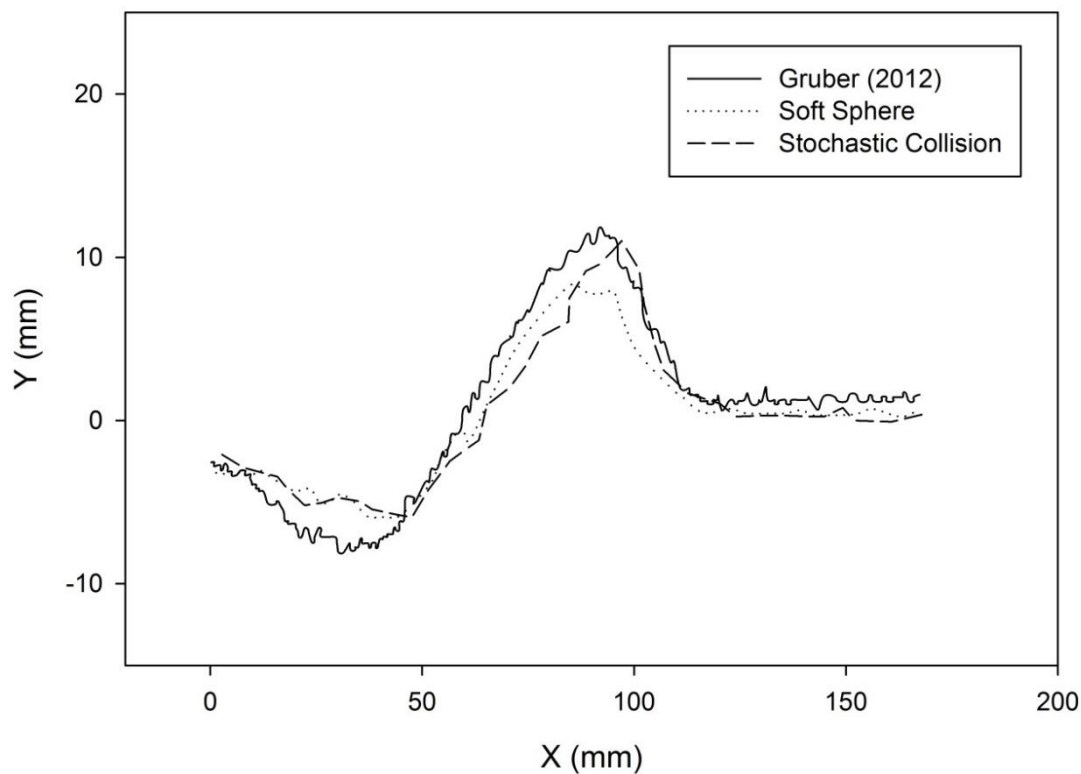
از آنجا که هیچ مکانیسم کنترل کننده‌ای در پایین دست و یا بالادست آگذر استفاده نشده است، به همین دلیل سطح آب می‌تواند آزادانه در بالادست و پایین دست تغییر کند. پس از ثابت نمودن مقدار ولتاژ پمپاژ، مقدار ارتفاع آب در بالادست ۱۵۷ و در پایین دست ۶۹ میلی‌متر مشاهده شده است. این آزمایش با و بدون در نظر گرفتن بستر فرسایش پذیر که شامل ذرات شیشه‌ای با قطر ۲ میلی‌متر بوده، صورت پذیرفته است. همان گونه که در شکل ۴-۳ نیز نشان داد شده است، بستر فرسایش پذیر ۸۰ میلی‌متر بعد از انتهای سرریز شروع شده و ۳۰۰ میلی‌متر طول دارد. به جهت جلوگیری از فرسایش حجم در پشت سرریز، فاصله ۸۰ میلی‌متری از بستر ثابت (فرسایش ناپذیر) تشکیل شده است که این همانند آن چیزی است که در واقعیت، در سازه‌های هیدرولیکی بسیاری وجود دارد. عمق بستر فرسایش پذیر ۴۲ میلی‌متر بوده و در پشت این بستر، سطح بستر کانال به صورت ثابت ادامه می‌یابد. سرعت متوسط ورودی برابر ۰.۰۲۸۶ متر بر ثانیه و دبی جرمی ۱.۷۹ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد.

در مدل سازی عددی شبیه سازی سرریز و پروفیل جریان ایجاد شده روی آن، نیاز به در نظر گرفتن مرز بین سیال و هوا داشته که مدل حاضر فاقد این ویژگی می‌باشد. در نتیجه قسمتی از محدوده‌ی محاسباتی که با توجه به نتایج ارائه شده توسط پژوهش آزمایشگاهی تأثیری در روند اجرای آزمایش نداشته، اصلاح گردید. در نتیجه سرریز در هندسه‌ی مدل عددی لحاظ نشده و سرعت جریان بعد از سرریز به عنوان شرایط مرزی ورودی مدل عددی در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل عدم تأثیر بعد سوم روی نتایج، جهت کاهش حجم محاسبات مدل عددی به صورت دوبعدی ساخته شد. شرایط مرزی سرعت برای دیواره‌ها به صورت عدم لغزش و شرط مرزی فشار به صورت گرادیان صفر اعمال گردیده است. مقدار سرعت در مرز ورودی برابر با مقدار متوسط سرعت اندازه گیری شده در مدل آزمایشگاهی قرار داده شد. فشار در خروجی نیز برابر صفر و فشار ورودی و سرعت خروجی نیز به صورت گرادیان ثابت به مرزهای مربوطه تحمیل شدند. جهت شبیه سازی بستر فرسایش پذیر از ذرات دایروی به قطر ۰.۰۰۲ متر و چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده گردید. سایر شرایط فیزیکی مسئله و سیال مورد استفاده مشابه پژوهش آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. شماتیکی از مدل عددی ساخته شده و شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



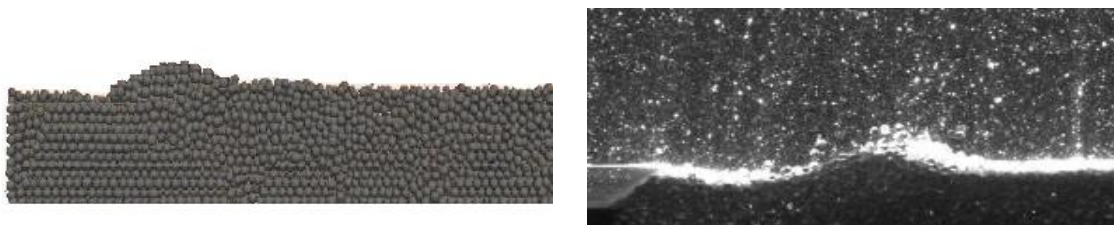
شکل ۴-۴ شماتیک محدوده‌ی محاسباتی با اسامی هر یک از مرزها

طبق نتایج آزمایشگاهی حداکثر عمق و ارتفاع آبشستگی بعد از ۳۰ ثانیه از آغاز فرسایش بوده و پس از آن تغییرات ایجاد شده در پروفیل بستر ناچیز می‌باشد. در شکل ۴-۵ پروفیل بستر به دست آمده از نتایج عددی با دو مدل برخورد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Gruber بعد از گذشت زمان ۳۰ ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو مدل عددی عمق آبشستگی را کمتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آورده و مدل برخورد تصادفی اگرچه ارتفاع برآمدگی را همانند نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده اما در راستای محور طولی اختلاف فاز بین محل حداکثر ارتفاع برآمدگی دیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود مدل کروی نرم ارتفاع برآمدگی را کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده اما محل حداکثر ارتفاع برآمدگی با نتایج آزمایشگاهی دارای تطابق مناسبی می‌باشد. اختلاف نتایج دو مدل عددی و تحقیق آزمایشگاهی با معیار درصد خطای مطلق کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد. اما نکته‌ی قابل‌تأمل هزینه‌ی محاسباتی دو مدل بوده که روش برخورد تصادفی به دلیل اینکه حالات کمتری از برخورد را در نظر می‌گیرد، زمان اجرای کمتری را نسبت به روش کروی نرم به خود اختصاص می‌دهد. در نمونه‌ی بررسی شده، هزینه‌ی محاسباتی مدل برخورد تصادفی حدود یک‌پنجم زمان اجرای برنامه با مدل کروی نرم بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدل برخورد تصادفی به دلیل هزینه‌ی محاسباتی کمتر نسبت به مدل کروی نرم ارجحیت دارد.



شکل ۴-۵ مقایسه‌ی پروفیل آبخستگی بین نتایج دو مدل برخورد و نتایج آزمایشگاهی Gruber

شکل کیفی آبخستگی ذرات در پایین‌دست سرریز، پس از هفت ثانیه با استفاده از مدل برخورد تصادفی و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل شکل گرفته توسط ذرات رسوب در مدل عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی بوده و در اثر نیروی وارده از طرف سیال به ذرات تعدادی از آن‌ها در پای سرریز حرکت کرده و به سمت پایین‌دست منتقل می‌شوند.



(ب)

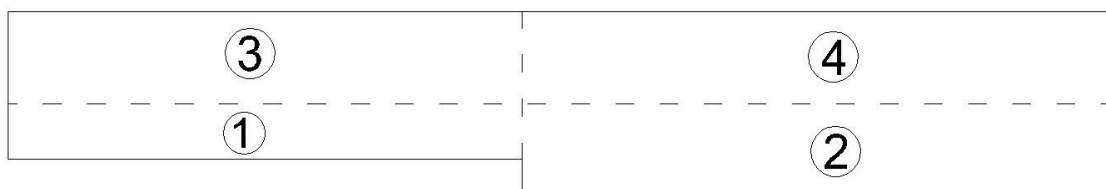
(الف)

شکل ۴-۶ مقایسه نتایج آبخستگی پای سرریز (الف) نتایج آزمایشگاهی (ب) شبیه‌سازی عددی

۴-۴- بررسی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی و همگرایی

استقلال و عدم وابستگی حل به شبکه محاسباتی در هر مطالعه‌ی عدد باید مورد بحث و بررسی قرار گیرد. اگرچه با کاهش ابعاد شبکه و افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی دقت حل بالاتر رفته اما هزینه‌ی محاسباتی بیشتری را به مسئله تحمیل می‌کند. بنابراین ابعاد شبکه بهینه برای هر مسئله، ابعادی است که علاوه بر دقت، زمان محاسبات مناسبی را در اختیار کاربر قرار دهد.

برای این منظور مدل‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب انتخاب و بررسی ابعاد مختلف شبکه‌بندی روی نتایج و زمان محاسبات مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۴-۷). هندسه‌ی مسئله به چهار ناحیه تقسیم بندی شده که علت انتخاب این نواحی تغییرات سرعت در هر ناحیه می‌باشد. برای مثال در نزدیکی بستر که تغییرات سرعت بیشتر بوده طبیعتاً باید از شبکه ریزتری نسبت به فواصل دور از بستر استفاده نمود. همچنین بعد از مرز ورودی ابتدا جریان در نواحی ۱ و ۳ توسعه پیدا کرده و سپس در نواحی ۲ و ۴ وارد اندرکنش با ذرات رسوب می‌شود. از آنجایی که سیال در برخورد با ذرات رسوب سبب حرکت آن‌ها می‌شود، بنابراین منطقی است در این نواحی شبکه‌بندی ریزتر بوده تا محاسبه نیروهای ذرات رسوب از دقت بالاتری برخوردار باشد.



شکل ۴-۷ نمایی از تقسیم‌بندی میدان حل به نواحی چهارگانه

برای بررسی تغییر اندازه‌ی شبکه روی دقت نتایج ۶ شبکه‌ی متفاوت انتخاب شده که جزئیات آن در جدول ۴-۱ ذکر شده است. ابعاد سلول‌ها در چهار ناحیه متفاوت بوده و محدوده تغییرات اندازه‌ی سلول‌ها بین ۰.۰۲ تا ۰.۰۱ متر می‌باشد.

جدول ۴-۱ جزئیات انواع شبکه‌های انتخابی جهت بررسی دقت شبکه

تعداد کل سلول‌ها	ابعاد سلول در هر ناحیه				نام شبکه‌بندی
	ناحیه ۴	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱	
18000	0.005x0.01	0.01x0.01	0.005x0.005	0.01x0.005	M1
49594	0.003x0.006	0.006x0.006	0.003x0.003	0.006x0.003	M2
72500	0.0025x0.005	0.005x0.005	0.0025x0.0025	0.005x0.0025	M3
112500	0.002x0.004	0.004x0.004	0.002x0.002	0.004x0.002	M4
198927	0.0015x0.003	0.003x0.003	0.0015x0.0015	0.003x0.0015	M5
450000	0.001x0.002	0.002x0.002	0.001x0.001	0.002x0.001	M6

شرایط مرزی سرعت برای جداره‌ها به صورت عدم لغزش، شرایط مرزی سرعت برای صفحه بالا و فشار برای کلیه صفحات به صورت گرادیان صفر، شرایط مرزی جداره‌ها برای پارامترهای آشفتگی به صورت توابع دیوار برای مرز بالا به صورت گرادیان صفر اعمال گردید. گام زمانی اولیه برابر ۰.۰۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده و بقیه پارامترهای تأثیرگذار بر حل، به صورت یکسان به همگی شبکه‌ها اعمال شده است. جزئیات بیشتر مدل‌سازی در بخش مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است.

تغییرات پارامتر شیلدز بحرانی ذرات رسوب در رژیم بستر زبر با بستر افقی در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی دقت حل افزایش پیدا کرده اما بین شبکه‌های M5 و M6 تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود. با توجه به اینکه زمان اجرای مدل با شبکه‌بندی M6 تقریباً دو برابر زمان اجرای مدل با شبکه‌بندی M5 می‌باشد، شبکه‌بندی M5 در ادامه به عنوان ابعاد بهینه برای مسائل مشابه انتخاب می‌شود.

جدول ۴-۲ نتایج شیلدز بحرانی ذرات رسوب برای شبکه‌بندی‌های مختلف

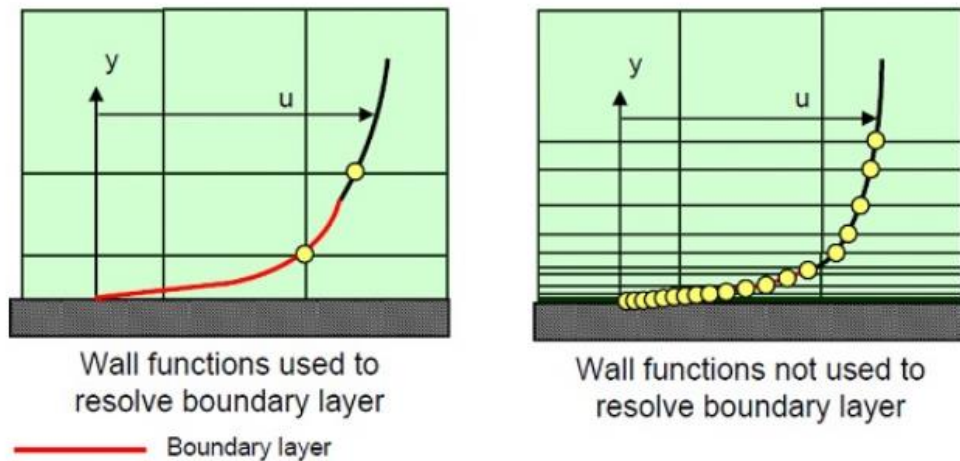
نام شبکه	مقدار شیلدز بحرانی در رژیم بستر زبر
M1	۰.۰۱۸۵
M2	۰.۰۳۱۲
M3	۰.۰۳۸۵
M4	۰.۰۴۰۲
M5	۰.۰۴۱۳
M6	۰.۰۴۱۸

در غالب روش‌های تحلیل جریان آشفته برای اعداد رینولدز بالا، استفاده از توابع دیواره می‌تواند حجم محاسبات را کاهش داده و هم‌زمان باعث افزایش دقت حل گردد. چون در ناحیه‌ی نزدیک به دیواره در جریان‌های رینولدز بالا، جریان تحت تأثیر لزجت می‌باشد، متغیرهای حل به سرعت در حال تغییر بوده و به همین دلیل احتیاجی به حل و شبیه‌سازی آن‌ها وجود ندارد. اما برای مسائل با رینولدز پایین، استفاده از توابع دیواره توصیه نمی‌شود و بایستی از روش مدل کردن نزدیک دیواره استفاده نمود. در پژوهش حاضر نیز که عدد رینولدز بالا بوده به جای استفاده از شبکه‌بندی ریز و غیریکنواخت در نزدیکی بستر و مرز جامد از توابع دیوار آماده نرم‌افزار استفاده گردید. این موضوع سبب می‌گردد به جای حل عددی جریان در نزدیکی بستر با تقریب پروفیل سرعت به صورت یک تابع هزینه‌ی محاسباتی بسیار کاهش پیدا کند (شکل ۴-۸).

روند حل محاسبات در یک حل تحلیلی این‌گونه است که یک معادله حل می‌شود و در نهایت جواب آن به صورت صریح به دست می‌آید. اما حل عددی در دینامیک سیالات محاسباتی، شامل یک الگوی تکرارپذیر^۱ است. در این روند تکرارپذیر، ابتدا معادلات با یک حدس اولیه حل شده و در ادامه حل انجام شده در مرحله‌ی اول به عنوان حدس اولیه در مرحله دوم در نظر گرفته می‌شود و معادلات مجدداً تکرار می‌شوند. روند بیان شده تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تفاوت پاسخ مسئله در یک مرحله و مرحله‌ی قبل از آن، کمتر از مقدار خطای مورد نظر باشد. در واقع در محاسبات دینامیک سیالات

1 Iterative Scheme

محاسباتی، یک مقدار خطا یا باقی‌مانده تعیین می‌شود و زمانی که تفاوت پاسخ در یک مرحله و مرحله قبل، از این مقدار کمتر باشد، حل مورد نظر همگرا شده و محاسبات متوقف می‌شوند.

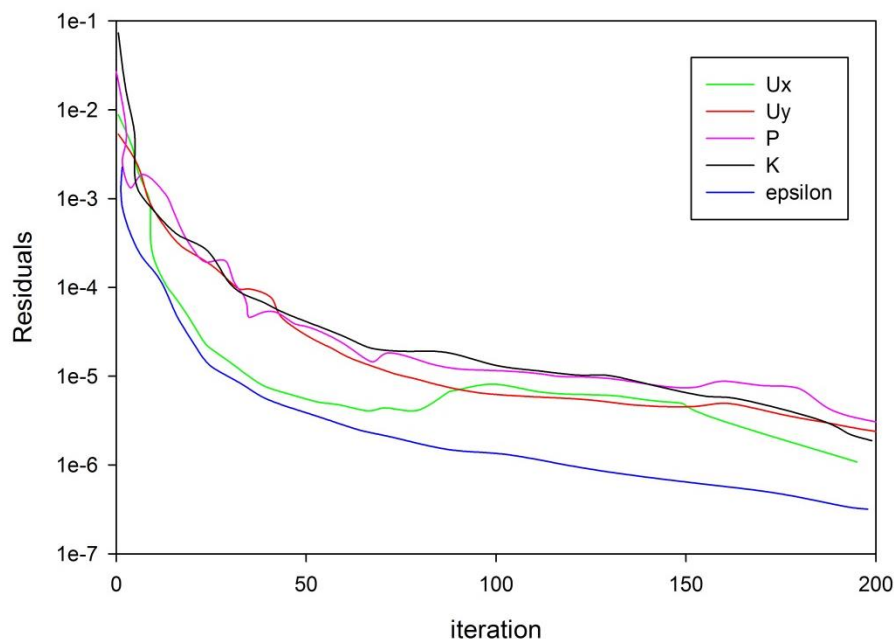


شکل ۴-۸ نحوه استفاده از توابع دیوار به عنوان جایگزین حل عددی

برای بررسی روند همگرایی حل عددی در مدل اجرا شده باقی‌مانده پارامترهای مختلف مسئله شامل سرعت در دو افقی و عمودی، فشار، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آشفتگی در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد پارامترهای مورد بررسی همگرا گردیده و بعد از چندین تکرار سعی و خطا متوقف گردیده است. لازم به ذکر است در اجرای اصلی مقدار باقی‌مانده برای پارامترهای مختلف برابر 10^{-5} در نظر گرفته شده است.

۴-۵- صحت‌سنجی مدل عددی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر گردید برای مدل‌سازی از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM استفاده گردید. برای استفاده از مدل حاضر، ابتدا باید پارامترهای مختلف مسئله از جمله سرعت جریان و نیروهای وارد بر ذرات رسوب مورد بررسی قرار گرفته تا صحت عملکرد کد در دسترس مورد تأیید قرار بگیرد. برای این منظور دو مسئله که دارای حل تحلیلی و آزمایشگاهی بوده انتخاب شده و سرعت جریان و نیروهای وارد بر ذرات رسوب مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه تشریح می‌شوند. لازم به ذکر است در بخش‌های بعدی نیز جهش و غلتش یک ذره رسوب و همچنین آستانه حرکت گروهی ذرات نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.



شکل ۴-۹ بررسی همگرایی پارامترهای مختلف مسئله

۴-۵-۱- مدل سازی پروفیل سرعت جریان آشفته روی بستر زبر

سرعت جریان در یک مقطع کانال معمولاً از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر تغییر می‌کند. این امر ناشی از تنش برشی در کف و دیواره‌های کناری کانال و به علت وجود سطح آزاد جریان می‌باشد. توزیع سرعت در مقطع کانال به عواملی مانند چگالی و لزجت سیال، شکل مقطع، زبری دیواره‌های کانال و وجود انحنا در مسیر کانال بستگی دارد. به بستری که سطح آن از ناهمواری‌های منظم و یا نامنظم تشکیل شده است، بستر زبر گفته می‌شود. زبری سطوح به صورت موضعی، به افزایش تلاطم در نزدیکی دیواره و در نتیجه افزایش تنش برشی دیواره منتهی می‌شود. همچنین میزان سرعت میانگین با افزایش در مقدار زبری دیواره‌ها کاهش می‌یابد. در مورد نحوه تغییرات سرعت و تنش برشی مرزی می‌توان گفت که تنش برشی مرزی و سرعت میانگین با یکدیگر نسبت معکوس دارند. به گونه‌ای که افزایش یکی از این دو پارامتر منجر به کاهش پارامتر دیگر می‌شود. در جریان کانال‌های روباز، بستر رودخانه یا کانال معمولاً زیر هیدرولیکی بوده و جریان متلاطم توسعه یافته می‌باشد. توزیع سرعت شناخته شده‌ای برای جریان کانال‌های روباز مانند قانون توانی و قانون توزیع سرعت ون کارمن-پرانتل وجود دارد. این پروفیل‌ها توزیع سرعت را در آنچه که سرعت به صورت یکنواخت با فاصله عمودی افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. البته در واقعیت به دلیل وجود مقاومت هوا و اثر آن روی جریان ماکزیمم سرعت اغلب زیر سطح آب اتفاق می‌افتد.

برای ایجاد شرایط بستر کاملاً زبر باید رابطه‌ی $K_s^+ > 70$ برقرار باشد که در آن عدد رینولدز زبری به صورت $K_s^+ = \frac{K_s u_*}{\nu}$ تعریف شده و K_s زبری معادل است. در این حالت افزایش بیشتری در مقاومت موجود در مقابل جریان مشاهده شده و میزان وابستگی ضریب اصطکاک به عدد رینولدز متوسط جریان به طور کامل از بین رفته و ضریب اصطکاک تنها تابعی از زبری نسبی خواهد شد. تشکیل این رژیم از جریان مختص مواقعی است که ارتفاع عناصر زبری بسیار بزرگتر از مجموع ضخامت زیرلایه لزج و ناحیه‌ی حائل باشد. در این رژیم، مقاومت در مقابل جریان عمدتاً به واسطه پسای شکلی ناشی از حضور برجستگی زبری‌ها در مسیر جریان است. با تعریف $u^+ = \frac{u_*}{u}$ پروفیل سرعت روی یک بستر زبر با استفاده از معادله‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{K_s} \right) + 8.5 \quad 10-4$$

سرعت برشی در بستر زبر و ضریب اصطکاک پوسته‌ای از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند [۵۸]:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = U \sqrt{C_f} \quad 11-4$$

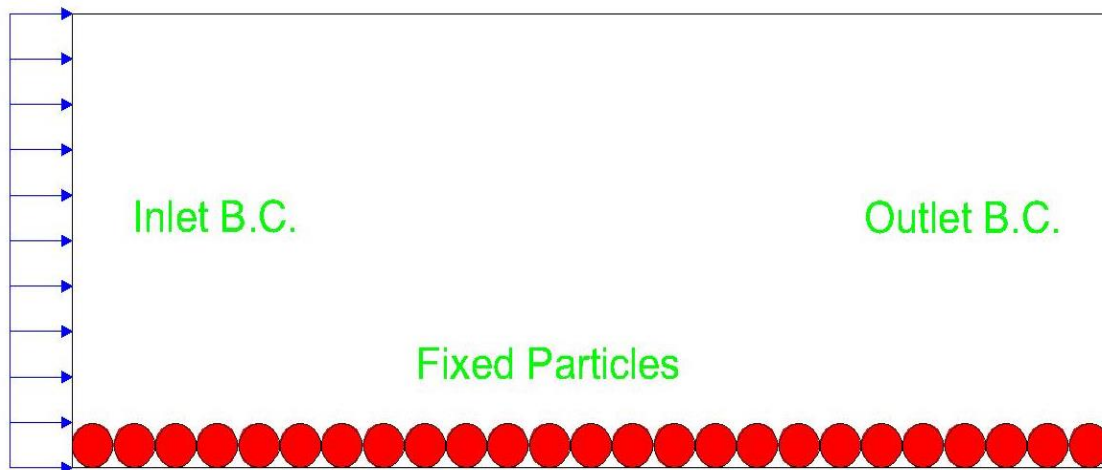
$$C_f^{-0.5} = \frac{1}{k} \ln \left(11 \frac{H}{K_s} \right) \quad 12-4$$

که در این روابط H عمق جریان و ضریب k ثابت ون کارمن بوده و برابر 0.41 می‌باشد. برای مدل‌سازی عددی به صورت دوبعدی از یک باکس مستطیلی استفاده گردید. سرعت در مرز ورودی به صورت یک عدد ثابت بوده و در مرز جامد به نحوی اعمال گردیده که شرایط عدم لغزش ارضا شود. فشار نیز به صورت مقدار ثابت صفر در مرز خروجی و گرادیان صفر در بقیه مرزها به کار گرفته شده است. شروط مرزی مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آشفتگی نیز برای ورودی برابر مقدار ثابت و برای بقیه مرزها برابر گرادیان صفر منظور شده است.

مش‌بندی برای نواحی نزدیک به مرز جامد که تغییرات سرعت بیشتر است، ریزتر بوده و برای نواحی دورتر از مش بزرگ‌تری استفاده گردیده است. گام زمانی نیز به صورت متغیر در نظر گرفته شده است، به این معنا که در فرایند حل با توجه به حداکثر سرعت در دامنه‌ی حل، گام زمانی در مرحله بعد به صورتی تعیین می‌گردد که شرط عدد کورانت کوچک‌تر از یک ارضا شود.

برای ایجاد عناصر زبری در برابر جریان از ذرات لاگرانژی که به صورت ثابت در انتهای بستر قرار دارند، استفاده شده است (شکل ۴-۱۰). این ذرات به شکل دایره بوده و در محیط فاز پیوسته قرار گرفته و معادلات حرکت برای آن‌ها حل می‌گردد. در این مسئله‌ی خاص موقعیت ذرات در هر گام

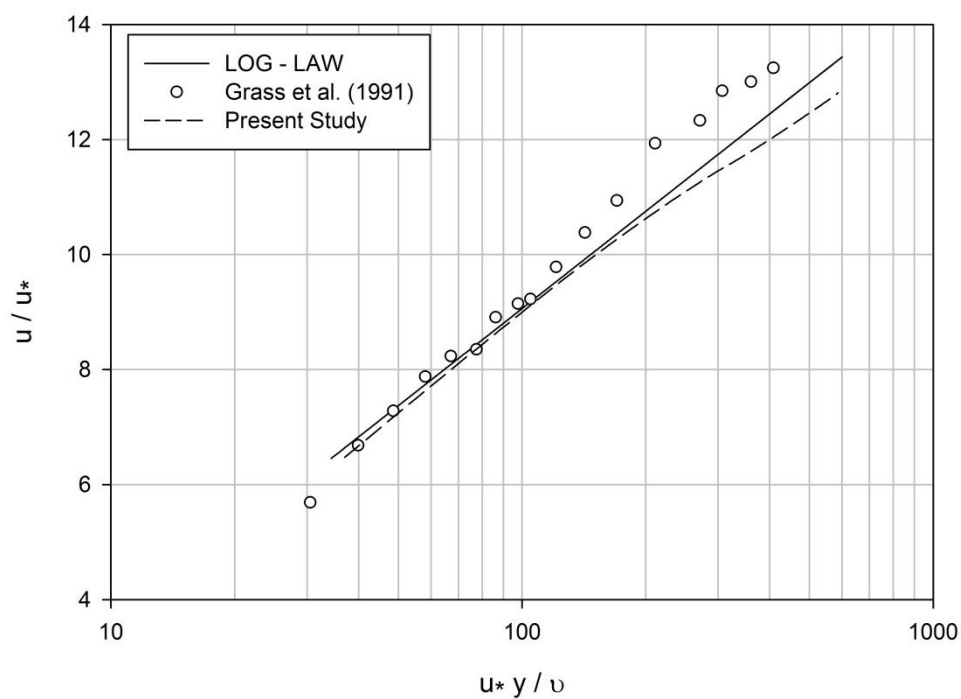
زمانی ثابت نگه داشته شده و اثر ذرات روی سیال به صورت وجود یک ترم اضافی در معادله ناویراستوکس دیده می شود. مطالعات انجام شده در گذشته نشان می دهد که زبری معادل ضربی از قطر ذرات متغیر بوده [۵۹] و در این مطالعه برابر یک در نظر گرفته شده است.



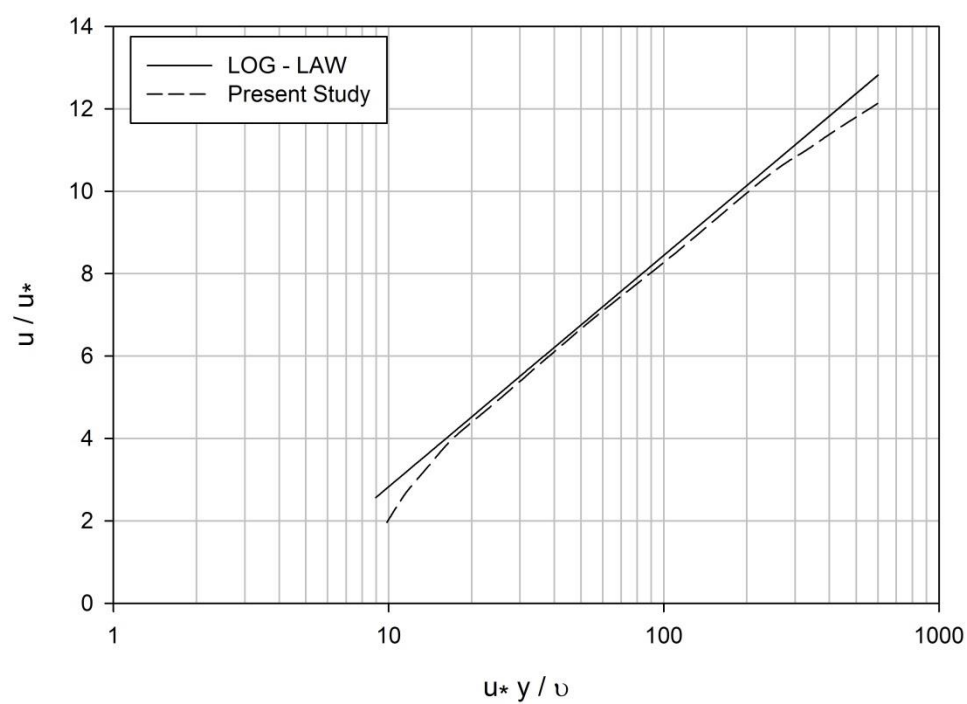
شکل ۴-۱۰ شماتیک هندسه مدل سازی شده

مقایسه نتایج عددی به دست آمده برای سه رینولدز زبری ۷۹، ۱۰۰ و ۲۸۸ در شکل ۴-۱۱ تا شکل ۴-۱۳ نشان داده است. این نتایج در همه رینولدزهای زبری با پروفیل سرعت لگاریتمی و برای رینولدز زبری ۷۹ با نتایج آزمایشگاهی Grass و همکاران [۶۰] و برای رینولدز زبری ۲۸۸ با نتایج Defina [۶۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین در شکل ۴-۱۴ برای زبری ۷۴.۵ پروفیل سرعت مدل عددی با نتایج Grass و همکاران [۶۲] نشان داده شده است. پروفیل سرعت های نشان داده مربوط به سرعت جریان در وسط کانال و بعد از شکل گیری کامل لایه ی مرزی و توسعه یافتگی جریان می باشد. همان طور که مشاهده می شود تطابق مناسبی بین نتایج برقرار بوده و بیشترین خطا مربوط به نزدیکی بستر و یا سطح جریان می باشد.

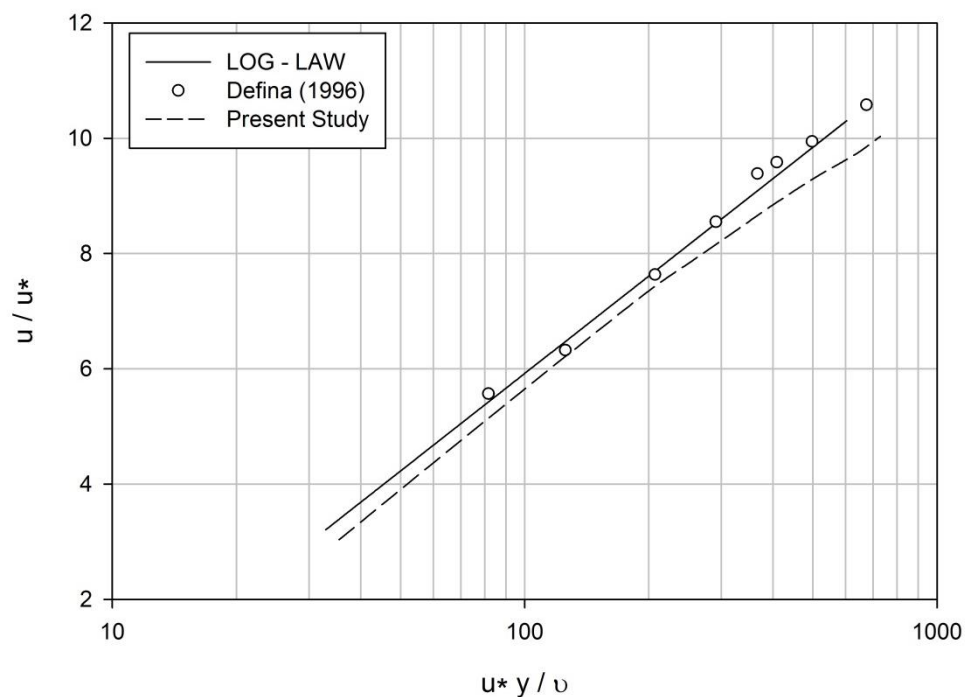
به دلیل تغییرات زیاد سرعت در نزدیکی دیواره برای به دست آوردن نتایج دقیق تر باید از مش های ریزتری استفاده نمود که هزینه های محاسباتی بیشتری را در پی دارد. همچنین از مقایسه پروفیل های به دست آمده در زبری های مختلف می توان دریافت که با افزایش زبری بستر و در نتیجه مقاومت جریان، مومنوم کاهش پیدا کرده و سرعت جریان در نزدیکی مرز کاهش می یابد. مقدار خطای مطلق بین داده های عددی و نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در همه ی زبری های نسبی گفته شده زیر ۸ درصد می باشد.



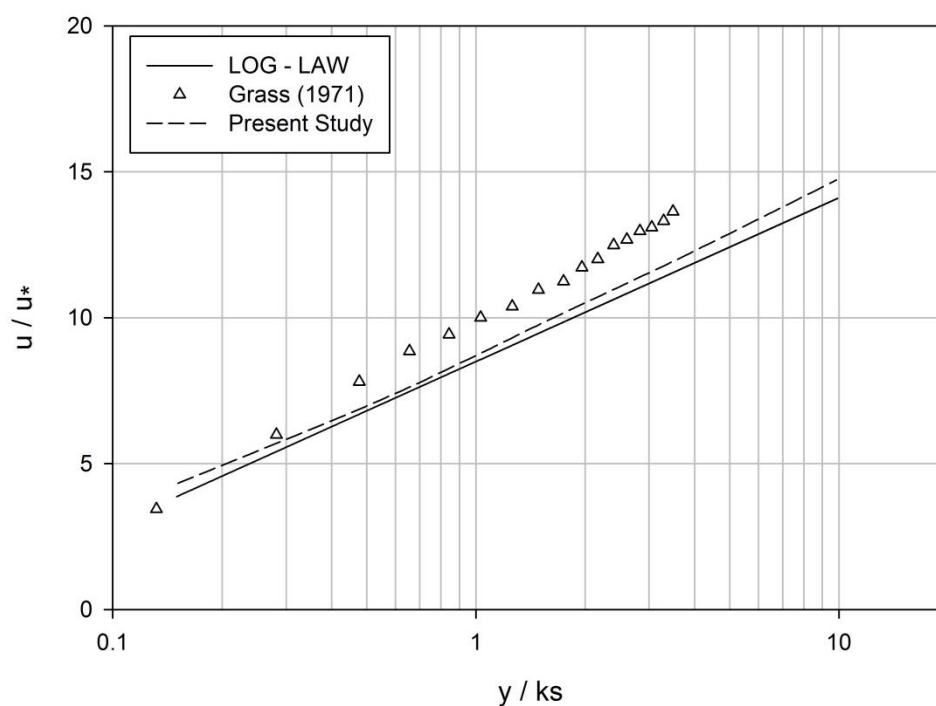
شکل ۴-۱۱ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۷۹



شکل ۴-۱۲ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی و نتایج تحلیلی در زبری نسبی ۱۰۰



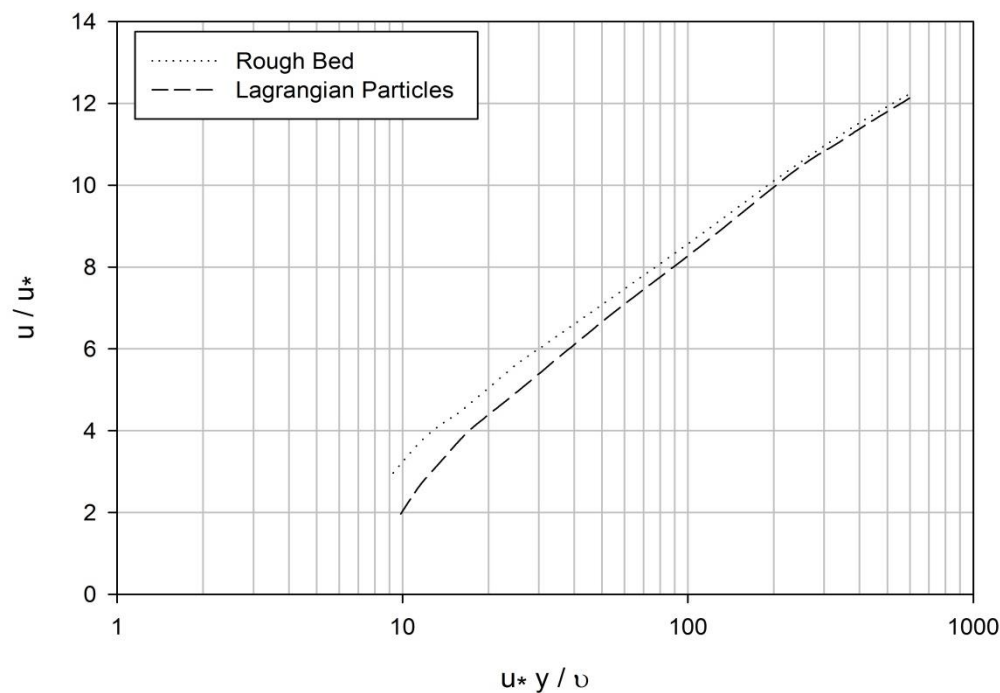
شکل ۴-۱۳ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۲۸۸



شکل ۴-۱۴ مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۷۴.۵

در ادامه جهت بررسی کوپلینگ یک طرفه در مدل مذکور به جای استفاده از ذرات لاگرانژی به عنوان عناصر زبری، از بستر به صورت دندانهای استفاده و نتایج دو حالت در رینولدز نسبی ۱۰۰ با یکدیگر

مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده نتایج اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و عمده در اختلاف دو نمودار در نزدیکی بستر می‌باشد. علت تفاوت در پروفیل دو سرعت، استفاده از رابطه‌ی ۳-۷۲ بوده که با کوچک شدن شبکه‌ی حل و افزایش هزینه‌های محاسباتی این دو نمودار به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند.



شکل ۴-۱۵ مقایسه‌ی پروفیل سرعت در دو حالت استفاده از بستر زبر و ذرات لاگرانژی در زبری نسبی ۱۰۰

۴-۵-۲- مدل‌سازی سرعت سقوط یک ذره در سیال ساکن

برای صحت‌سنجی نیروهای وارد بر ذره در کد حاضر از مسئله سقوط یک ذره لاگرانژی در یک سیال ساکن استفاده گردید. نیروهای وارد بر ذره در این مسئله شامل نیروی درگ، نیروی شناوری و نیروی ثقل هستند. سیال به محض رها شدن به دلیل تغییر سرعت دارای شتاب بوده و پس از طی مسافتی به حالت تعادل رسیده و سرعت حدی آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$V_s = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho_w)V_p}{C_D \rho_w A_p}} \quad ۴-۱۳$$

که در این رابطه V_s سرعت سقوط ذره، g شتاب ثقل، ρ_p چگالی ذره، ρ_w چگالی سیال، V_p حجم ذره، A_p سطح مقطع عرضی ذره و C_D ضریب درگ ذره می‌باشد که وابسته به شکل ذره و عدد

رینولدز می‌باشد. عدد رینولدز برای یک ذره کروی و ضریب درگ به‌صورت معادلات زیر تعریف می‌گردند:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad 14-4$$

$$Re = \frac{V_s d}{\nu} \quad 15-4$$

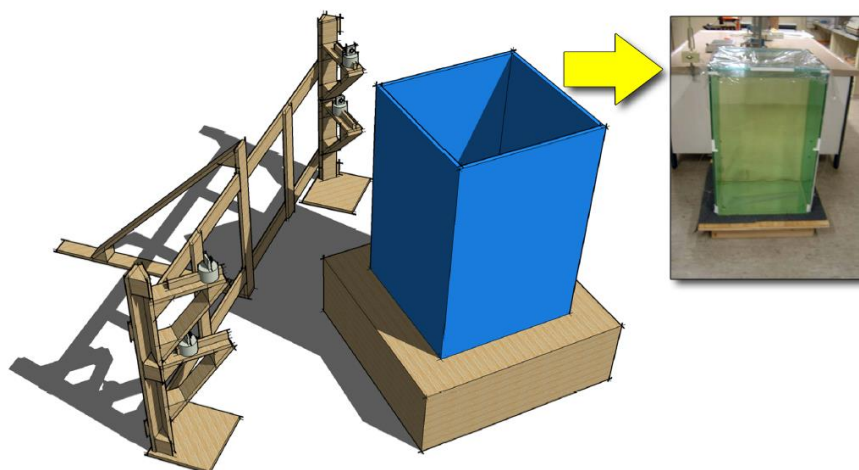
که در آن d قطر ذره و ν ویسکوزیته سینماتیک سیال می‌باشد. برای ذره‌ی کروی شکل رابطه‌ی سرعت سقوط ذره به‌صورت زیر ساده می‌گردد [۶۳]:

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g(\rho_p - \rho_w)d}{C_D \rho_w}} \quad 16-4$$

برای ساخت هندسه مدل و ویژگی‌های سیال از پژوهش آزمایشگاهی Ando و همکاران کمک گرفته شد [۶۴] و در نهایت نتایج به‌دست آمده با سرعت تئوری و نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه گرفت. مخزن حاوی سیال یک مکعب مستطیل با طول و عرض ۶۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر بوده و سیال موردنظر گلیسیرین با چگالی ۱۲۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته ۱.۴۱۲ پاسکال ثانیه می‌باشد. سه ذره با قطر و چگالی مختلف در نظر مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات آن در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. شکل ۱۶-۴ نیز نمونه آزمایشگاهی مخزن موردنظر را نشان می‌دهد.

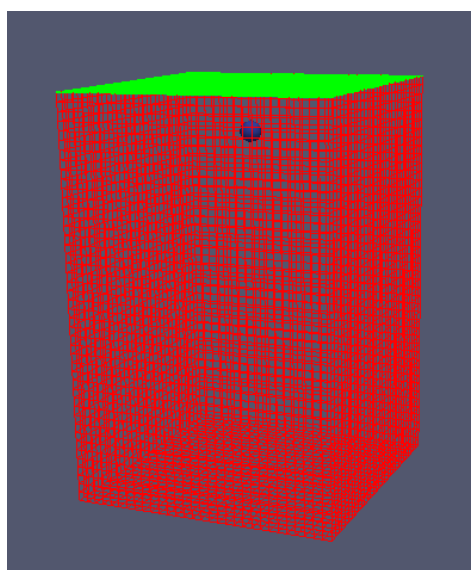
جدول ۳-۴ مشخصات ذرات مورد استفاده در آزمایش

ذره	قطر (m)	چگالی (kg/m ³)	وزن (kg)
۱	۰.۰۴۹۸	۱۷۰۴.۸۷	۰.۱۱۰
۲	۰.۰۵۹۸	۱۷۳۳.۸۵	۰.۱۹۴
۳	۰.۰۶۹۸	۱۷۵۸.۱۲	۰.۳۱۳



شکل ۴-۱۶ شماتیک مخزن مورد آزمایش و مخزن واقعی حاوی گلیسیرین [64]

برای مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenFOAM ابتدا هندسه موردنظر مطابق نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و با قابلیت blockMesh حجم موردنظر مش‌بندی گردید. سپس ذره در ۱۰ سانتی‌متری سطح آب قرار داده تا در زمان صفر رها شده و تحت اثر وزن خود در سیال سقوط کند. نیروهای وارد بر ذره شامل درگ، شناوری و وزن ذره بوده که ابتدا با توجه به مشخصات جریان محاسبه شده و طبق قانون دوم نیوتن به ذره اعمال می‌گردد. شرایط مرزی سرعت برای جدارها به صورت عدم لغزش، شرایط مرزی سرعت برای صفحه بالا و فشار برای کلیه صفحات به صورت گرادیان صفر، شرایط مرزی جدارها برای پارامترهای آشفتگی به صورت توابع دیوار برای مرز بالا به صورت گرادیان صفر اعمال گردید. شکل ۴-۱۷ هندسه، مش‌بندی و موقعیت ذره را درون سیال نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ هندسه، مش‌بندی و موقعیت ذره مدل شده در نرم‌افزار

مقادیر سرعت حدی به دست آمده و مقایسه آن‌ها با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در جدول ۴-۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند درصد خطا در محدوده قابل قبول بوده و نتایج اختلاف قابل ملاحظه‌ای با هم ندارند.

جدول ۴-۴ سرعت حدی به دست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

شماره ذره	نتایج آزمایشگاهی [64]		حل تحلیلی		سرعت مدل
	سرعت (mm/s)	درصد خطا	سرعت (mm/s)	درصد خطا	عددی (mm/s)
۱	۲۲۰.۶۸	۲.۵۷	۲۶۵.۹۷	۱۴.۹۰	۲۲۶.۳۵
۲	۳۰۹.۸۲	۸.۷۰	۳۵۸.۸۷	۶.۱۵	۳۳۶.۷۸
۳	۳۹۰.۲۱	۱۰.۶۰	۴۵۲.۹۰	۴.۷۱	۴۳۱.۵۷

۴-۶- شبیه‌سازی غلتش یک ذره رسوب

پس از آن که سرعت جریان به تدریج زیاد شده و به حد آستانه حرکت می‌رسد، شرایط برای حرکت ذره مهیا می‌گردد. با افزایش اندکی در سرعت جریان ذره رسوب شروع به حرکت نموده و با گرفتن مومنتوم لازم برای حرکت با غلتش و لغزش مسیر خود را طی می‌کند. در طی این مسیر ذره با ذرات دیگر یا ذرات بستر برخورد نموده و بخشی از مومنتوم خود را از دست داده و یا در برخی موارد از این برخوردها مومنتوم دریافت نموده که سبب تسریع در حرکت ذرات رسوب می‌شود. با افزایش تدریجی جریان سرعت غلتش ذره نیز افزایش یافته و با سرعت و مقدار چرخش بیشتری به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حالات رژیم حرکتی ذره، چرخش خالص بوده و این روند می‌تواند تا جایی ادامه پیدا کند که ذره رسوب به آستانه جهش برسد. به این معنی که مقدار دبی جریان تا جایی افزایش یابد که ذره به حالت جهش رسیده و بعد از آن حرکت جریان رسوبی ترکیبی از غلتش و جهش ذرات باشد.

۴-۶-۱- مدل‌سازی مسیر غلتش

برای مدل‌سازی غلتش یک ذره رسوب و مقایسه‌ی نتایج، از اطلاعات اندازه‌گیری شده Ancey و همکاران استفاده شده است [۶۵]. این محققین غلتش دوبعدی یک ذره رسوب را درون جریان آب کم‌عمق با شیب تند آزمایشگاهی و حل تحلیلی با دو تئوری مورد بررسی قرار داده‌اند. اولین تئوری شامل استفاده از موازنه انرژی متوسط سینماتیکی برای به دست آوردن سرعت متوسط ذره بوده و در

دومین تئوری حالات مختلف حرکت ذره به صورت تصادفی مورد بررسی قرار گرفته که از زنجیره مارکوف بهره گرفته‌اند.

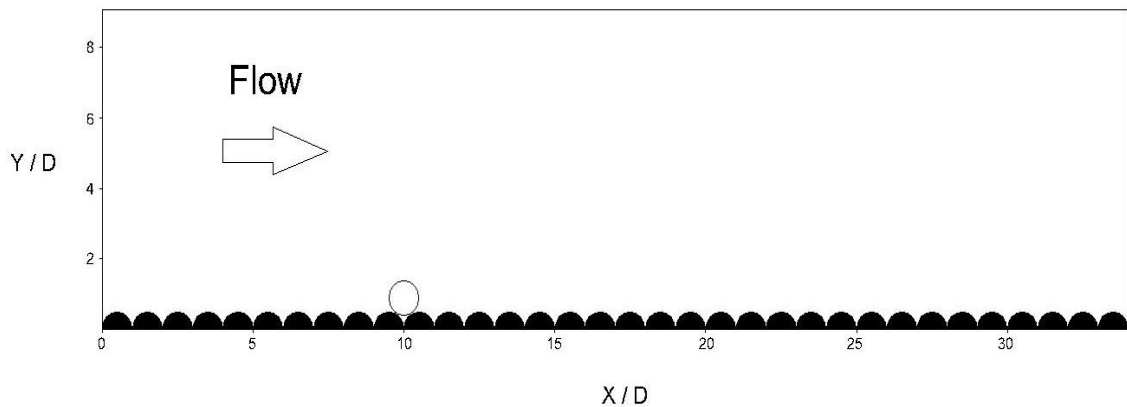
در تحقیق مذکور از دو سری ذرات کروی شیشه‌ای و فولادی به ترتیب با چگالی ۲۵۰۰ و ۷۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطرهای ۴ و ۶ میلی‌متر استفاده شده است. آزمایش‌ها در یک کانال به طول ۲ متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر انجام شده و عرض آن طوری تنظیم شده که یک میلی‌متر بزرگ‌تر از قطر ذره بوده به طوری که حرکت ذره تقریباً دوبعدی باشد. شیب کانال آزمایشگاهی متغیر بوده و از صفر تا ۲۰ درجه تغییرپذیر بوده و عملاً بین صفر تا ۱۲ درجه محدود شده است. زبری‌های مختلفی به صورت منظم و تصادفی و با سه شعاع مختلف نیم سیلندر با مقادیر ۱.۵، ۳ و ۴ میلی‌متر استفاده شده است. پارامتر زبری به صورت نسبت شعاع ذره به اندازه زبری $\xi = a/r$ تعریف شده که a شعاع ذره و r شعاع نیم سیلندر می‌باشد.

تعداد فریم‌های عکس‌برداری دارای محدوده‌ای بین ۶۰ تا ۲۲۰ فریم در ثانیه بوده است. در مطالعه Ancey و همکاران پارامترهای مختلف شامل سرعت متوسط جریان، سرعت متوسط ذره و غیره در یک فریم به طول ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع حدوداً ۵ سانتی‌متر به دست آمده است. همچنین پروفیل‌های سرعت بدون حضور ذره و نیز با وجود ذره اندازه‌گیری و برداشت شده که مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین سرعت متوسط ذره بر حسب سرعت متوسط جریان برای ذرات مختلف ترسیم گردیده و حالات مختلف جریان بر اساس آن‌ها تحلیل شده است.

در ابتدا برای مدل‌سازی غلتش ذره رسوب قطر ذره با قطر یکسان بستر و برابر ۶ میلی‌متر و چگالی ۲۵۰۰ و ۷۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی، شبکه‌بندی و گام زمانی همانند شرایط مدل‌سازی در بخش صحت‌سنجی سرعت جریان روی بستر زبر می‌باشد. شرط مرزی ورودی برای سرعت به صورت یک تابع بر اساس زمان بوده که با افزایش زمان اجرا سرعت ورودی نیز افزایش یافته تا اینکه منجر به غلتش ذره رسوب گردد. با تعیین محدوده‌ی سرعتی که سبب غلتش ذره رسوب می‌گردد در اجزای اصلی سرعت ورودی جریان برابر این محدوده ثابت می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد در مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته طول فریم مورد استفاده برابر ۲۰ سانتی‌متر بوده در این پژوهش برای یکسان شدن نتایج همین طول انتخاب شده است. تعداد ذرات

بستر ۳۴ عدد بوده که ذره تحت تأثیر جریان روی آن‌ها غلتیده و به سمت پایین دست حرکت می‌کند (شکل ۱۸-۴).

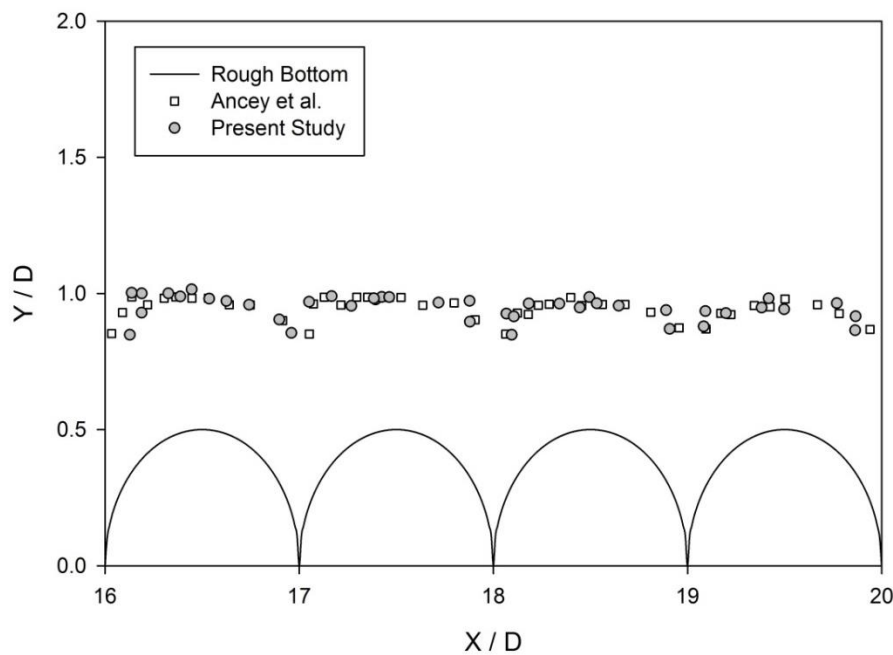


شکل ۱۸-۴ هندسه‌ی مدل‌سازی شده ذره روی بستر زبر

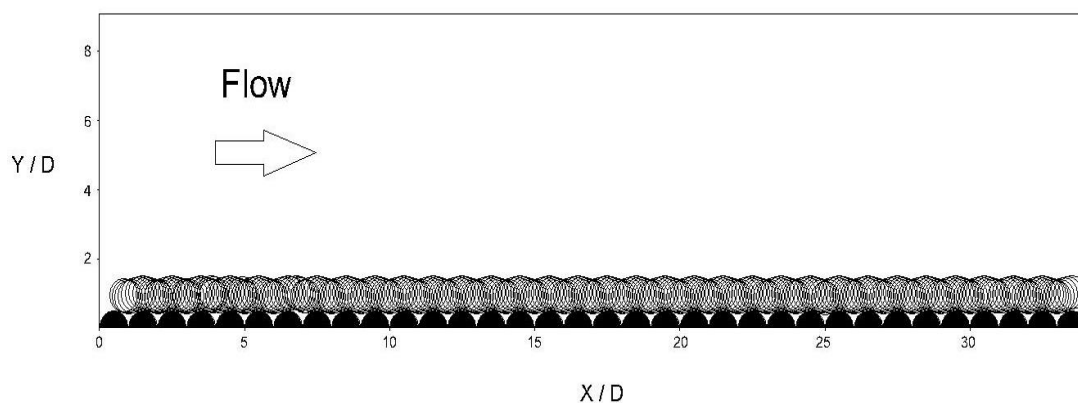
برای مقایسه‌ی نتایج غلتش مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی از مسیر اندازه‌گیری شده که در مطالعه‌ی آزمایشگاهی ارائه گردیده، بهره گرفته شده است. در این آزمایش از یک ذره‌ی فولادی به قطر ۶ میلی‌متر استفاده شده که درون جریانی با دبی در واحد عرض 0.0036 مترمربع بر ثانیه و ارتفاع جریان 8.2 میلی‌متر با شیب 5 درصد بر روی ذرات بستر به قطر 6 میلی‌متر در حال غلتش می‌باشد، قرار دارد. در این آزمایش همچنان که دیده می‌شود ذرات یکنواخت بوده و ارتفاع زبری برابر با قطر ذره در حال حرکت می‌باشد.

در شکل ۱۹-۴ مقایسه مسیر اندازه‌گیری شده در مطالعه مذکور با مسیر شبیه‌سازی شده توسط مدل حاضر ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند کلی مسیر طی شده توسط مدل حاضر به‌خوبی شبیه‌سازی شده و تطابق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد.

شکل ۲۰-۴ موقعیت ذره را در گام‌های زمانی مختلف نشان داده و همان‌طور که مشاهده می‌شود رژیم حرکتی ذره بدون اینکه از بستر جدا شود به‌صورت غلتش خالص می‌باشد. در صورتی که سرعت جریان بیشتر گردد تماس ذره‌ی متحرک با بستر کمتر شده و ذره در حالت آستانه‌ی جهش قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱۹ مقایسه مسیر اندازه‌گیری شده بین نتایج مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۴-۲۰ مراحل مختلف غلتش ذره‌ی رسوب بر روی بستر

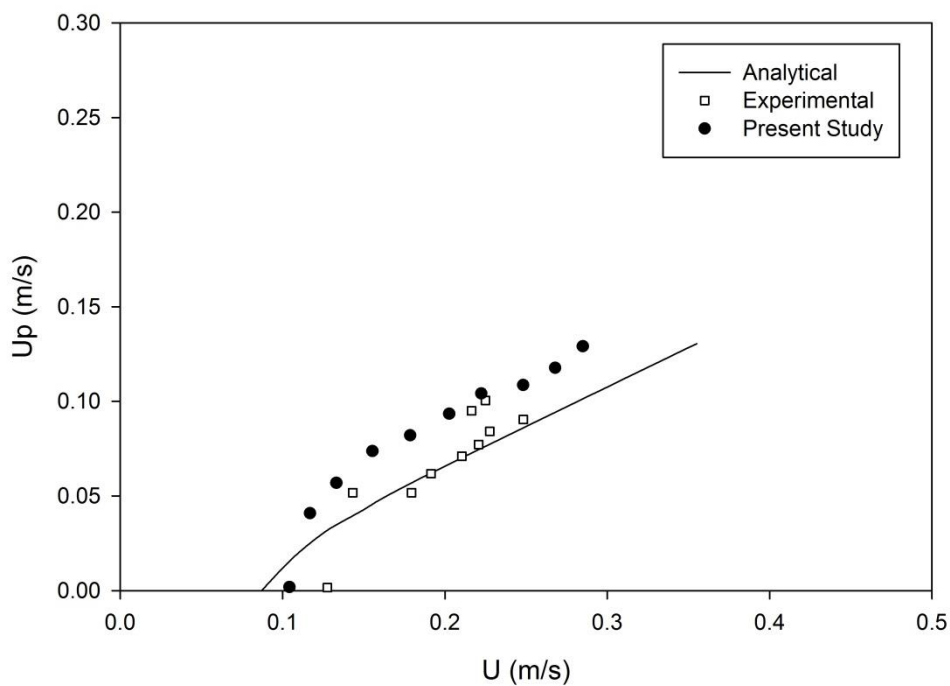
۴-۶-۲- بررسی رابطه سرعت جریان و ذره

در پژوهش صورت گرفته توسط Ancey و همکاران سرعت متوسط جریان و ذره درون یک فریم عکس‌برداری به دست آمده است. سرعت متوسط ذره از نسبت طول فریم به زمان طی کردن این طول توسط ذره محاسبه شده است. پس از محاسبه این سرعت‌ها، مقادیر آن‌ها برحسب سرعت متوسط جریان ترسیم شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. اگر در تحقیق مذکور به جای سرعت متوسط جریان از سرعت برشی استفاده می‌گردید، منطقی‌تر به نظر می‌رسید. به علت اینکه

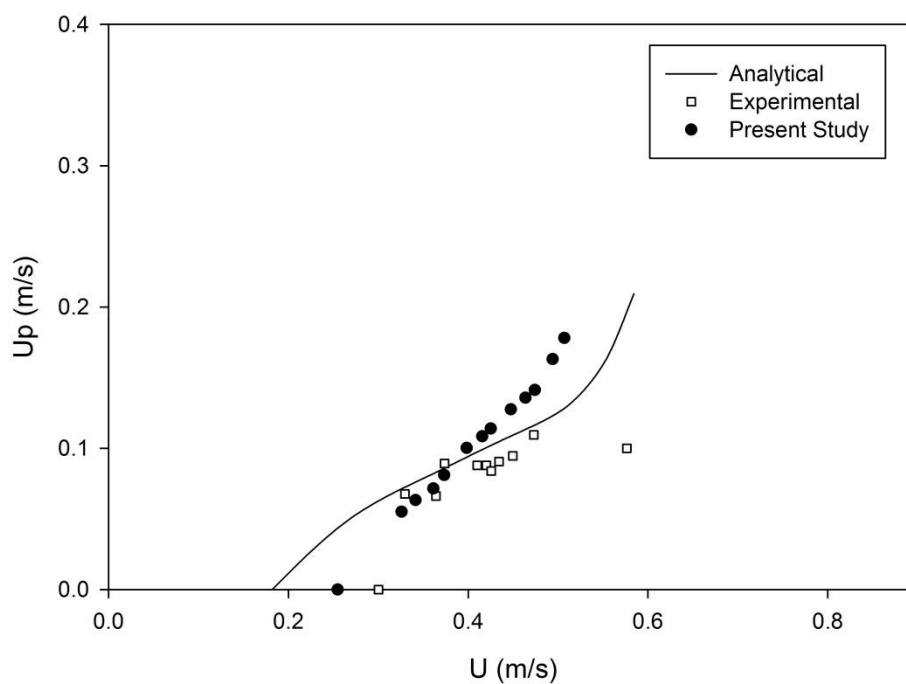
حرکت ذرات و غلتش آن‌ها در لایه نزدیک بستر اتفاق افتاده، به نظر می‌رسد که علت استفاده از سرعت متوسط جریان سهولت اندازه‌گیری آن در موقعیت‌های مختلف می‌باشد.

در شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ نتایج اندازه‌گیری شده در مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای دو ذره شیشه‌ای و فولادی نشان داده شده است. در این شکل‌ها مقادیر سرعت متوسط ذره از آستانه حرکت تا آستانه‌ی جهش ذره نشان داده شده که تغییرات آن بر حسب سرعت متوسط ورودی جریان سیال ترسیم شده است. روند تغییرات سرعت ذره نشان می‌دهد که پس از آستانه حرکت، سرعت ذره به‌طور ناگهانی افزایش یافته و سپس شیب تغییرات آن کاهش پیدا کرده و روند افزایش سرعت شکل تدریجی به خود می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که شیب افزایش سرعت ذره مخصوصاً در نتایج آزمایشگاهی یکسان نبوده و در برخی شرایط افزایش و در برخی کاهش می‌یابد که حاکی از تصادفی بودن حرکت ذره و برخوردهایی است که ذره‌ی متحرک با زبری‌های بستر داشته است. به این معنی که در برخی شرایط برخورد ذره متحرک با زبری‌های بستر باعث دریافت مومنتوم از این برخوردها توسط ذره شده و سرعت آن افزایش یافته است.

علاوه بر مطالب گفته شده می‌توان مشاهده نمود محدوده سرعت ذره‌ی شیشه‌ای در مدل عددی بین ۰.۰۴ تا ۰.۱۳ متر بر ثانیه به دست آمده و برای مقادیر بیشتر از آن ذره از حالت غلتش خارج شده و وارد فاز جهش می‌شود. سرعت ذره‌ی شیشه‌ای طبق نتایج آزمایشگاهی در محدوده‌ی ۰.۰۵ تا ۰.۱ متر بر ثانیه قرار داشته که مقادیر کمتری را نسبت به مدل عددی نشان می‌دهد. همچنین طبق نتایج مدل عددی سرعت جریان در بازه ۰.۱ تا ۰.۲۸ متر بر ثانیه سبب به وجود آمدن غلتش یک ذره‌ی شیشه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر شده و برای سرعت‌های بیشتر جریان ذره از حالت غلتش خارج می‌شود. نتایج آزمایشگاهی سرعت جریان در محدوده‌ی ۰.۱۲ تا ۰.۲۳ متر بر ثانیه را بازه‌ی موردنظر بین آستانه حرکت ذره و آستانه جهش ذره‌ی شیشه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۱ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک شیشه‌ای بر حسب سرعت متوسط جریان

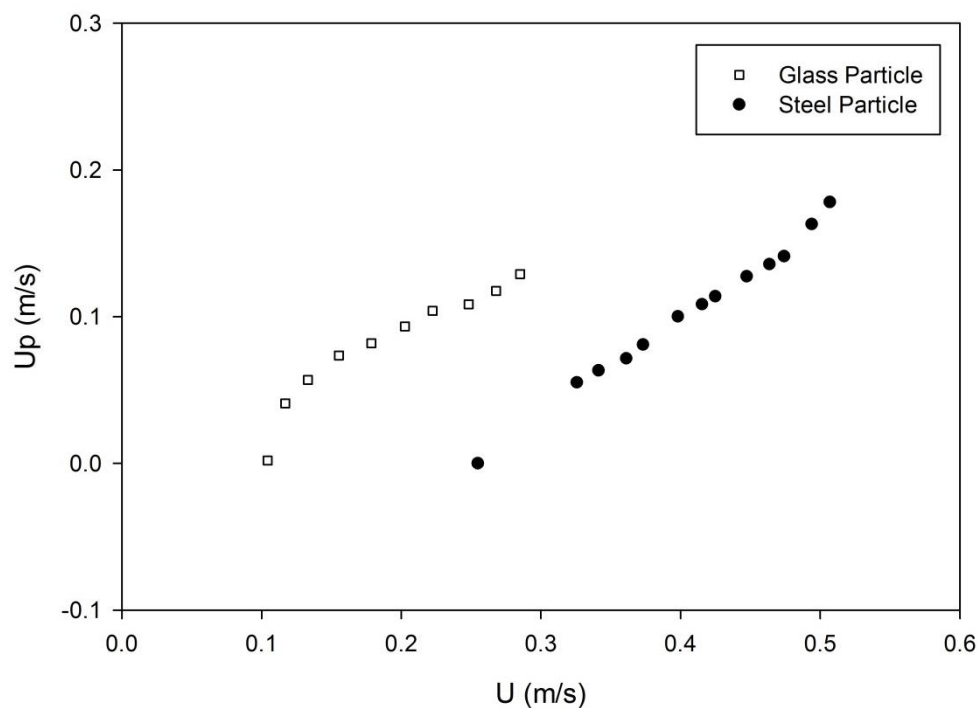


شکل ۴-۲۲ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک فولادی بر حسب سرعت متوسط جریان

برای ذره‌ی فولادی محدوده سرعت ذره طبق نتایج مدل عددی بین ۰.۰۶ تا ۰.۱۸ متر بر ثانیه بوده در حالی که نتایج آزمایشگاهی بازه‌ی بین ۰.۰۷ تا ۰.۱ را برای غلتش خالص ذره‌ی فولادی نشان می‌دهند. همچنین طبق نتایج مدل عددی سرعت جریان در بازه ۰.۳ تا ۰.۵ متر بر ثانیه سبب به

وجود آمدن غلتش یک ذره‌ی فولادی با قطر ۶ میلی‌متر شده و برای سرعت‌های بیشتر جریان ذره از حالت غلتش خارج می‌شود. نتایج آزمایشگاهی سرعت جریان در محدوده‌ی ۰.۳ تا ۰.۵۷ متر بر ثانیه را بازه‌ی موردنظر برای غلتش خالص ذره‌ی فولادی نشان می‌دهد.

شکل ۴-۲۳ نیز مقایسه‌ی نتایج مدل عددی را برای ذره‌ی فولادی و شیشه‌ای به قطر ۶ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذره فولادی به دلیل چگالی بیشتر به سرعت جریان بالاتری برای آستانه حرکت نیاز داشته و در سرعت بیشتری نسبت به ذره‌ی شیشه‌ای آستانه حرکت جهش را تجربه می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد ذره‌ی فولادی به دلیل چگالی بیشتر نسبت به ذره‌ی شیشه‌ای سرعت آستانه جهش آن حدود ۴۰ درصد بیشتر از ذره‌ی شیشه‌ای می‌باشد.

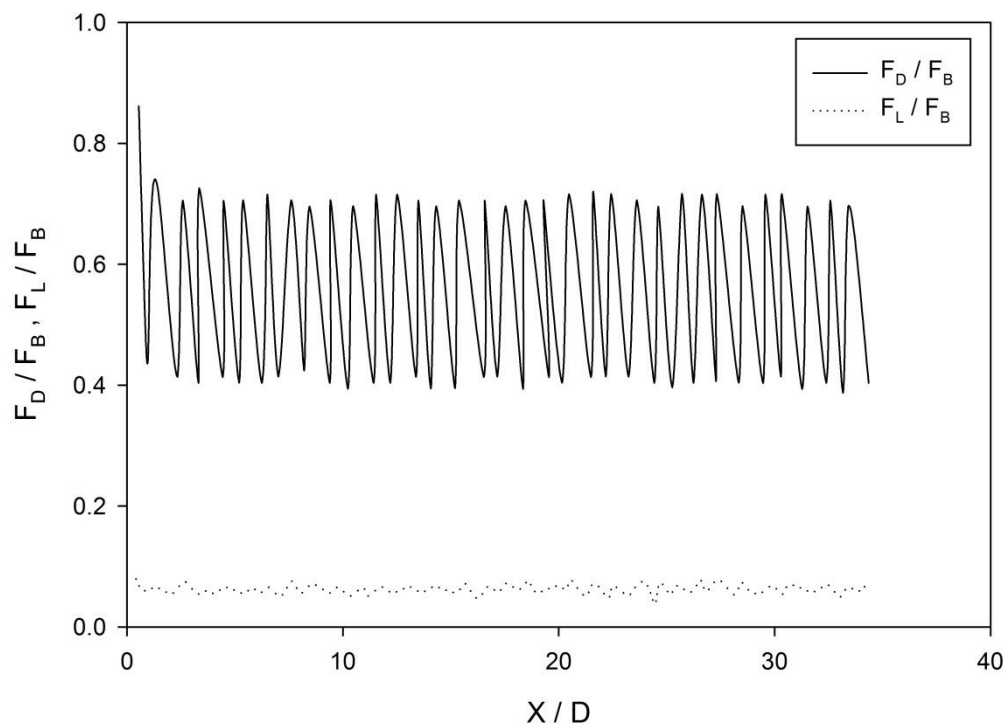


شکل ۴-۲۳ تغییرات مقادیر سرعت ذره‌ی متحرک فولادی و شیشه‌ای بر حسب سرعت جریان

۴-۶-۳ - بررسی نیروهای وارد بر ذره

برای بررسی مکانیزم غلتش ذره روی بستر، نیروهای مؤثر بر روی حرکت آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای این منظور از ذرات به قطر ۴ میلی‌متر با چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. در شکل ۴-۲۴ تغییرات نیروی درگ و لیفت در طول مسیر غلتش ذره‌ی متحرک نشان داده شده که نیروهای لیفت و درگ با استفاده از نیروی شناوری وارد بر ذره بدون بعد شده‌اند. مطابق

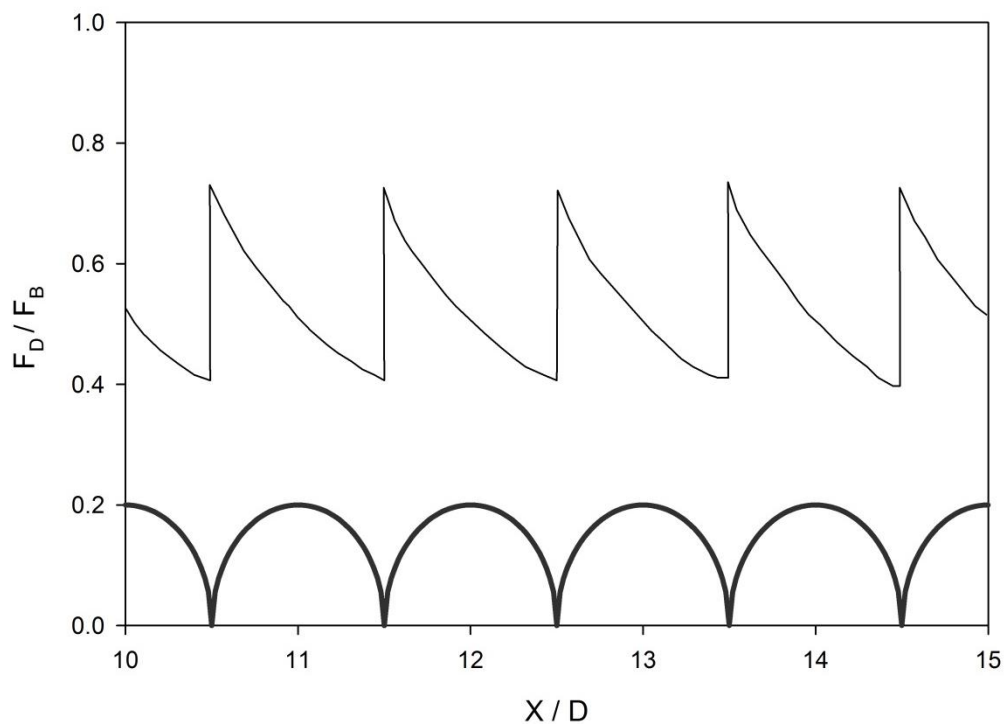
شکل نیروی درگ در طول مسیر حرکت ذره متغیر بوده و تغییرات آن بین ۴۰ تا ۷۰ درصد نیروی شناوری می‌باشد. این در حالی است که نیروی لیفت در محدوده‌ی بین ۵ تا ۷ درصد نیروی شناوری تغییر کرده و عملاً سهم ناچیزی از نیروهای وارد به ذره را دارا می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود نیروی درگ در طول مسیر حرکت ذره دارای روند یکسانی بوده و تغییرات آن در فواصل مشخصی تکرار شده است.



شکل ۴-۲۴ تغییرات نیروهای درگ و لیفت برای غلتش یک ذره‌ی رسوب

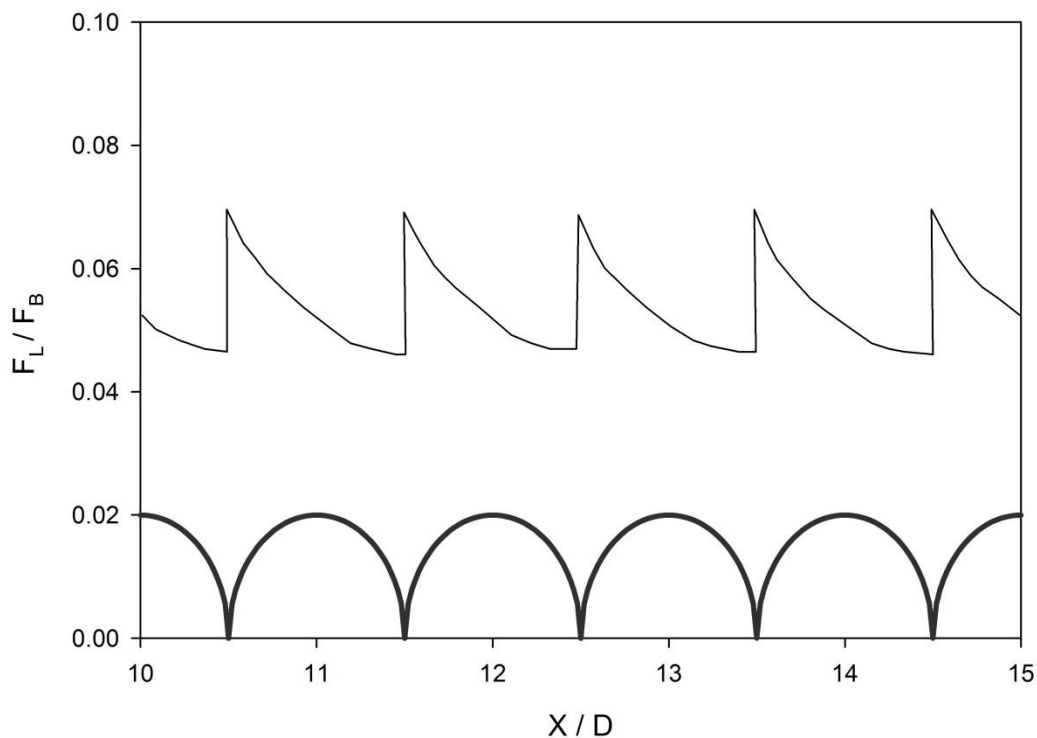
برای بررسی دقیق‌تر، نیروی درگ در فواصل ذرات بستر ۱۰ تا ۱۵ با جزئیات کامل در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این شکل و اشکال مشابه ذرات بستر به صورت شماتیک و غیرواقعی ارائه شده‌اند. مطابق شکل تغییرات نیروی درگ تکرارپذیر بوده و در فواصل مشابه بین هر ذره‌ی بستر دیده می‌شود. در حالتی که ذره‌ی متحرک روی یکی از ذرات بستر واقع شده باشد، مشاهده می‌شود که در این موقعیت نیروی درگ رو به کاهش بوده و دارای شیب ملایمی می‌باشد. البته این تغییرات به صورت خطی نبوده و با حرکت به سمت پایین‌دست این شیب ملایم‌تر می‌شود. علت کاهش نیروی درگ در این بازه این موضوع است که زمانی که ذره‌ی متحرک در بالای ذره بستر قرار دارد دارای سرعت بوده و بنابراین نیروی درگ که با سرعت نسبی ذره متناسب می‌باشد، کاهش پیدا می‌کند. این کاهش تا جایی ادامه پیدا کرده که ذره‌ی متحرک به ذره‌ی بعدی واقع در بستر

برخورد کند که در این لحظه نیروی درگ به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. این افزایش به این علت بوده که با برخورد ذره‌ی متحرک به ذره‌ی بستر سرعت آن ناگهان به صفر رسیده و سرعت نسبی و به تبع آن نیروی درگ افزایش می‌یابد. در این حالت نیروی درگ از ۴۰ درصد نیروی شناوری به ۷۰ درصد آن رسیده که این افزایش نیرو سبب رانده شدن ذره‌ی متحرک به سمت پایین دست می‌شود. سپس نیروی درگ مطابق قبل از برخورد به ذره‌ی بستر روند کاهشی پیدا کرده و این سیکل با کمی تفاوت در مقدار ماکزیمم و مینیمم نیروی درگ تکرار می‌شود.



شکل ۴-۲۵ بزرگنمایی تغییرات نیروی درگ در طول مسیر حرکت ذره

تغییرات نیروی لیفت نیز به صورت بزرگنمایی شده بین ذرات ۱۰ تا ۱۵ در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود الگوی نیروی لیفت همانند نیروی درگ بوده با این تفاوت که مقدار آن بسیار کمتر از نیروی درگ می‌باشد. به این علت که نیروی لیفت وارد بر ذره‌ی متحرک متناسب با سرعت نسبی آن می‌باشد، می‌توان تحلیلی را که برای نیروی درگ در قسمت قبل ارائه گردید، برای نیروی لیفت نیز بیان نمود. تنها تفاوتی که در این شکل‌ها دیده می‌شود مقدار افزایش ناگهانی نیروی و شیب کاهشی پس از آن بوده که در نیروی لیفت افزایش مذکور کمتر و شیب کاهشی ملایم‌تر از نیروی درگ می‌باشد.



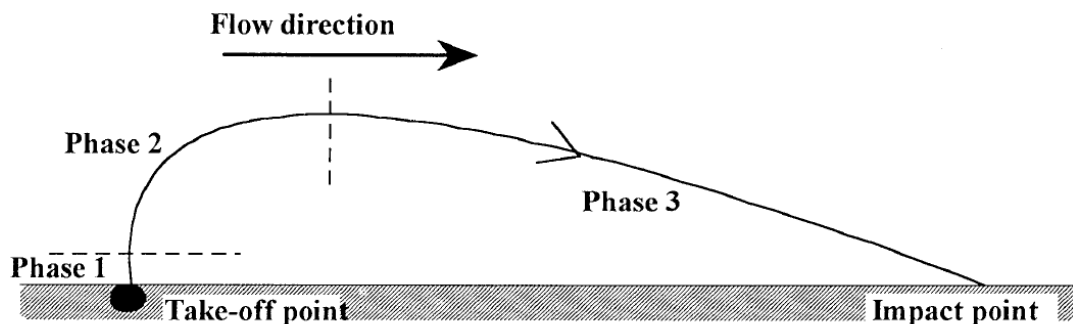
شکل ۴-۲۶ بزرگنمایی تغییرات نیروی لیفت در طول مسیر حرکت ذره

۴-۷- شبیه‌سازی جهش یک ذره رسوب

در قسمت قبل آستانه حرکت یک ذره رسوب و شروع حرکت آن که با غلتش آغاز می‌شود، شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از شروع حرکت ذره و با افزایش سرعت برشی جریان، حرکت ذره به صورت جهشی خواهد بود. جهش ذره رسوب که به صورت پیوسته به وقوع می‌پیوندد، دارای طول و ارتفاع‌های مختلفی می‌باشد. در مطالعات آزمایشگاهی معمولاً این مشخصات جهش ذره را به صورت متوسط اندازه‌گیری می‌نمایند. به این صورت که با انجام آزمایش‌های مختلف و تحلیل نتایج به دست آمده برای طول و ارتفاع جهش ذره در شرایط خاص جریان و به علت تصادفی بودن حرکت ذره در هر جهش، مقادیر متوسطی ارائه می‌دهند. بر اساس مطالعات صورت گرفته [۶۶] مسیر جهش یک ذره می‌تواند به سه فاز تقسیم گردد (شکل

۴-۲۷):

- ❖ زمانی که نرخ برش به اندازه کافی مهم بوده تا نیروی لیفت بزرگ‌تر از وزن ذره ایجاد کند، ذره از بستر جدا شده که این فاز اولیه حرکت ذره تقریباً صورت عمودی می‌باشد. به نقطه‌ای که ذره از بستر جدا می‌شود نقطه‌ی برخاستگی^۱ می‌گویند.
- ❖ به سرعت یک نیروی درگ ظاهر شده که با سرعت نسبی ذره متناسب بوده و تمایل به تسریع حرکت ذره دارد. به دلیل ایجاد فاصله بین ذره و بستر، گرادیان سرعت کاهش پیدا کرده و به تبع آن نیروی لیفت نیز کاهش می‌یابد. با تضعیف نیروی لیفت وزن بر آن غلبه کرده و سرعت عمودی ذره کاهش پیدا کرده و به سمت صفر میل می‌کند. در طی این فرایند نیروی درگ بر سرعت ذره در راستای طول تأثیر گذاشته و مسیر حرکت ذره از عمودی به افقی تغییر پیدا می‌کند.
- ❖ در فاز سوم و آخر نیروی لیفت به نسبت نیروهای درگ و وزن کاهش پیدا کرده و به سمت بستر در یک مسیر شبه خطی حرکت می‌کند. زمانی که ذره به بستر می‌رسد در نقطه‌ی برخورد^۲ انرژی جنبشی خود را به بستر و یا ذرات رسوب دیگر (در صورت وجود) منتقل می‌کند.



شکل ۴-۲۷ فازهای مختلف جهش یک ذره [66]

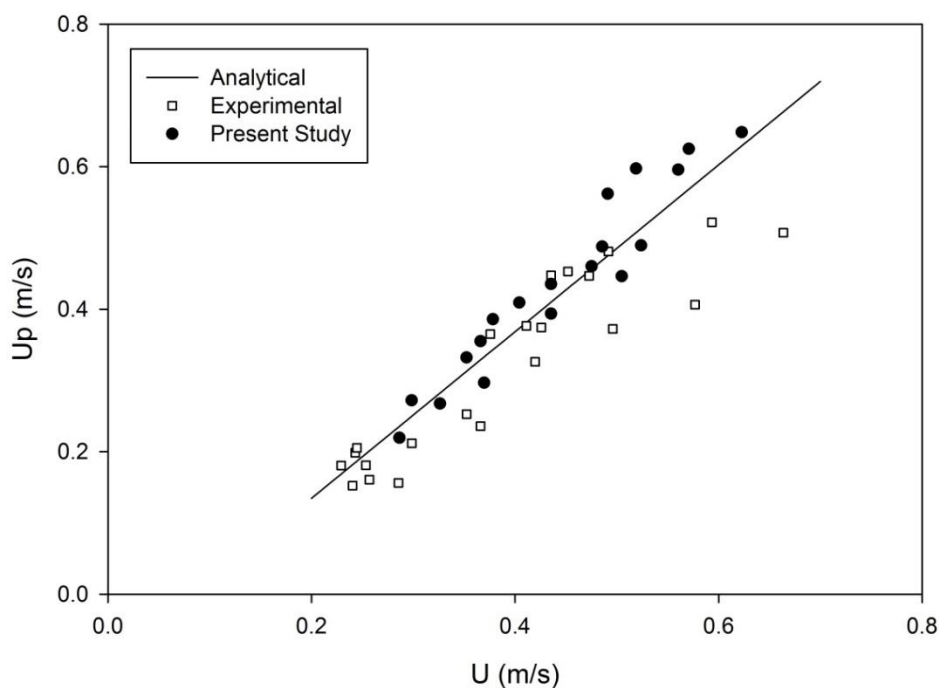
۴-۷-۱- بررسی رابطه بین سرعت جریان و ذره

در ابتدا برای بررسی جهش یک ذره، از اطلاعات اندازه‌گیری شده Ancey و همکاران که بخشی از آن اطلاعات در قسمت شبیه‌سازی غلتش ذره استفاده گردیده، بهره گرفته شده است. در ادامه نتایج اندازه‌گیری شده در مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای دو ذره شیشه‌ای و

1 Take-off Point

2 Impact Point

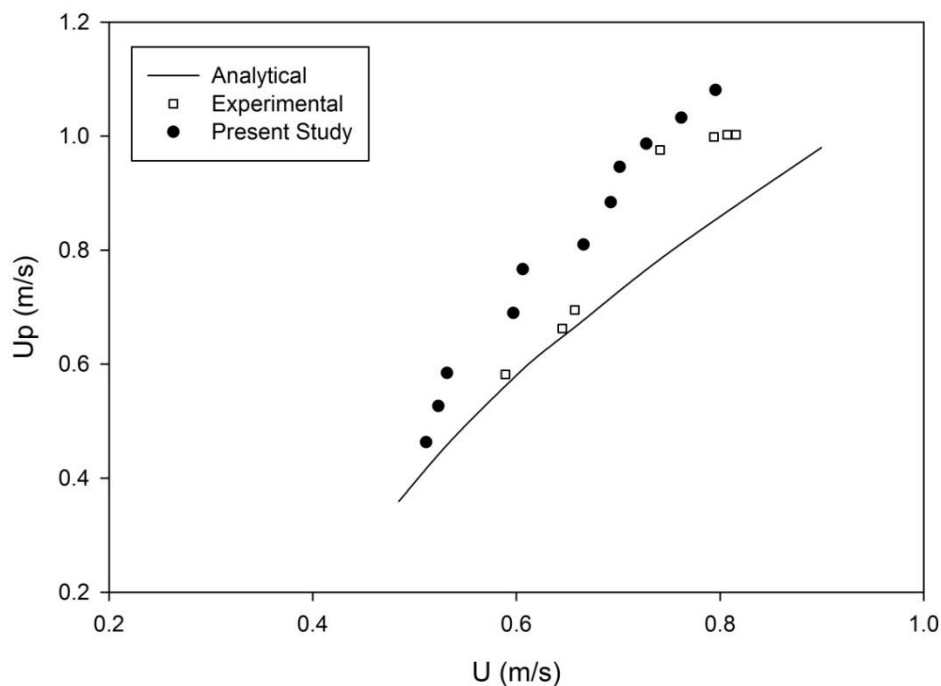
فولادی نشان داده شده است. در این شکل‌ها مقادیر سرعت متوسط ذره از آستانه جهش نشان داده شده که تغییرات آن بر حسب سرعت متوسط ورودی جریان سیال ترسیم شده است. لازم به ذکر است سرعت نشان داده شده برای ذره جمع برداری سرعت آن در راستای طولی و عرضی می‌باشد. مطابق شکل ۴-۲۸ که مربوط به ذره‌ی شیشه‌ای بوده برای وارد شدن ذره به فاز جهش محدوده سرعت جریان باید بین ۰.۳ تا ۰.۶۵ متر بر ثانیه باشد. اعمال این محدوده سرعت جریان سبب حرکت ذره در بازه‌ی سرعت متوسط ۰.۲ تا ۰.۶۵ متر بر ثانیه شده که سرعت بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی و حل تحلیلی ارائه شده توسط Ancey و همکاران نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است برای مقادیر سرعت جریان در حدود ۰.۲۵ متر بر ثانیه مرز دقیقی بین دو حالت غلتش و جهش وجود نداشته و تفکیک این دو رژیم از هم کمی دشوار می‌باشد. اما با افزایش سرعت جریان ذره از حالت غلتش خارج شده و جز با تماس‌های کوتاه در فواصل زمانی به بستر برخورد نمی‌کند که می‌توان نتیجه گرفت ذره به صورت جهش خالص به سمت پایین دست منتقل می‌شود.



شکل ۴-۲۸ سرعت متوسط ذره‌ی شیشه‌ای بر حسب سرعت متوسط جریان برای حالت جهش ذره

شکل ۴-۲۹ نیز مقادیر سرعت متوسط ذره‌ی فولادی را بر حسب سرعت متوسط جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده سرعت جریان برای جدا کردن ذره از بستر و ورود به حالت جهش بین ۰.۵ تا ۰.۸ متر بر ثانیه می‌باشد. این محدوده سرعت جریان منجر به سرعت ذره در

بازه ی ۰.۴۵ تا ۱.۱ متر بر ثانیه شده که همانند ذره ی شیشه ای مقادیر بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی و حل تحلیلی نشان می دهد. لازم به ذکر است افزایش سرعت جریان سبب افزایش طول و ارتفاع پرش شده تا آنجا که برای سرعت های بیشتر از ۰.۸ متر بر ثانیه طول پرش بیشتر شده و ذره از حالت جهش خارج شده و تمایل به تعلیق دارد.

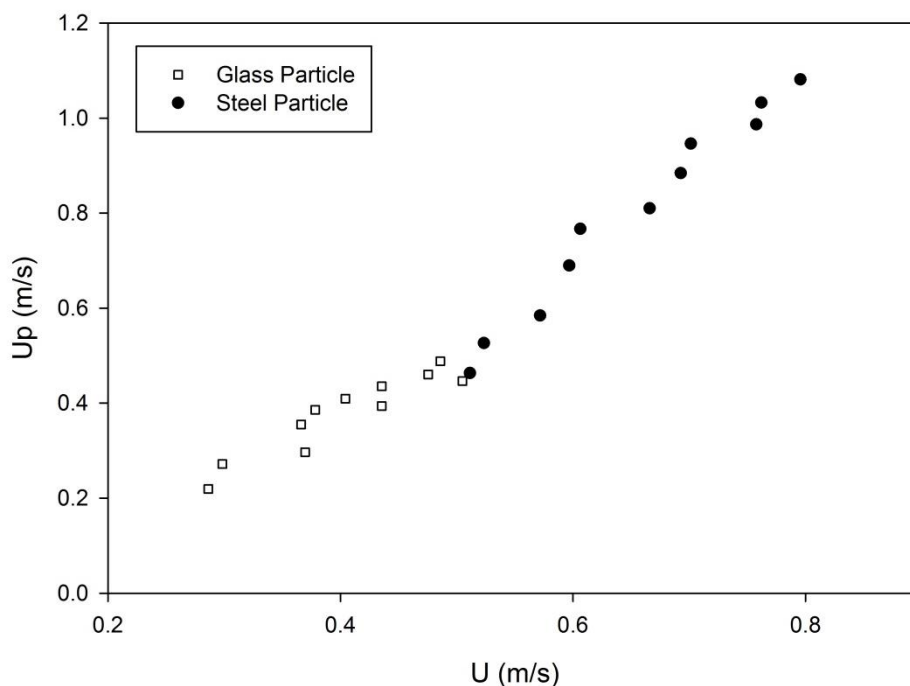


شکل ۴-۲۹ سرعت متوسط ذره ی فولادی بر حسب سرعت متوسط جریان برای حالت جهش ذره

در شکل ۴-۳۰ سرعت متوسط ذرات فولادی و شیشه ای بر حسب سرعت متوسط جریان برای ذره به قطر ۶ میلی متر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود برای جهش ذره ی فولادی سرعت جریانی به مراتب بیشتر از ذره ی شیشه ای نیاز می باشد. ذره ی شیشه ای برای سرعت جریان حدود ۰.۵ متر بر ثانیه دارای جهش های بلندی شده و برای سرعت های بیشتر از این مقدار از حالت جهش خارج می شود. این در حالی است که سرعت مذکور آستانه ی جهش ذره ی فولادی بوده و برای سرعت های جریان کمتر از ۰.۵ متر بر ثانیه ذره به صورت غلتش منتقل می شود. برای جهش ذره ی فولادی به سرعتی معادل دو برابر سرعت مورد نیاز برای جهش ذره ی شیشه ای نیاز بوده و سرعت آستانه جهش ذره ی فولادی تقریباً دو برابر سرعت آستانه جهش ذره ی شیشه ای می باشد.

همچنین مطابق شکل مشاهده می شود شیب تغییر سرعت متوسط ذره ی فولادی در برابر تغییر سرعت جریان بیشتر از ذره ی شیشه ای بوده به طوری که افزایش سرعت متوسط جریان از ۰.۵ به ۰.۸

متر بر ثانیه سبب افزایش ۱۴۵ درصدی سرعت متوسط ذره فولادی شده در حالی که افزایش سرعت متوسط جریان از ۰.۳ به ۰.۵ متر بر ثانیه سبب تقریباً همین مقدار افزایش سرعت ذره‌ی شیشه‌ای می‌گردد.

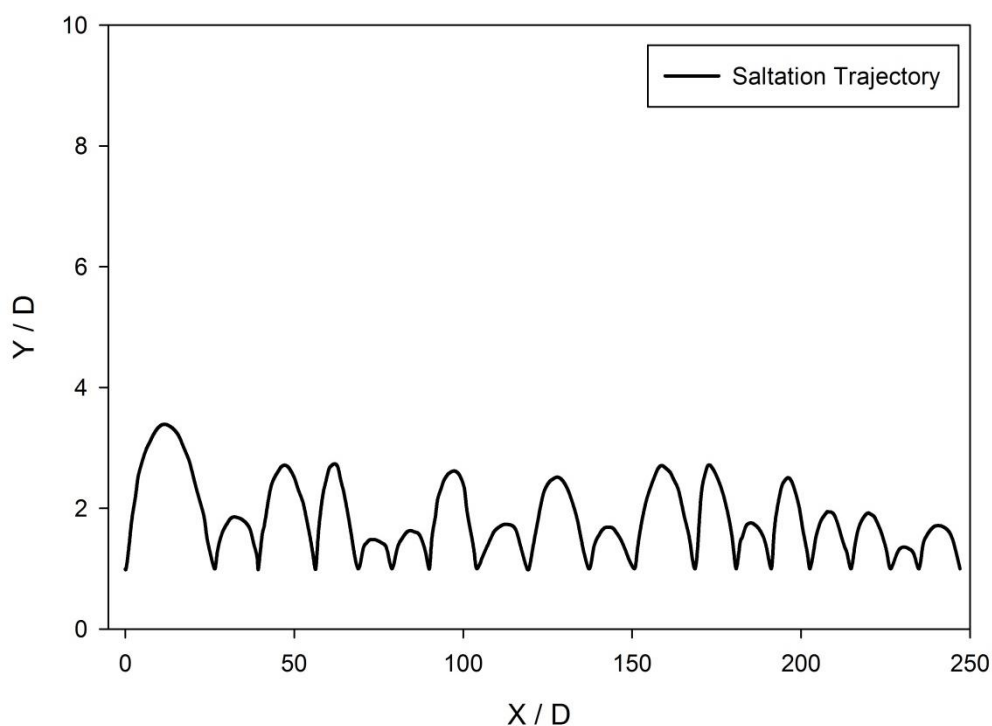


شکل ۴-۳ سرعت متوسط ذره‌ی فولادی در مقایسه با ذره‌ی شیشه‌ای برای حالت جهش ذره

۴-۷-۲ - بررسی مسیر جهش ذره

بعد از مقایسه‌ی نتایج سرعت متوسط ذره در برابر سرعت متوسط جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی، به جهش یک ذره پرداخته می‌شود. همان‌طور که گفته شد بعد از آستانه حرکت و غلتش ذره با افزایش سرعت و تنش برشی ذره با حرکات جهشی مسیر خود را طی می‌کند. در طی این فرایند انرژی از فاز سیال به فاز رسوب به وسیله‌ی نیروی درگ منتقل شده که مقداری از این انرژی به علت برخورد ذره به ذرات بستر از بین می‌رود. بنابراین یک ذره هنگامی که به بستر برخورد می‌کند مقداری از مومنتوم خود را از دست داده و مقداری را حفظ کرده که باعث برگشت آن به درون جریان و ادامه حرکت آن می‌شود. سرعت اولیه برای جهش‌های بعدی به سرعت و زاویه برخورد در جهش قبلی بستگی دارد. شکل ۴-۳۱ جهش ذره‌ی مذکور را در سرعت متوسط جریان ۰.۵ متر بر ثانیه، چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطر ۴ میلی‌متر نشان می‌دهد. طول در نظر گرفته شده برای بررسی جهش ذره در حدود یک متر بوده که برای این منظور به ۲۵۰ ذره در بستر موردنیاز

می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جهش اول بیشترین طول و ارتفاع را داشته و طول و ارتفاع برای جهش‌های بعدی ذره به صورت تصادفی رخ می‌دهند. علت این که جهش اول دارای طول و ارتفاع بیشتری است می‌تواند این موضوع باشد که برای ذره‌ی ساکن و یا ذره‌ای که غلتش می‌کند، به مومنتوم بیشتری برای جهش نیاز بوده که سبب ایجاد طول و ارتفاع جهش زیادی می‌گردد. اما ذره‌ای که در حال جهش می‌باشد به دلیل اینکه بعد از برخورد به بستر مقداری از مومنتوم تلف شده و مقداری از آن در ذره باقی می‌ماند، به مومنتوم کمتری برای برخاستن دوباره نیاز می‌باشد. عمده ارتفاع جهش‌های رخ داده در فاصله‌ی مورد بررسی بین یک تا دو برابر قطر ذره بوده و طول جهش‌ها نیز بین ۱۰ تا ۱۵ برابر قطر ذره می‌باشد.



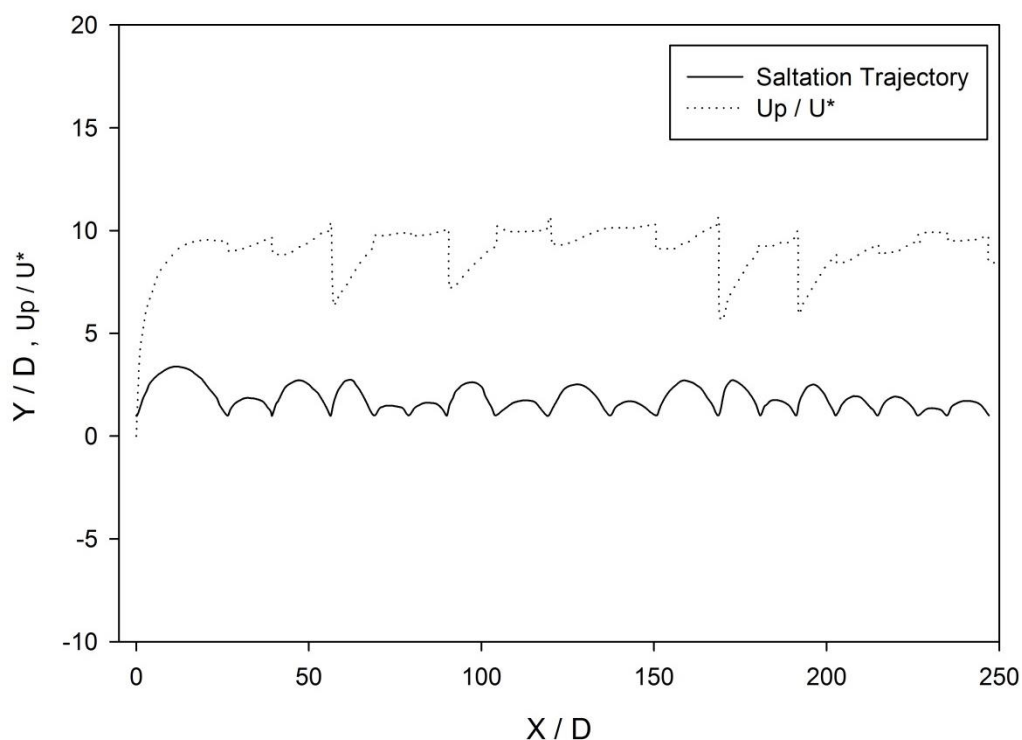
شکل ۴-۳۱ مسیر جهش ذره به قطر ۴ میلی‌متر

۴-۷-۳ - بررسی سرعت‌های افقی و عمودی جهش

در شکل ۴-۳۲ نیز سرعت بی‌بعد شده افقی ذره‌ی متحرک در طی جهش‌های متوالی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت افقی ذره بعد از برخاستن از بستر افزایش یافته و این افزایش تا زمان برخورد ذره به ذرات بستر ادامه می‌کند. پس از برخورد ذره به بستر سرعت افقی آن به شدت و به طور ناگهانی کاهش یافته و پس از یک دوره بازیافت و تغییر جهت دوباره ذره‌ی متحرک از بستر جدا شده و به سمت بالا و پایین‌دست حرکت می‌کند. در حین برخورد ذره به بستر و بسته به

موقعیت و شرایط برخورد، ذره‌ی متحرک مومنتوم خود را از دست داده و یا پس از یک دوره بازیافت مومنتوم بیشتری از بستر دریافت کرده و به سطوح بالاتری منتقل می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود محدوده تغییرات سرعت افقی ذره‌ی متحرک در طول مسیر بین ۵ تا ۱۰ برابر سرعت برشی می‌باشد.

یکی از پارامترهای مهمی که در بحث برخورد ذرات وجود دارد ضریب ارتجاعی می‌باشد. این ضریب بیان‌کننده شرایط بعد از برخورد بوده که برای هر دو جهت افقی و عمودی تعریف می‌شود. به عبارت دیگر این پارامتر بیان می‌کند که چه مقدار از مومنتوم ذره در حین برخورد از بین رفته و یا دریافت می‌شود. با دقت در شکل ۴-۳۲ و مطالب گفته شده می‌توان دریافت که این ضریب برای مسئله حاضر همیشه کوچک‌تر از یک می‌باشد. به علت اینکه سرعت افقی ذره در طول یک جهش افزایش یافته و پس از برخورد به بستر این سرعت کاهش پیدا کرده و سبب می‌شود ضریب ارتجاعی کمتر از یک شود. همچنین از شکل مذکور این نکته نیز برداشت می‌شود که ضریب ارتجاعی در طول مسیر حرکت مقدار ثابتی نداشته و برای هر برخورد به بستر دارای مقدار متغیری می‌باشد.

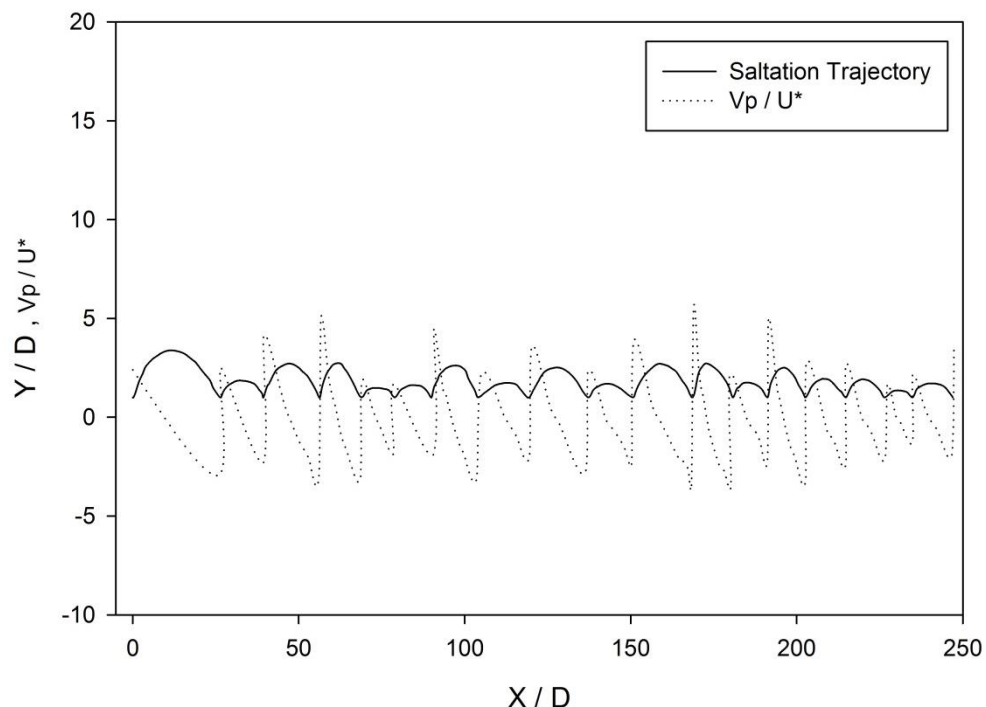


شکل ۴-۳۲ سرعت بی‌بعد شده افقی ذره‌ی متحرک در طول مسیر جهش

در شکل ۴-۳۳ سرعت بی‌بعد شده عمودی ذره‌ی متحرک در طی جهش‌های متوالی نشان داده شده است. تغییرات سرعت عمودی ذره به این صورت است که در ابتدای بلند شدن، سرعت عمودی

ذره زیاد بوده و در طول هر جهش مقدار آن به طور پیوسته کاهش پیدا می‌کند. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که ذره‌ی متحرک به ذرات بستر برخورد کند. پس از برخورد ذره به بستر و طی یک دوره بازیافت جهت حرکت ذره تغییر کرده که سبب افزایش ناگهانی سرعت عمودی ذره شده و به یک مقدار حداکثر رسیده و دوباره شروع به کاهش می‌کند. محدوده تغییرات سرعت عمودی ذره بین ۲- تا ۲ برابر سرعت برشی بوده که البته این مقدار در جهش‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

مشابه سرعت افقی ذره ضریب ارتجاعی برای سرعت عمودی نیز می‌تواند تعریف شود. این ضریب برای مسئله حاضر در حدود یک و بیشتر از آن بوده و به طور کلی همانند ضریب ارتجاعی افقی یک مقدار ثابت برای کل جهش‌های رخ داده در طول مسیر نمی‌توان برای آن مشخص کرد.



شکل ۴-۳ سرعت بی‌بعد شده عمودی ذره‌ی متحرک در طول مسیر جهش

۴-۸- شبیه‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب

در بخش‌های قبلی غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب در بستر زیر، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ادامه‌ی این روند آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب با اعمال مدل برخورد گفته شده در بخش‌های قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق مطالعات انجام شده پارامترهای مؤثر بر آستانه حرکت ذرات رسوب شامل عدد فرود ذرات $Fr = \frac{u_*}{\sqrt{gd}}$ ، چگالی نسبی $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ ، عدد رینولدز ذره Re^* ، استغراق نسبی $\frac{H}{D}$ ، شیب طولی بستر α و زاویه ایستایی ذرات رسوب φ می‌باشد [20]. با تعریف صورت گرفته

برای شیلدز بحرانی به صورت $\theta_c = \frac{u_*^2}{\Delta g D}$ عوامل مؤثر بر شیلدز بحرانی به صورت زیر می‌تواند بیان گردد:

$$\theta_c = f(\text{Re}^*, \frac{H}{D}, \sin \alpha, \tan \varphi) \quad ۱۷-۴$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت پارامترهای مؤثر بر شیلدز بحرانی شامل عدد رینولدز ذره، استغراق نسبی، شیب طولی بستر و زاویه ایستایی ذرات می‌باشد. با توجه به مطالب گفته در ادامه نحوه شبیه‌سازی عددی آستانه حرکت ذرات رسوب تشریح شده و سپس معیارهای مختلف آستانه حرکت، اثر شیب طولی بستر و زاویه ایستایی ذرات رسوب روی پارامتر شیلدز بحرانی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در تحقیق حاضر از بررسی اثر استغراق نسبی روی شیلدز بحرانی به دلیل محدودیت در شبیه‌سازی و همچنین پراکندگی داده‌ها (شکل ۲-۳) صرف‌نظر شده است. در جدول ۴-۵ محدوده‌ی تغییرات هر یک از پارامترهای گفته شده نشان داده شده است.

جدول ۴-۵ محدوده‌ی متغیرهای مورد بررسی در شبیه‌سازی آستانه حرکت گروهی ذرات

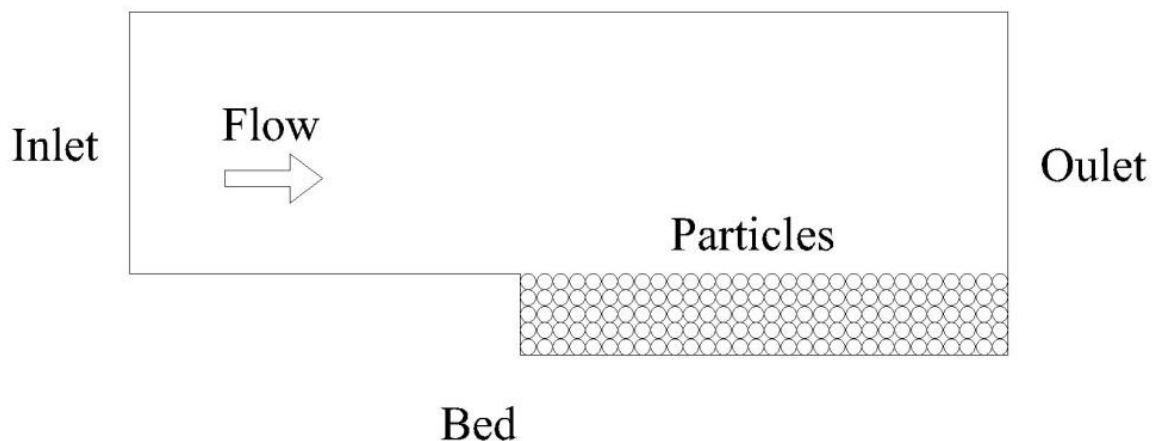
متغیر مورد بررسی	محدوده‌ی تغییرات
عدد رینولدز (Re^*)	از ۱ تا ۱۱۰۵
شیب طولی بستر (α)	از ۱۵- تا ۱۵ درجه
زاویه ایستایی ذرات رسوب (φ)	از ۳۰ تا ۴۰ درجه

۴-۸-۱- مدل‌سازی عددی آستانه حرکت ذرات رسوب

در تحقیق حاضر برای افزایش دقت در مدل‌سازی از اثر ذرات رسوب بر روی جریان سیال صرف‌نظر نگردیده است. بنابراین در این پژوهش نیاز به حل معادلات جریان و شکل‌گیری پروفیل سرعت لگاریتمی و سپس اعمال نیروی وارده از طرف جریان به ذرات رسوب می‌باشد. سرعت در مرز ورودی به‌صورت یک معادله تابع زمان بوده که با افزایش زمان اجرا، مقدار سرعت نیز افزایش یافته و سبب حرکت ذرات ساکن رسوب می‌گردد. همچنین سرعت در مرز جامد به نحوی اعمال گردیده که شرایط عدم لغزش ارضا شود. فشار نیز به‌صورت مقدار ثابت صفر در مرز خروجی و گرادیان صفر در بقیه مرزها به کار گرفته شده است. شروط مرزی مربوط به انرژی جنبشی آشفته و نرخ اضمحلال

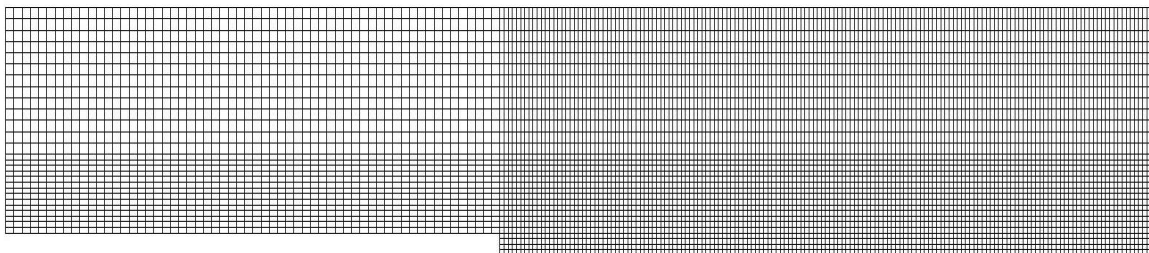
آشفته‌گی نیز برای ورودی برابر مقدار ثابت و برای بقیه مرزها برابر گرادیان صفر منظور شده است. جریان به‌صورت پروفیل مستطیلی وارد میدان حل شده و ذرات رسوب در فاصله‌ای از مرز ورودی قرار می‌گیرند که جریان فرصت توسعه یافتن داشته باشد. طول لازم جهت توسعه‌یافتگی پروفیل سرعت با اجرای مدل در یک بستر صاف و بدون حضور ذرات رسوب به‌دست می‌آید. این فاصله علاوه بر دلیل گفته شده، از آشفته‌گی موضعی جریان در اطراف ذرات ابتدایی در اثر گرادیان سرعت جلوگیری می‌کند.

طبق مطالعات Salem [۶۷] و Gregoretti [۶۸] ضخامت لایه ذرات رسوب باید حداقل 3D و حداکثر 5D بوده که در این پژوهش از پنج لایه ذره‌ی رسوب استفاده شده است. ذرات رسوب دایروی بوده و قطر همه‌ی ذرات در هر اجرا یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین چگالی ذرات رسوب ثابت و برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. شماتیک هندسه‌ی مدل‌سازی شده در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۴ شماتیک هندسه‌ی مدل‌شده در نرم‌افزار

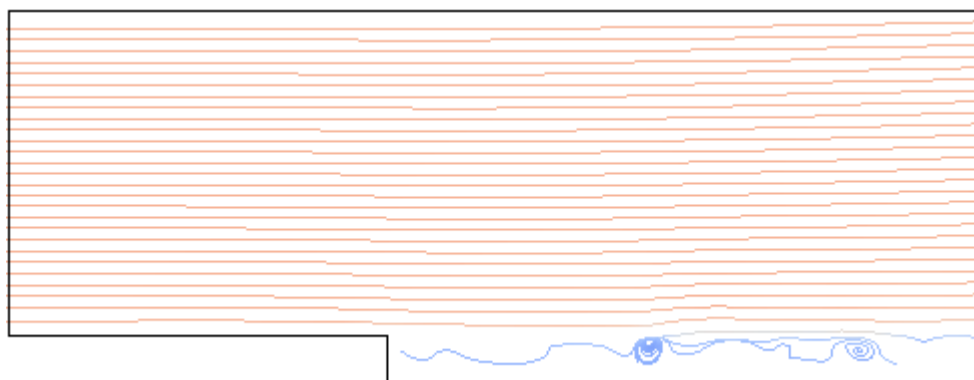
مش‌بندی برای نواحی نزدیک به مرز جامد و ذرات رسوب که تغییرات سرعت بیشتر است، ریزتر بوده و برای نواحی دورتر از مش بزرگ‌تری استفاده گردیده تا هزینه محاسباتی کاهش پیدا کند (شکل ۴-۳۵).



شکل ۴-۳۵ نمایی از مش بندی هندسه مسئله

بعد از ساخت هندسه و ایجاد شرایط اولیه و مرزی و تنظیم خصوصیات سیال و ذرات رسوب، مدل اجرا می‌گردد. در ابتدا همه‌ی ذرات رسوب ساکن بوده و سرعت پایین جریان قادر به حرکت ذرات رسوب نمی‌باشد. همان‌طور که اشاره گردید شرط مرزی سرعت در ورودی یک تابع وابسته به زمان بوده که با افزایش زمان اجرا، سرعت ورودی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت و در نتیجه نیروهای وارد بر ذرات، تعداد کمی از آن‌ها با غلتیدن، پرش‌های کوتاه و یا به‌صورت لغزش جابجا می‌شوند. ابتدا ذرات در لایه‌ی فوقانی حرکت کرده و پس از جابجا شدن این ذرات، ذرات در لایه‌های زیرین نیز تحت تأثیر جریان قرار می‌گیرند. با افزایش سرعت جریان، تعداد ذراتی که شروع به حرکت می‌کنند، به تدریج افزایش یافته تا جایی که هیچ ذره‌ای تحت تأثیر نیروهای وارده از طرف جریان ثابت نخواهد ماند.

شکل ۴-۳۶ خطوط جریان را در دامنه‌ی حل در لحظه‌ی آستانه حرکت ذرات رسوب و حرکت به سمت پایین‌دست نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد خطوط جریان در ورودی به صورت موازی بوده و تقریباً تا خروجی به همین صورت باقی می‌مانند. اما در محل قرارگیری رسوب خطوط جریان دارای انحنا بوده و در برخی از موقعیت‌ها به دلیل قرارگیری شکل خاص ذرات رسوب گردابه تشکیل می‌شود.



شکل ۴-۳۶ خطوط جریان میدان حل پس از آستانه حرکت ذرات رسوب

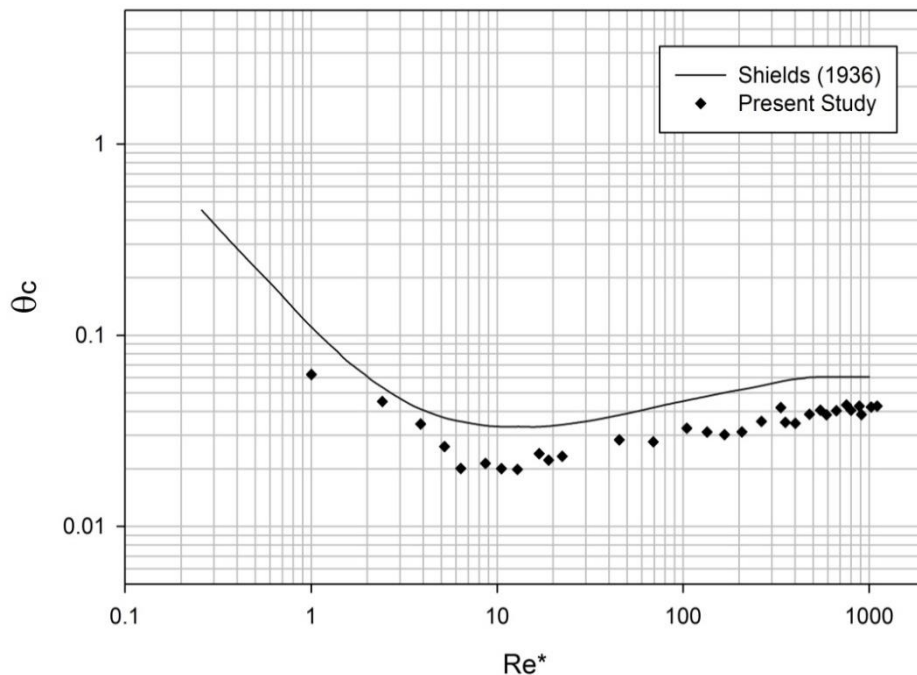
تشخیص آستانه حرکت ذره‌های رسوب در بستر کانال موضوعی انتزاعی بوده که نقش تعریف آستانه حرکت استفاده شده، حائز اهمیت می‌باشد. معیار آستانه حرکت ذرات در این پژوهش طبق حالت چهارم توصیف Kramer حرکت بی‌وقفه‌ی آن‌ها در هر زمان و مکان تحت تأثیر جریان سیال در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۳۷ مراحل مختلف حرکت ذرات از سکون کامل تا حرکت در موده‌های غلتش و جهش در عدد رینولدز ذره برابر ۹۱۰ نشان داده شده است.



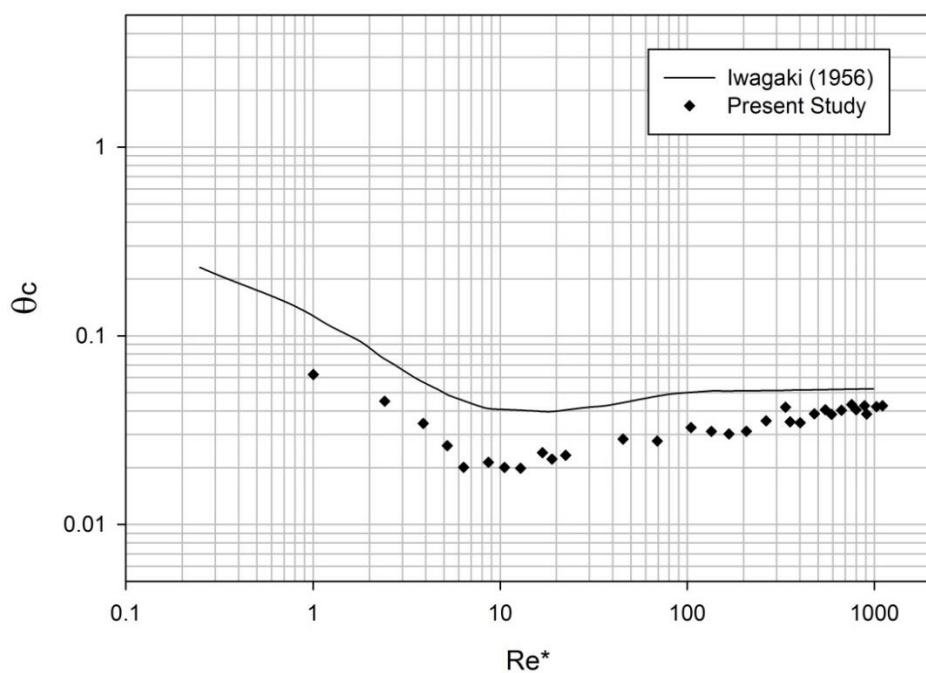
شکل ۴-۳۷ مراحل مختلف به آستانه حرکت رسیدن ذرات رسوب در $Re^* = 910$

با توجه به تعیین سرعت آستانه حرکت ذرات در اعداد رینولدز مختلف با دو روش تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی به مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و نتایج محققین دیگر پرداخته شده است. در شکل ۴-۳۸ تا شکل ۴-۴۲ نتایج به دست آمده از مدل حاضر با دیاگرام شیلدز و نتایج محققین دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نمودار محققین در نواحی بینابین و جریان با بستر زبر تفاوت چندانی

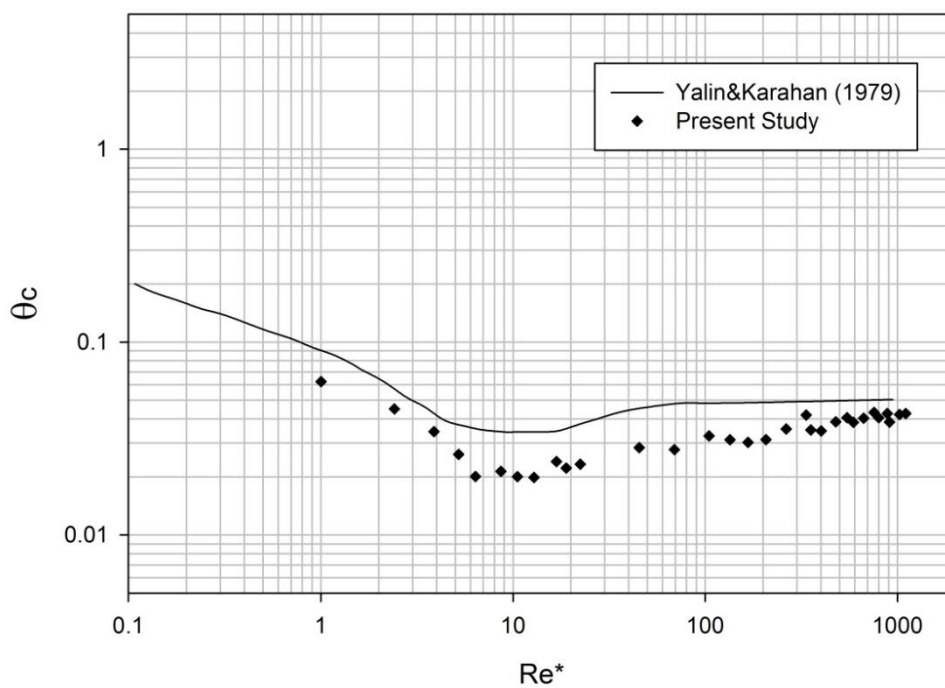
نداشته و عمده تفاوت آن‌ها در قسمت جریان با بستر صاف می‌باشد. مطابق شکل نتایج به دست آمده از مدل حاضر پایین‌تر از همهی نمودارهای مورد بررسی بوده که بیانگر آن است که ذرات تحت جریان با شدت کمتری به آستانه‌ی حرکت می‌رسند. علت این موضوع یکنواخت بودن ذرات رسوب در مدل عددی بوده که سبب می‌گردد ذرات تحت سرعت کمتری به آستانه حرکت برسند. در حالی که در پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده، ذرات دارای دانه‌بندی بوده و ذرات کوچک با قرار گرفتن بین ذرات بزرگ، محافظت شده و نسبت به مدل عددی تحت شدت جریان بیشتری به آستانه حرکت می‌رسند (پدیده سپری شدن) مقدار پارامتر شیلدز بحرانی در ناحیه جریان با بستر زبر در این پژوهش برابر 0.0041 به دست آمده که این مقدار برای دیاگرام‌های Shields و Wiberg and Smith برابر 0.06 و برای محققین دیگر حدود 0.05 می‌باشد.



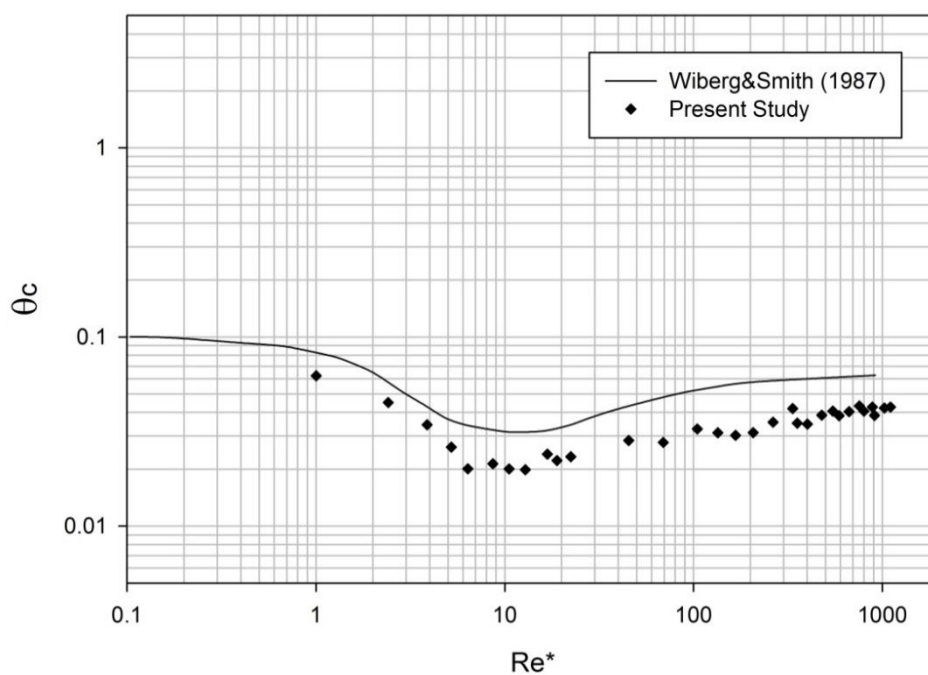
شکل ۴-۳ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Shields



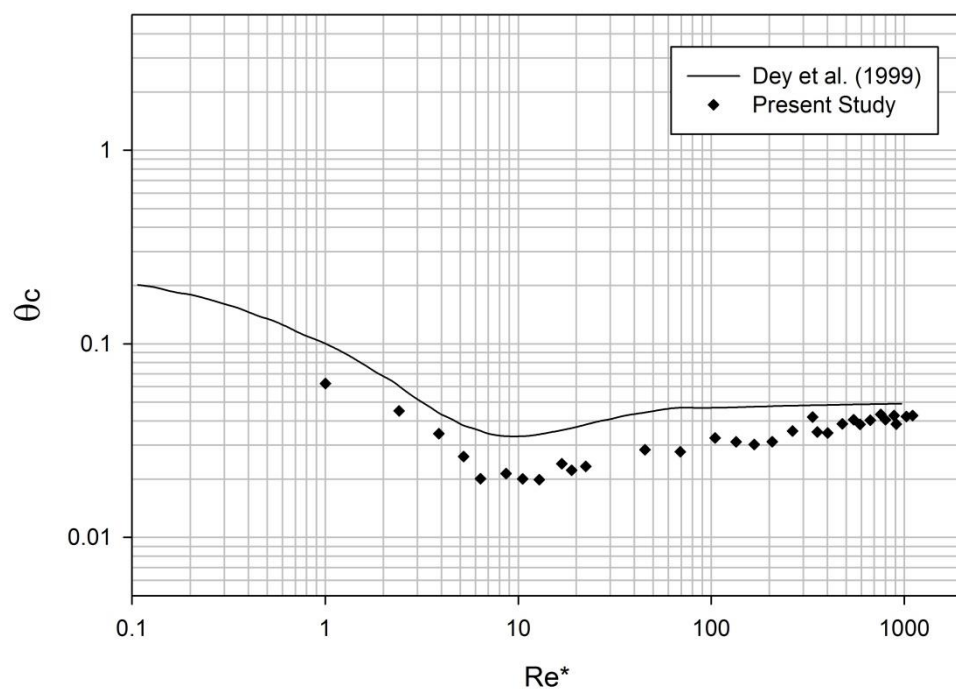
شکل ۴-۳۹ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Iwagaki



شکل ۴-۴۰ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Yalin and Karahan



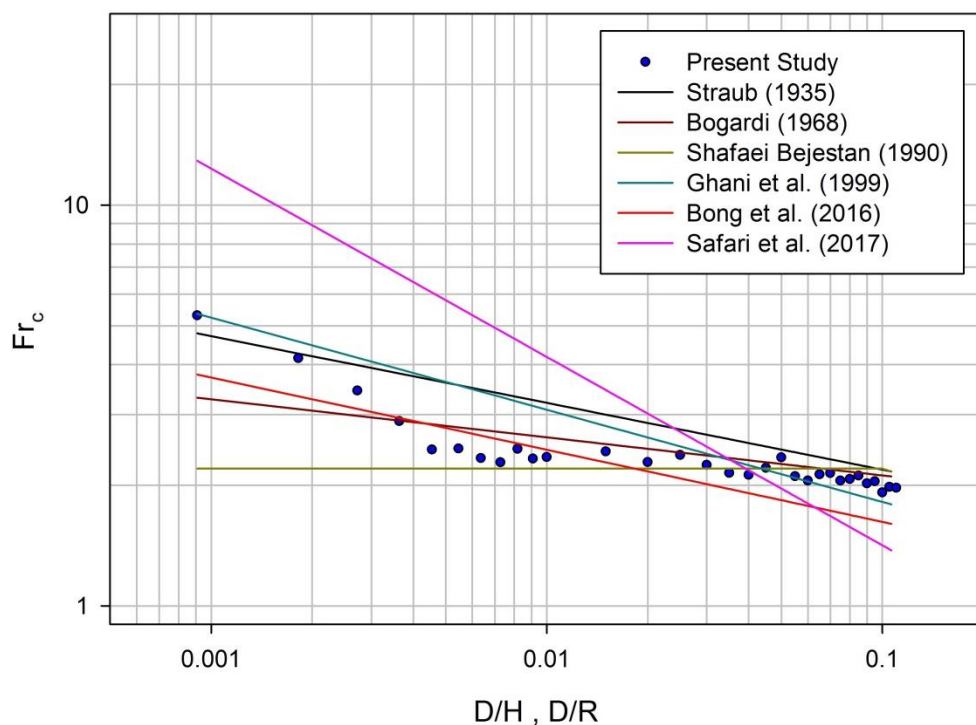
شکل ۴-۴۱ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Wiberg and Smith



شکل ۴-۴۲ مقایسه‌ی نتایج آستانه حرکت مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی Dey و همکاران

نتایج در قالب روش سرعت بحرانی و مقایسه با محققین مختلف در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر اندازه نسبی ذره عدد فرود بحرانی ذره کاهش یافته به‌طوری‌که افزایش اندازه نسبی ذره از 0.0009 به 0.1 سبب کاهش 63 درصدی عدد فرود بحرانی می‌گردد. همچنین مطابق شکل، داده‌های به دست آمده از مدل را می‌توان به دو ناحیه تقسیم‌بندی نمود. قسمت اول شامل ذرات با اندازه نسبی کوچک‌تر از 0.008 که در این ناحیه شیب تغییرات بیشتر بوده و با افزایش اندازه نسبی از 0.0009 به 0.008 عدد فرود بحرانی 55 درصد کاهش می‌یابد. بخش دوم نیز شامل ذرات با اندازه نسبی بزرگ‌تر از 0.008 بوده که شیب تغییرات در این ناحیه کمتر از قسمت اول بوده و با افزایش اندازه‌ی نسبی از 0.008 تا 0.1 عدد فرود بحرانی حدود هشت درصد کاهش می‌یابد.

از مقایسه‌ی اطلاعات به دست آمده از مدل و میانگین نتایج محققین دیگر مشاهده می‌شود در قسمت اول عدد فرود بحرانی بیشتر و در قسمت دوم کمتر از مقدار میانگین عدد فرود به دست آمده می‌باشد. با کاهش قطر ذرات اثر پدیده‌ی سپری شدن کمرنگ شده و مشاهده می‌گردد در بخش اول نمودار بالاتر از میانگین نتایج محققین مختلف قرار گرفته است.



شکل ۴-۴۳ مقایسه‌ی روابط مختلف آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی

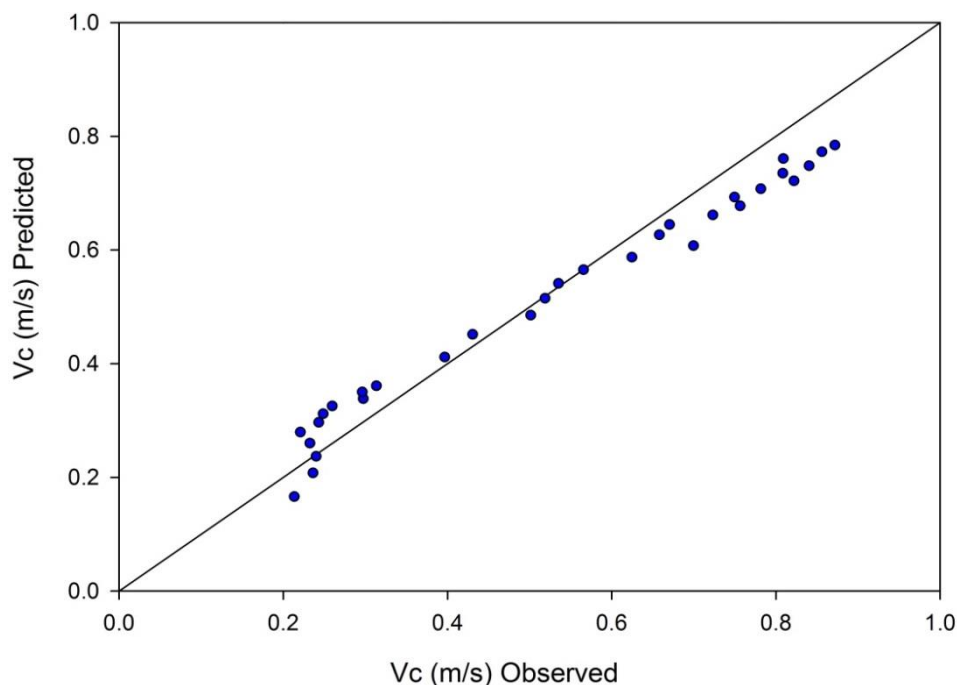
با توجه به داده‌های شکل ۴-۴۳ رابطه‌ی زیر جهت محاسبه‌ی آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = 1.202 \left(\frac{R}{D} \right)^{0.176} \quad ۱۸-۴$$

شکل ۴-۴۴ مقایسه‌ی بین سرعت حاصل از مدل عددی و رابطه‌ی ۱۸-۴ را نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی (R^2) و خطای جذر میانگین مربع^۱ (RMSE) به ترتیب برابر ۰.۷۵ و ۰.۰۴۹ بوده که در محدوده‌ی قابل قبولی می‌باشد. همچنین رابطه‌ی زیر با ضریب همبستگی ۰.۹۶ و خطای جذر میانگین مربع ۰.۰۳۴ که دارای دقت بالاتری از رابطه‌ی ۱۸-۴ می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد:

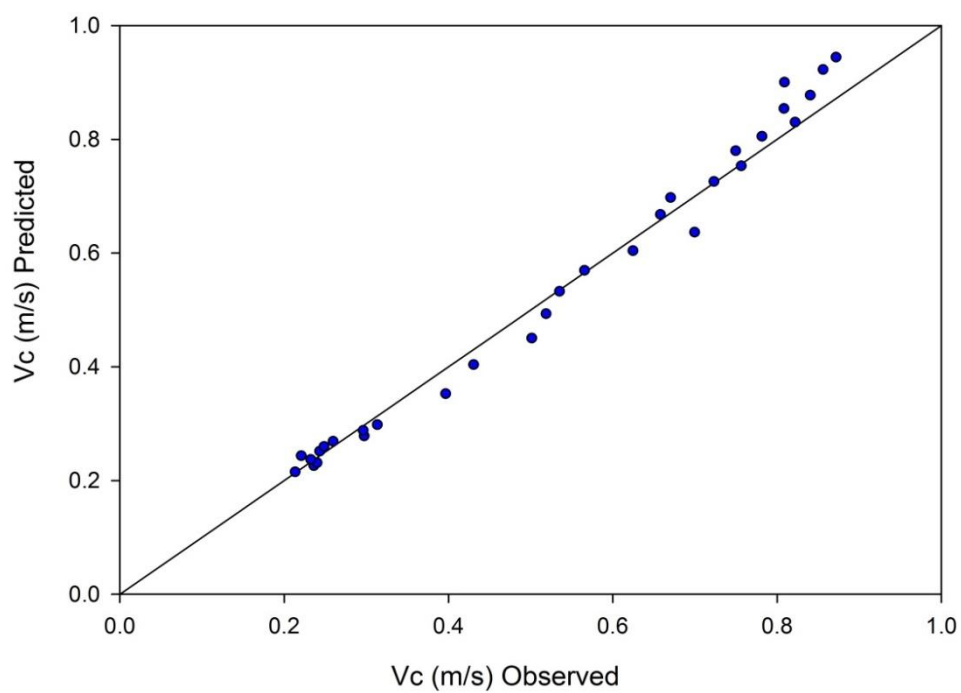
$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = \frac{2.134}{1 - 0.78e^{-287.33 \frac{R}{D}}} \quad ۱۹-۴$$

در شکل ۴-۴۴ و شکل ۴-۴۵ سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت محاسبه شده توسط روابط ۱۸-۴ و ۱۹-۴ نشان داده شده است. در شکل ۴-۴۶ تا شکل ۴-۵۱ نیز برای مقایسه بین ضرایب a و m محققان مختلف (جدول ۲-۲) سرعت‌های به دست آمده از این معادلات با سرعت مدل عددی حاضر (رابطه‌ی ۱۸-۴) مقایسه شده است.

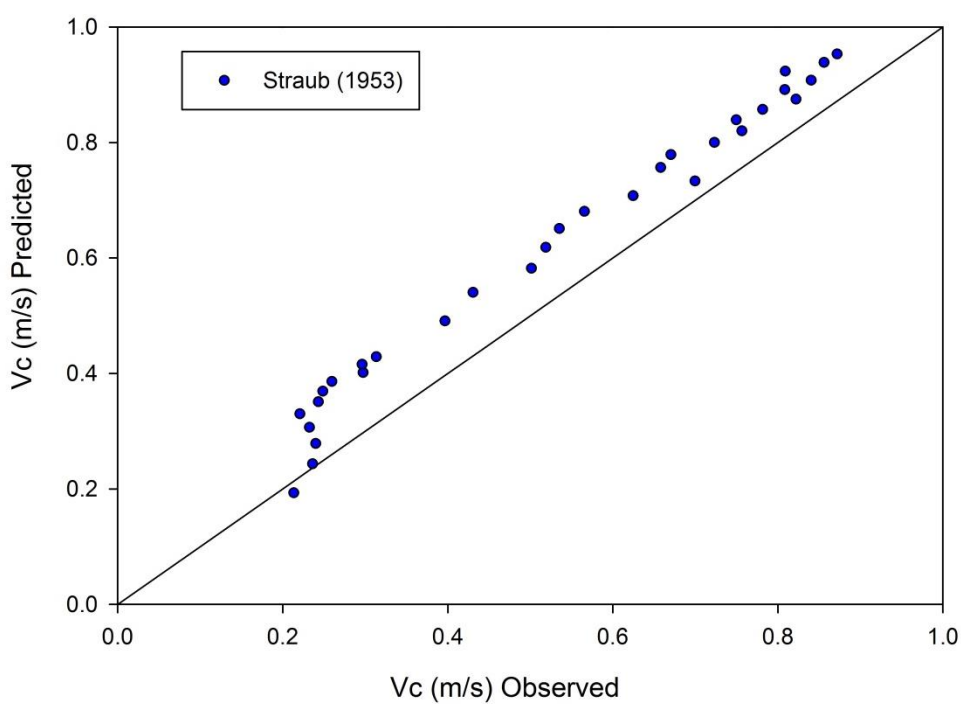


شکل ۴-۴۴ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱۸-۴

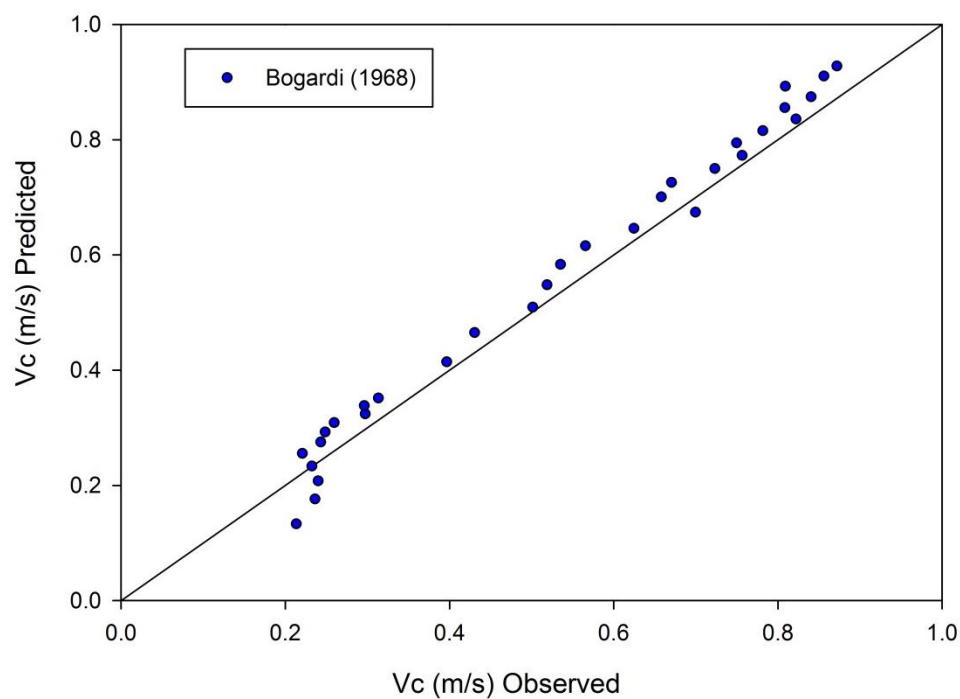
¹ Root Mean Square Error



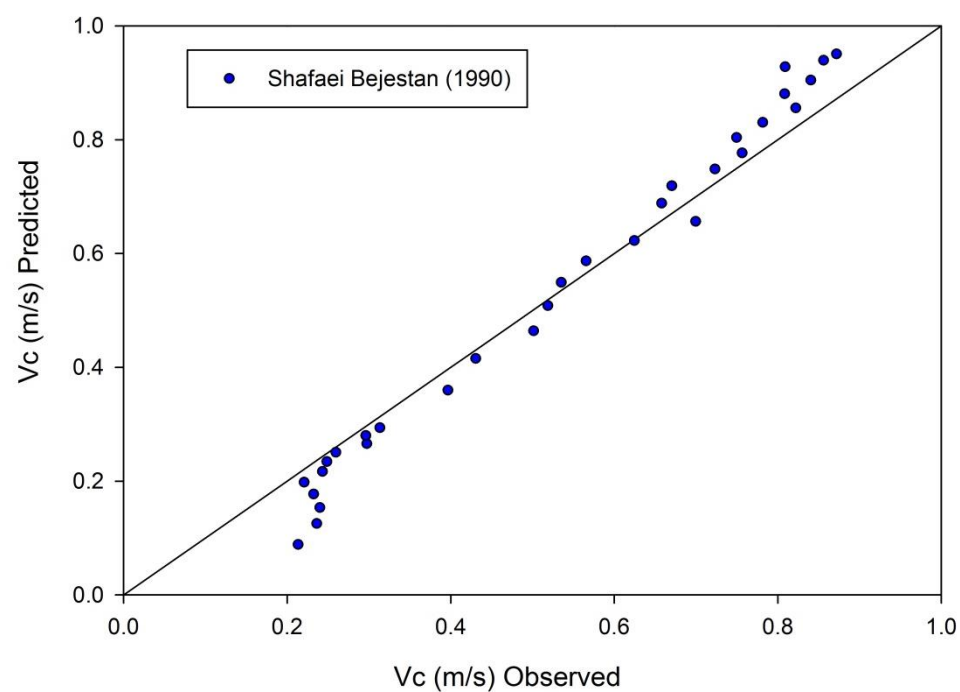
شکل ۴-۴۵ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت پیش‌بینی شده توسط رابطه ۴-۱۹



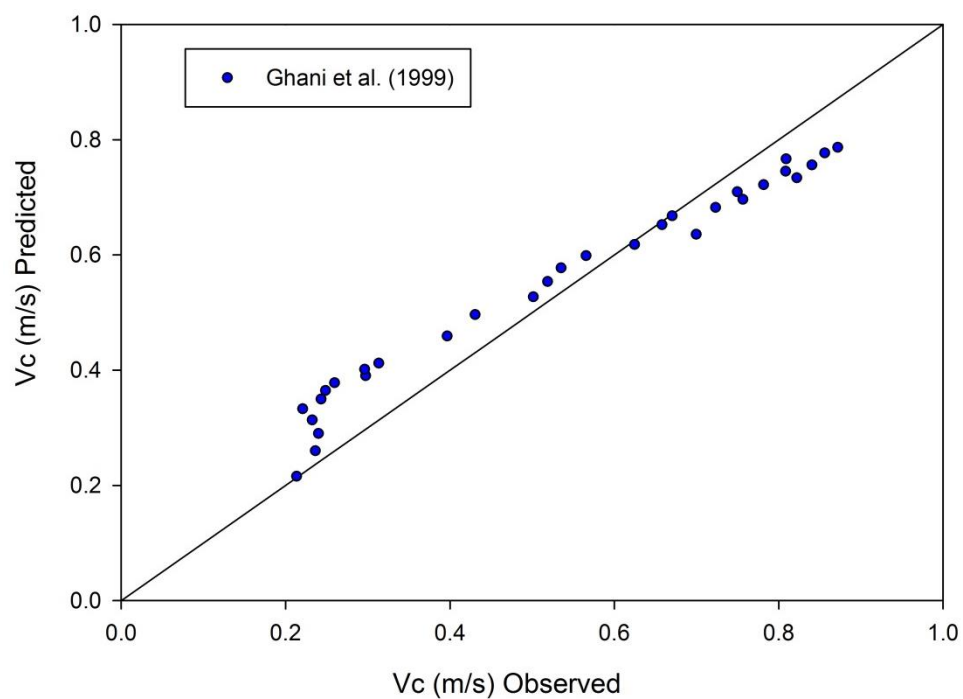
شکل ۴-۴۶ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Straub



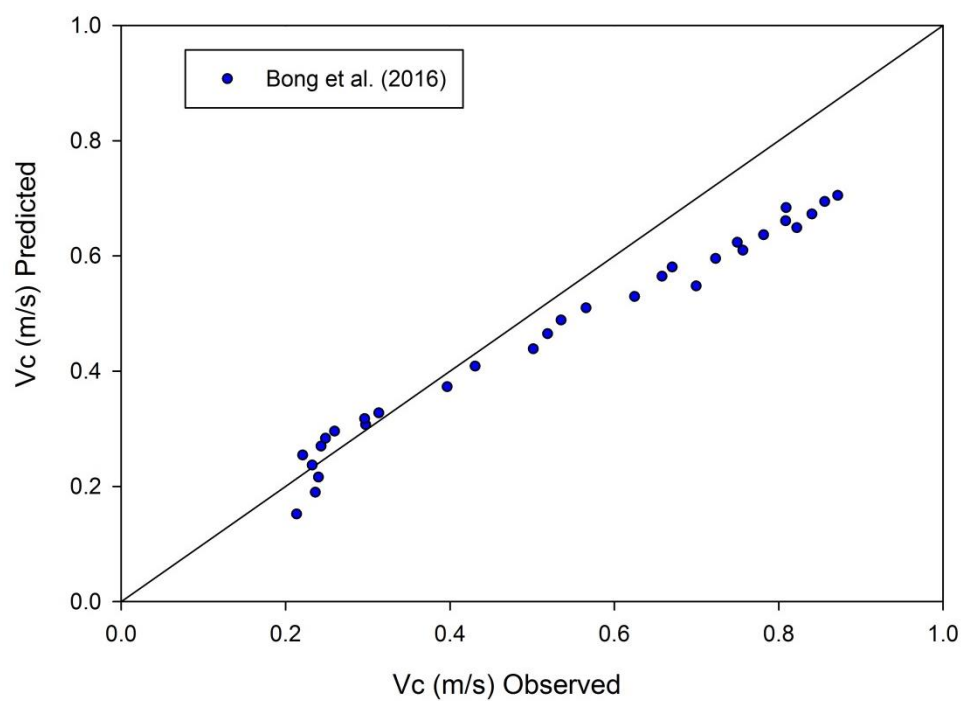
شکل ۴-۴۷ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Bogardi



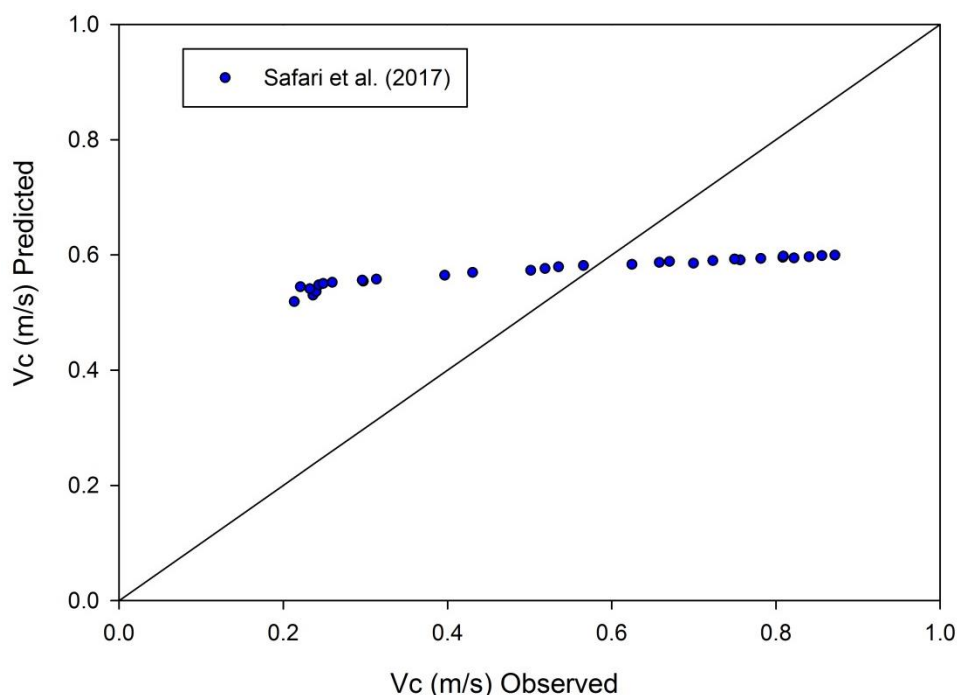
شکل ۴-۴۸ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Shafaei Bejestan



شکل ۴-۴۹ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Ghani و همکاران



شکل ۴-۵۰ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Bong و همکاران



شکل ۴-۵۱ مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت رابطه‌ی Safari و همکاران

در طراحی بسیاری از سازه‌های آبی و ابنیه‌های فنی موردنیاز در عملیات آب‌خیزداری، به خصوص شاخه مهندسی رودخانه، داشتن اطلاعات صحیح از آورد رسوبی رودخانه‌ها و دبی جریان، از اهمیت خاصی برخوردار است. هر چند با وجود مطالعات و تحقیقات زیادی که تاکنون بر روی محاسبه دبی رسوبات رودخانه‌ای به عمل آمده، برآورد دقیقی ارائه نشده است. به دلیل استفاده از مدل برخورد تصادفی در شبیه‌سازی برخورد بین ذرات رسوب در این پژوهش از روش انیشتین برای محاسبه انتقال بار بستر و مقایسه با نتایج مدل عددی استفاده شده است. طبق رابطه‌ی انیشتین دبی بار بستر از معادله‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\left(\frac{0.143}{\theta}\right)^{-2}}^{\left(\frac{0.143}{\theta}\right)^{-2}} e^{-t^2} dt = \frac{43.5 q_b^*}{1 + 43.5 q_b^*} \quad ۲۰-۴$$

در این رابطه θ پارامتر شیلدز و q_b^* دبی بی‌بعد بار بستر بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{\Delta g D D}} \quad ۲۱-۴$$

که در آن q_b دبی بار بستر می‌باشد. برای محاسبه دبی بار بستر بعد از آستانه حرکت ذرات رسوب با شمارش تعداد ذرات رسوب عبوری از مقطع مورد نظر میزان دبی بار بستر در مدل عددی در محدوده‌ی بستر زبر محاسبه و با رابطه‌ی انیشتین مقایسه شده که نتایج آن در جدول ۴-۶ تشریح شده است:

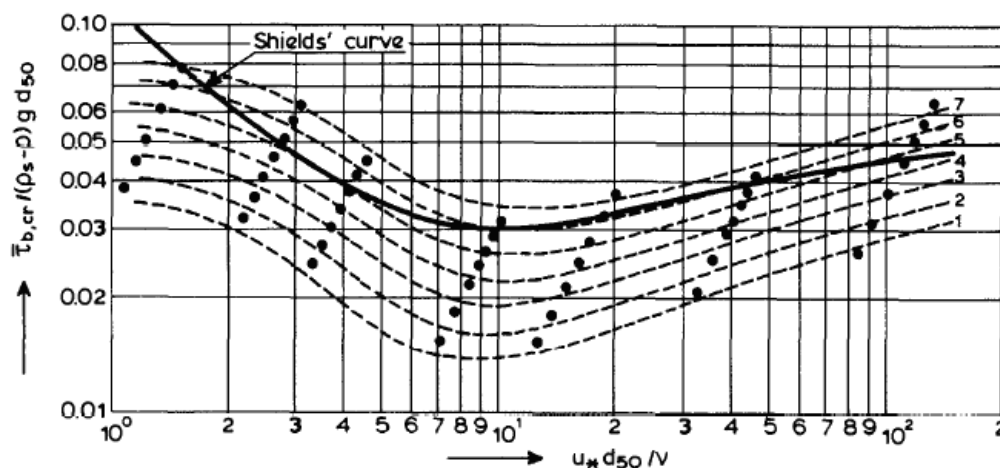
جدول ۴-۶ مقایسه نتایج دبی بار بستر به دست آمده از مدل عددی در مقایسه با رابطه‌ی انیشتین

پارامتر شیلدز	q_b^* (مدل عددی)	q_b^* (رابطه انیشتین)	درصد خطا
۰.۰۴۳۳۶	۰.۰۰۰۵۱۷	۰.۰۰۰۷۸	۳۳.۷
۰.۰۴۶۵۵	۰.۰۰۱۳۵	۰.۰۰۱۶۲	۱۷.۲
۰.۰۵۱۷۹	۰.۰۰۲۹۵	۰.۰۰۳۶۳	۱۸.۸
۰.۰۵۸۶۶	۰.۰۰۶۲۵	۰.۰۰۸۶۴	۲۷.۷

۴-۸-۲- بررسی معیارهای مختلف آستانه حرکت ذرات

همان‌طور که ذکر گردید معیار آستانه حرکت در پژوهش حاضر و اکثر تحقیقات مشابه انجام شده حالت چهارم روش Kramer بوده که روشی کیفی برای تعریف آستانه حرکت می‌باشد. علاوه بر دو روش تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی معیارهای کمی دیگری نیز برای بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب وجود دارد. جهت مقایسه‌ی کمی نتایج آستانه حرکت به دو معیار انتقال رسوب مشاهدات بر اساس دیاگرام Hydraulics Delft [۶۹] و تعداد ذرات متحرک در واحد سطح بر مبنای دیاگرام Graf and Pazis [۷۰] پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است مبنای دو معیار مذکور روش تنش برشی بحرانی و روابط حاکم بر آن می‌باشد.

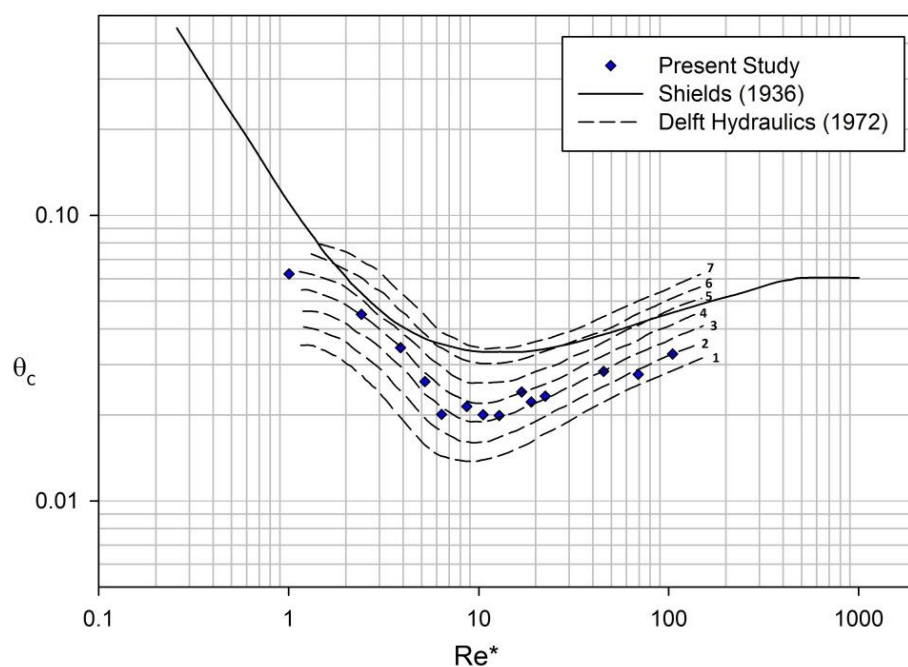
در ادامه با استفاده از دیاگرام Hydraulics Delft به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب پرداخته شده است. در این معیار عدد رینولدز ذرات بین یک تا ۱۵۰ بوده و حرکت ذرات به هفت حالت مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. این هفت حالت شامل ۱- حرکت اتفاقی ذره در برخی موقعیت‌ها، ۲- حرکت مکرر ذره در برخی موقعیت‌ها، ۳- حرکت مکرر ذره در بیشتر موقعیت‌ها، ۴- حرکت مکرر ذره در تقریباً همه‌ی موقعیت‌ها، ۵- حرکت مکرر ذره در همه‌ی موقعیت‌ها، ۶- حرکت دائمی ذره در همه‌ی موقعیت‌ها، ۷- انتقال عمومی (آستانه رپل‌ها) می‌گردد. تعاریف مذکور محدوده‌ی عدم حرکت ذرات در هر نقطه تا انتقال کلی را پوشش می‌دهد که این مراحل به‌صورت مشاهده‌ای به‌دست آمده است (شکل ۴-۵۲).



شکل ۴-۵ آستانه حرکت ذرات رسوب طبق معیار Hydraulics Delft

در شکل ۴-۵ نتایج به دست آمده از مدل عددی در محدوده‌ی عدد رینولدز یک تا ۱۵۰ به همراه دیاگرام شیلدز و تقسیم‌بندی Hydraulics Delft نشان داده شده است. مطابق شکل مشهود است آستانه‌ی حرکت با معیار Shields منطبق بر حالات پنج و شش روش Hydraulics Delft می‌باشد. این موضوع مؤید آن است که آستانه‌ی حرکت طبق معیار Hydraulics Delft (منحنی شماره‌ی ۷) در جریان با تنش برشی بیشتری نسبت به دیاگرام Shields اتفاق خواهد افتاد.

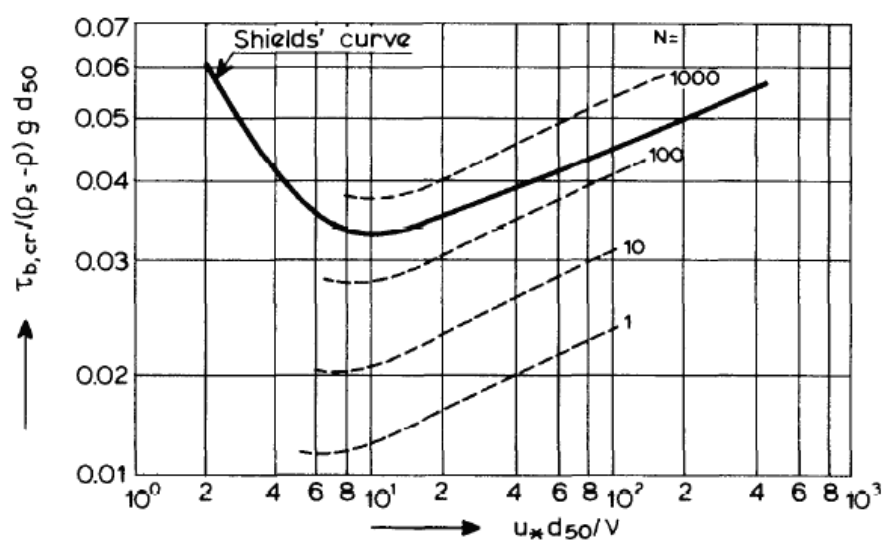
همچنین نتایج مدل عددی نشان می‌دهد در ناحیه‌ی جریان با بستر صاف طبق معیار مذکور، حرکت ذرات در حالت چهار رخ داده که بیانگر حرکت مکرر ذره در تقریباً همه‌ی موقعیت‌ها می‌باشد. برای ناحیه‌ی بینابین حرکت ذرات متغیر در حالات دو تا چهار اتفاق افتاده که طبق معیار مذکور نشان‌دهنده‌ی حرکت مکرر ذره در برخی موقعیت‌ها تا حرکت مکرر ذره در تقریباً همه‌ی موقعیت‌ها است. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که آستانه حرکت در روش ارائه شده توسط Delft Hydraulics نسبت به دیاگرام Shields با سرعت بیشتری رخ داده و به همین دلیل نتایج مدل عددی در حالات میانی این معیار قرار گرفته است.



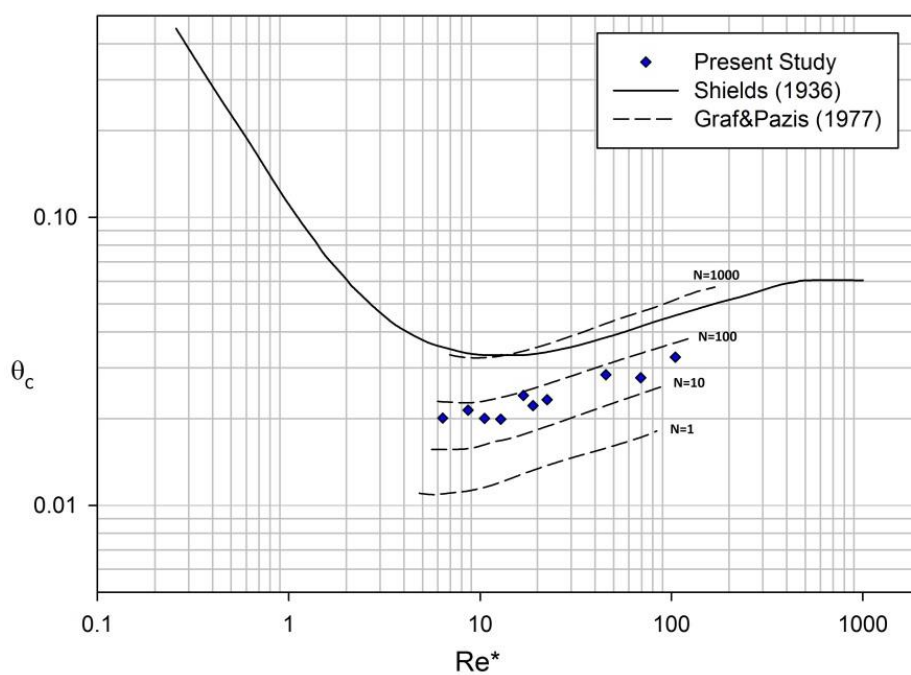
شکل ۴-۵ مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Hydraulics Delft

Graf and Pазis با استفاده از معیار تعداد ذراتی که از واحد سطح در واحد زمان ترک موقعیت می‌کنند، چهار تقسیم‌بندی انجام داده‌اند. این تقسیم‌بندی‌ها شامل تعداد ذراتی است که در اعداد رینولدز مختلف، ذرات به آستانه‌ی حرکت می‌رسند. در مطالعات آن‌ها تعداد ذرات متحرک در واحد سطح یک، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ذره بوده و محدوده‌ی عدد رینولدز ذرات در این روش بین ۵ تا ۱۰۰ می‌باشد. دیاگرام شیلدز در محدوده‌ی عدد رینولدز پنج الی ۲۰ منحنی مربوط به ۱۰۰۰ ذره را پوشش داده و با افزایش عدد رینولدز مطابق نمودار تعداد ذرات متحرک از ۱۰۰۰ ذره فاصله گرفته و کاهش می‌یابد (شکل ۴-۵).

شکل ۴-۵ نتایج به‌دست آمده توسط مدل عددی را در مقایسه با دیاگرام شیلدز و معیار تعداد ذرات متحرک در واحد سطح نشان می‌دهد. مطابق شکل تعداد ذرات متحرک بین ۱۰ و ۱۰۰ بوده که منطبق بر نتایج مدل عددی می‌باشد. لازم به ذکر است با کاهش قطر و در نتیجه عدد رینولدز، تعداد ذرات بیشتری در واحد سطح قرار گرفته و تحت اثر جریان به دلیل کاهش نیروی مقاوم، ذرات بیشتری در آستانه حرکت جابجا می‌شوند. از طرفی در محدوده‌ی نمودار Graf and Pазis با کاهش عدد رینولدز پارامتر شیلدز بحرانی کاهش یافته که سبب می‌گردد ذرات تحت سرعت کمتری به آستانه‌ی حرکت برسند. مجموع این دو عامل سبب شده تعداد ذرات متحرک در واحد سطح و زمان تغییر چندانی نداشته باشد.



شکل ۴-۵۴ آستانه حرکت ذرات رسوب طبق معیار Graf and Pазis



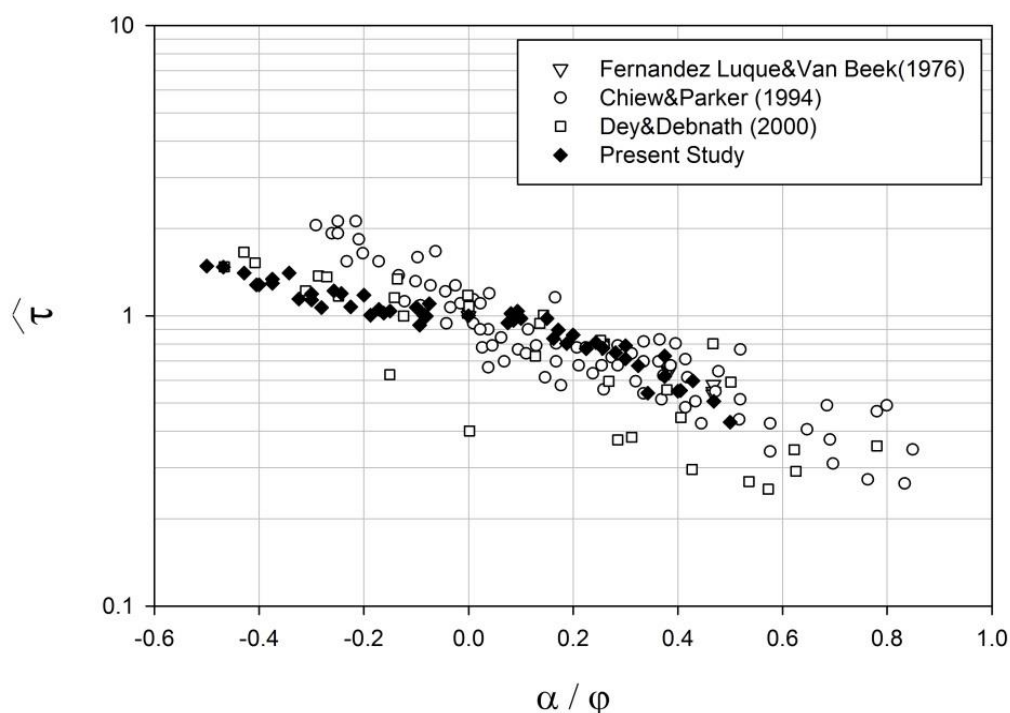
شکل ۴-۵۵ مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Graf and Pазis

۴-۸-۳- بررسی اثر شیب طولی بستر روی شیلدز بحرانی

تاکنون تحقیقات زیادی به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی تأثیر شیب طولی بستر بر آستانه حرکت ذرات رسوب صورت گرفته است. با بررسی نیروهای وارد بر ذره رسوب در کف آبراهه، می توان دریافت که با افزایش شیب بستر، مؤلفه نیروی وزن در راستای حرکت ذره بیشتر شده و بنابراین ذره رسوب با سهولت بیشتری شروع به حرکت می نماید. به عبارتی افزایش شیب طولی بستر سبب می گردد تنش برشی بحرانی و در نتیجه پارامتر شیلدز بحرانی کاهش یابد.

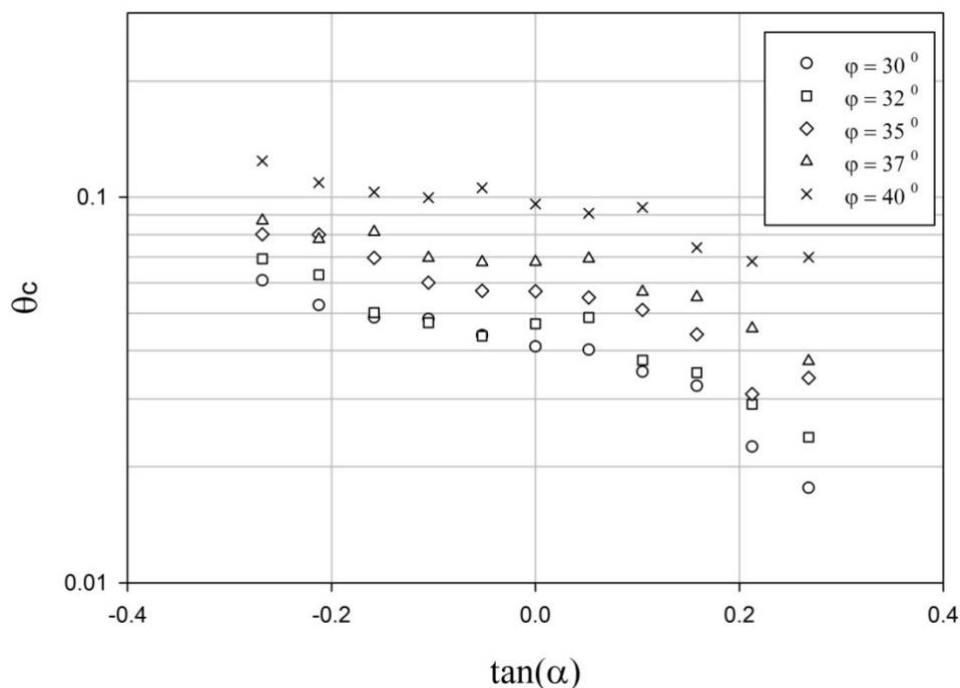
لازم به ذکر است در تحقیق حاضر اثر اعمال شیب از طریق هندسه مسئله به مدل تحمیل نشده و این کار از طریق تغییر شتاب ثقل صورت گرفته است. به عنوان مثال برای ایجاد شیب طولی بستر به میزان α به بردار شتاب ثقل در راستای طولی که تاکنون در بستر افقی برابر صفر بوده است، مقدار $g \sin(\alpha)$ اعمال می شود.

اگر شیلدز بحرانی ذرات رسوب در بستر افقی با θ_c و شیلدز بحرانی ذرات در بستر شیبدار با $\theta_{c\alpha}$ نشان داده شود، آنگاه $\hat{\tau} = \frac{\theta_{c\alpha}}{\theta_c}$ تعریف می گردد. در شکل ۴-۵۶ تغییرات نسبت زاویه شیب بستر به زاویه ایستایی (α/φ) در برابر $\hat{\tau}$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است پارامتر شیلدز بحرانی وابسته به عدد رینولدز ذره بوده و در نتایج حاضر از پارامتر شیلدز بحرانی مربوط به ناحیه با بستر زبر ($Re^* > 400$) جهت محاسبه $\hat{\tau}$ استفاده شده است. در شیبهای منفی نتایج Chiew and parker [21] دارای $\hat{\tau}$ بیشتری بوده و نتایج پژوهش حاضر منطبق بر نتایج Dey and Debnath [22] شده است. در شیبهای مثبت پراکندگی داده ها بیشتر بوده اما می توان مشاهده کرد نتایج مدل عددی به نتایج محققین دیگر نزدیک می باشد.



شکل ۴-۵۶ تغییرات α/φ در مقابل پارامتر $\hat{\tau}$

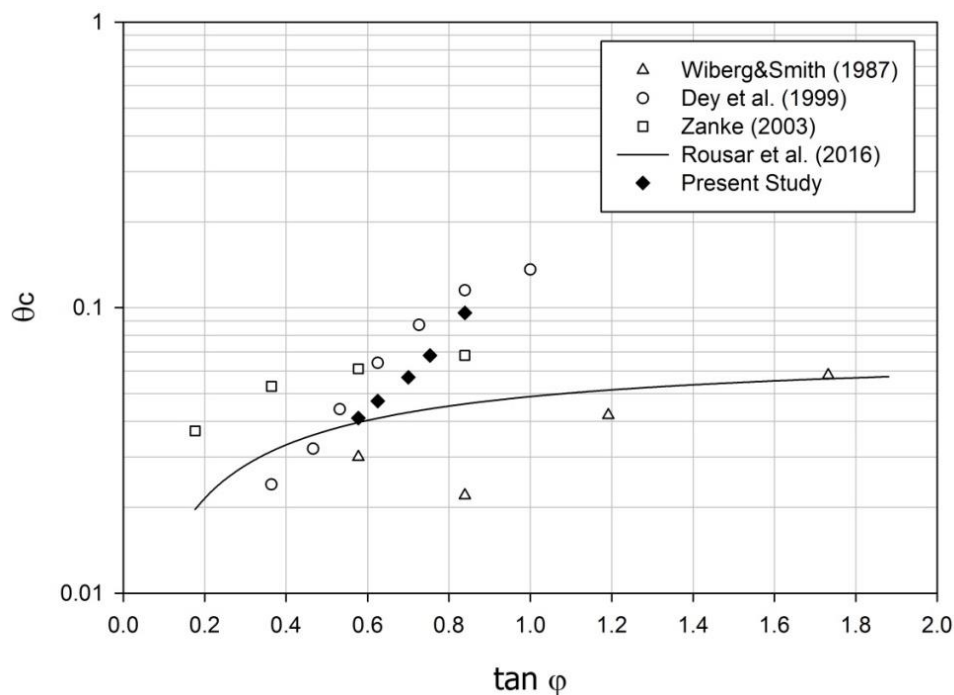
در شکل ۴-۵۷ اثر شیب طولی بستر در برابر پارامتر شیلدز بحرانی در زوایای سکون مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل در همه زوایا با افزایش زاویه ایستایی ذرات، شیلدز بحرانی افزایش می‌یابد. در ذرات رسوب با زاویه ایستایی ۳۰ درجه با افزایش شیب طولی بستر از صفر به ۱۵ درجه، شیلدز بحرانی حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد شیب ۱۵- درجه سبب افزایش ۵۰ درصدی پارامتر شیلدز بحرانی نسبت به بستر افقی می‌گردد. با افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب، اثر افزایش یا کاهش شیلدز بحرانی در شیب‌های مثبت و منفی کاهشی شده و اثر شیب طولی بستر را متعادل می‌کند. به عنوان نمونه در ذرات رسوب با زاویه ایستایی ۴۰ درجه، افزایش شیب طولی به میزان ۱۵ درجه سبب کاهش تقریباً ۲۵ درصدی شیلدز بحرانی نسبت به بستر افقی می‌شود در حالی که کاهش شیلدز بحرانی برای شیب ۱۵ درجه نسبت به بستر افقی در زاویه ایستایی ۳۰ درجه حدود ۶۰ درصد بوده است. در بستر با شیب معکوس نیز با ایجاد شیب ۱۵- درجه برای زاویه ایستایی ۴۰ درجه شیلدز بحرانی ۳۰ درصد افزایش یافته که در مقایسه با زاویه ایستایی ۳۰ درجه (افزایش ۵۰ درصدی) روند کاهشی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۷ تغییرات شیب طولی بستر در مقابل پارامتر شیلدز بحرانی در زوایای سکون مختلف

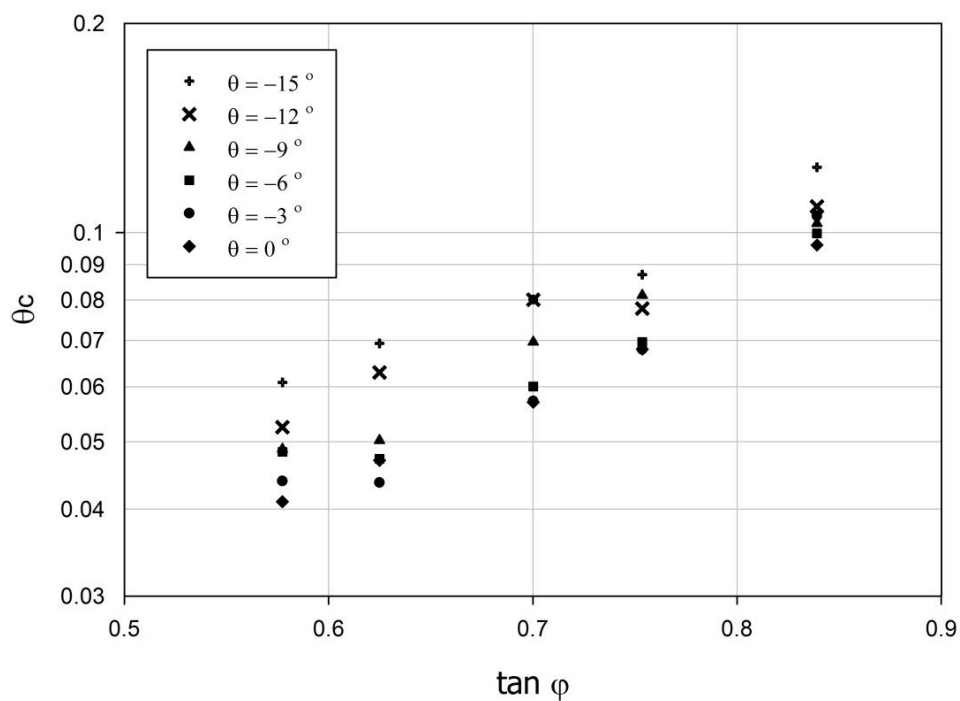
۴-۸-۴ - بررسی اثر زاویه ایستایی ذرات رسوب بر شیلدز بحرانی

در شکل ۴-۵۸ اثر زاویه ایستایی ذرات رسوب بر شیلدز بحرانی در بستر زبر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج محققین مختلف دارای پراکندگی بوده و اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. محدوده تغییرات زاویه ایستایی در این پژوهش بین ۳۰ تا ۴۰ درجه بوده و با افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب در این بازه، شیلدز بحرانی به مقدار ۱۳۵ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش زاویه ایستایی ذرات، روند رشد شیلدز بحرانی شدت بیشتری یافته در حالی که در نتایج محققین دیگر این موضوع دیده نمی‌شود. نتایج پژوهش حاضر بیشترین تطابق را با نتایج Dey و همکاران داشته و اختلاف نتایج به‌طور میانگین برابر ۲۰ درصد می‌باشد.

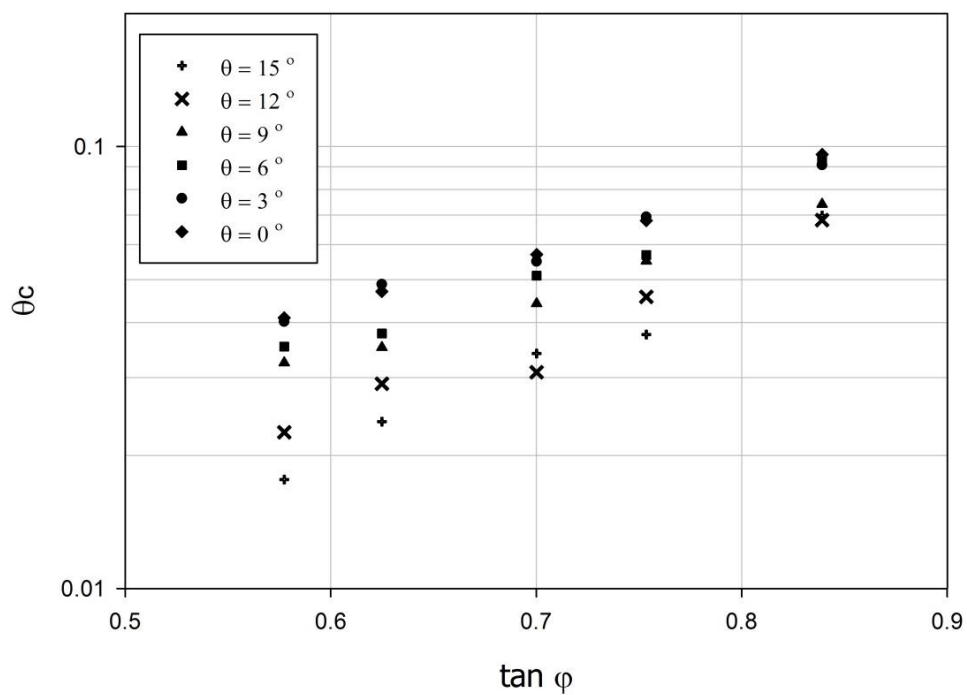


شکل ۴-۵۸ تغییرات زاویه ایستایی ذرات در مقابل شیلدز بحرانی در مقایسه با نتایج محققین دیگر

در شکل ۴-۵۹ و شکل ۴-۶۰ تغییرات زاویه ایستایی ذرات رسوب در برابر شیلدز بحرانی برای زوایای شیب طولی بستر منفی و مثبت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در همه شیب‌های مثبت و منفی با افزایش زاویه‌ی سکون ذرات رسوب، شیلدز بحرانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه ایستایی از ۳۰ به ۴۰ درجه در شیب ۱۵ درجه، شیلدز بحرانی حدوداً سه برابر می‌شود. این در حالی است که افزایش زاویه ایستایی ذرات در شیب ۱۵- درجه سبب افزایش دو برابری شیلدز بحرانی می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب در شیب‌های مثبت در مقایسه با شیب‌های منفی تأثیر بیشتری روی افزایش شیلدز بحرانی می‌گذارد.



شکل ۴-۵۹ تغییرات شیلدز بحرانی در مقابل تغییرات زاویه ایستایی برای شیب‌های منفی



شکل ۴-۶۰ تغییرات شیلدز بحرانی در مقابل تغییرات زاویه ایستایی برای شیب‌های مثبت

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

با توجه به اینکه پژوهش حاضر در زمینه‌ی شبیه‌سازی انتقال بار بستر در شرایط جریان آشفته با در نظر گرفتن برخورد ذرات لاگرانژی می‌باشد، فصل‌های گذشته و نحوه‌ی چیدمان آن‌ها به گونه‌ای بوده که مطالب پیوستگی لازم را برای بیان هدف پژوهش داشته باشند. برای این منظور در سه فصل ابتدایی، کلیات و تعاریف موردنیاز، مطالعات مرتبط انجام شده در گذشته و معادلات و روابط حاکم بر پدیده‌ی مورد بررسی ذکر گردید. در فصل چهارم نیز نحوه‌ی مدل‌سازی، صحت‌سنجی و نتایج مدل عددی در غلتش و جهش یک ذره‌ی رسوب و همچنین حرکت گروهی ذرات بیان شد که در ادامه نتایج مهم گرفته شده از پژوهش به صورت مختصر ارائه می‌شود.

۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

❖ در تحقیق حاضر با رویکرد اویلری-لاگرانژی به شبیه‌سازی حرکت گروهی ذرات رسوب پرداخته شده به این صورت که فاز پیوسته به صورت اویلری و با استفاده از روش حجم محدود و فاز گسسته به صورت لاگرانژی و با استفاده از روش ردیابی ذرات مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی جریان سیال، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد با ضرایب پیش‌فرض استفاده شده است.

❖ نرم‌افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر OpenFOAM و حلگر DPMFoam بوده که با توجه به ویژگی‌های خود، یکی از حلگرهای مناسب برای شبیه‌سازی ذرات رسوب می‌باشد. این حلگر با رویکرد اویلری-لاگرانژی معادلات فاز رسوب-جامد را با استفاده از معادلات ناویر استوکس که در فصل سوم تشریح شد، حل کرده و حرکت ذرات نیز با استفاده از قانون دوم نیوتون و معادلات روش المان مجزا دنبال می‌کند. نیروهای رایج برای در نظر گرفتن اندرکنش فاز جامد و سیال شامل نیروهای درگ، شناوری، گرادیان فشار، وزن، جرم افزوده، بست و لیفت می‌باشد که بسته به هر مسئله می‌توان از نیروهای کم‌اهمیت صرف‌نظر کرد.

❖ مدل تهیه شده دارای قابلیت کوپلینگ چهارجهته می‌باشد که در آن اثر سیال روی ذره، اثر ذره روی سیال و تأثیر برخورد ذرات به یکدیگر در نظر گرفته شده است. همچنین مدل حاضر قطر همه‌ی ذرات مورد بررسی را یکسان در نظر گرفته و قابلیت ایجاد ذرات با قطرهای

متفاوت و یا طبق منحنی دانه‌بندی را دارا نمی‌باشد. برای در نظر گرفتن برخورد ذرات از مدل برخورد تصادفی استفاده شده که نسبت به مدل برخورد کره‌ی نرم دارای هزینه‌ی محاسباتی بسیار کمتری می‌باشد.

❖ برای بررسی ابعاد بهینه مش‌بندی، یکی از مدل‌های تحقیق انتخاب و با شبکه‌بندی‌های مختلف اجرا شد. در نهایت با بررسی دقت و هزینه‌ی محاسباتی شبکه‌ی M5 با ابعاد ۰.۰۷۵ متر به عنوان ابعاد بهینه‌ی مش‌بندی برای ادامه مدل‌سازی انتخاب گردید.

❖ برای اطمینان از صحت عملکرد کد، دو صحت‌سنجی انجام گرفت. در صحت‌سنجی اول پروفیل سرعت جریان روی بستر زبر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده از مدل عددی با پروفیل سرعت لگاریتمی و نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت که اختلاف نتایج در حد قابل قبولی بوده است. در صحت‌سنجی دوم نیز برای بررسی نیروهای وارد بر ذرات، سرعت سقوط یک ذره در سیال ساکن مورد بررسی و نتایج با پژوهش آزمایشگاهی و سرعت تحلیلی مقایسه گردید.

❖ در ادامه غلتش یک ذره از جنس شیشه و فولاد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد سرعت جریان در بازه ۰.۱ تا ۰.۲۸ متر بر ثانیه سبب به وجود آمدن غلتش یک ذره‌ی شیشه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر شده و برای سرعت‌های بیشتر جریان ذره از حالت غلتش خارج می‌شود. چنین سرعت جریانی سبب سرعت ذره‌ی شیشه‌ای بین ۰.۰۴ تا ۰.۱۳ متر بر ثانیه می‌شود. همچنین سرعت جریان در بازه ۰.۳ تا ۰.۵ متر بر ثانیه سبب به وجود آمدن غلتش یک ذره‌ی فولادی با قطر ۶ میلی‌متر شده و برای سرعت‌های بیشتر جریان ذره از حالت غلتش خارج می‌شود. این محدوده سرعت جریان سبب حرکت ذره‌ی فولادی در محدوده بین ۰.۰۶ تا ۰.۱۸ متر بر ثانیه می‌شود.

❖ در غلتش یک ذره نیروی درگ در طول مسیر حرکت ذره متغیر بوده و تغییرات آن بین ۴۰ تا ۷۰ درصد نیروی شناوری می‌باشد. این در حالی است که نیروی لیفت در محدوده‌ی بین ۵ تا ۷ درصد نیروی شناوری تغییر کرده و عملاً سهم ناچیزی از نیروهای وارد به ذره را دارا می‌باشد.

❖ در بخش بعدی جهش یک ذره‌ی شیشه‌ای و فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در ذره‌ی شیشه‌ای به قطر ۶ میلی‌متر برای وارد شدن ذره به فاز جهش محدوده سرعت جریان باید بین ۰.۳ تا ۰.۶۵ متر بر ثانیه باشد و اعمال این محدوده سرعت جریان سبب حرکت ذره در

بازه‌ی سرعت متوسط ۰.۲ تا ۰.۶۵ متر بر ثانیه می‌گردد. در ذره‌ی فولادی محدوده سرعت جریان برای جدا کردن ذره از بستر و ورود به حالت جهش بین ۰.۵ تا ۰.۸ متر بر ثانیه بوده که این محدوده سرعت جریان منجر به سرعت ذره در بازه‌ی ۰.۴۵ تا ۱.۱ متر بر ثانیه می‌شود.

❖ عمده ارتفاع جهش‌های رخ داده در فاصله‌ی مورد بررسی بین یک تا دو برابر قطر ذره بوده و طول جهش‌ها نیز بین ۱۰ تا ۱۵ برابر قطر ذره می‌باشد. همچنین مشاهده گردید جهش‌های ابتدایی طول و ارتفاع بیشتری را نسبت به جهش‌های بعدی دارا هستند.

❖ در جهش یک ذره به قطر ۴ میلی‌متر، محدوده تغییرات سرعت افقی ذره‌ی متحرک در طول مسیر بین ۵ تا ۱۰ برابر سرعت برشی می‌باشد. همچنین محدوده تغییرات سرعت عمودی ذره بین ۲- تا ۲ برابر سرعت برشی بوده که البته این مقدار در جهش‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

❖ در ادامه آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب مورد بررسی قرار گرفت و نتایج طبق روش تنش برشی بحرانی نشان داد پارامتر شیلدز بحرانی برای تحقیق حاضر در محدوده رژیم بستر زبر برابر ۰.۰۴۱ بوده در حالی که این پارامتر برای آزمایش‌های شیلدز برابر ۰.۰۵۷ می‌باشد. همچنین نتایج محققان دیگر شیلدز بحرانی در محدوده‌ی ۰.۰۳ تا ۰.۰۶ را نشان می‌دهد.

❖ تحلیل نتایج طبق روش سرعت بحرانی نشان داد با افزایش پارامتر اندازه نسبی ذره عدد فرود بحرانی ذره کاهش یافته به‌طوری‌که افزایش اندازه نسبی ذره از ۰.۰۰۰۹ به ۰.۱ سبب کاهش ۶۳ درصدی عدد فرود بحرانی می‌گردد. ضرایب a و m در رابطه‌ی آستانه حرکت روش سرعت بحرانی برای تحقیق حاضر به ترتیب برابر ۱.۲۰۲ و ۰.۱۷۶ می‌باشد. همچنین رابطه‌ی زیر جهت محاسبه‌ی آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی طبق معیار روش سرعت بحرانی پیشنهاد می‌گردد:

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = \frac{2.134}{1 - 0.78e^{-287.33\frac{R}{D}}}$$

❖ آستانه حرکت ذرات رسوب علاوه بر معیارهای تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی با معیارهای ارائه شده توسط محققین دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل عددی در مقایسه با معیار Delft Hydraulics نشان می‌دهد در ناحیه‌ی جریان با بستر صاف طبق معیار مذکور، حرکت ذرات در حالت چهار رخ داده که بیانگر حرکت مکرر ذره در تقریباً همه‌ی موقعیت‌ها می‌باشد. برای ناحیه‌ی بینابین حرکت ذرات متغیر در حالات دو تا چهار

اتفاق افتاده که طبق معیار مذکور نشان‌دهنده‌ی حرکت مکرر ذره در برخی موقعیت‌ها تا حرکت مکرر ذره در تقریباً همه‌ی موقعیت‌ها است. همچنین مقایسه نتایج با معیار Graf and Pazis نشان می‌دهد تعداد ذرات متحرک بین ۱۰ و ۱۰۰ بوده که منطبق بر نتایج مدل عددی می‌باشد.

❖ با بررسی صورت گرفته روی اثر شیب طولی بستر بر شیلدز بحرانی مشخص گردید در ذرات رسوب با زاویه ایستایی ۳۰ درجه با افزایش شیب طولی بستر از صفر به ۱۵ درجه، شیلدز بحرانی حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد شیب ۱۵- درجه سبب افزایش ۵۰ درصدی پارامتر شیلدز بحرانی نسبت به بستر افقی می‌گردد. با افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب، اثر افزایش یا کاهش شیلدز بحرانی در شیب‌های مثبت و منفی کاهش یافته و اثر شیب طولی بستر را متعادل می‌کند.

❖ با بررسی صورت گرفته روی اثر زاویه ایستایی ذرات رسوب بر شیلدز بحرانی مشخص گردید با افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب در بازه‌ی ۳۰ تا ۴۰ درجه، شیلدز بحرانی به مقدار ۱۳۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زاویه ایستایی از ۳۰ به ۴۰ درجه در شیب ۱۵ درجه، شیلدز بحرانی حدوداً سه برابر می‌شود. این در حالی است که افزایش زاویه ایستایی ذرات در شیب ۱۵- درجه سبب افزایش دو برابری شیلدز بحرانی می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش زاویه ایستایی ذرات رسوب در شیب‌های مثبت در مقایسه با شیب‌های منفی تأثیر بیشتری روی افزایش شیلدز بحرانی می‌گذارد.

۵-۳- پیشنهادها

با توجه به قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل تهیه شده و تجربه‌ی به دست آمده از نتایج تحقیق حاضر برای پژوهش‌هایی که در آینده انجام خواهند شد، موضوعات زیر را می‌توان متصور گردید:

❖ یکی از محدودیت‌های مدل حاضر عدم دانه‌بندی ذرات به صورت برنامه‌نویسی شده بوده که سبب می‌شود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی یا میدانی که ذرات رسوب دارای دانه‌بندی هستند، دارای خطا گردد. برای نزدیک شدن نتایج به واقعیت و مدل‌سازی دقیق‌تر ضروری است این قابلیت به مدل عددی حاضر افزوده شود.

- ❖ مدل حاضر با در نظر گرفتن یک ترم در معادله‌ی ناویر استوکس اثر ذرات روی سیال را در نظر می‌گیرد. در تحقیق حاضر بررسی تأثیر ذرات روی جریان سیال مورد بررسی قرار نگرفته که می‌تواند موضوع مناسبی برای انجام پژوهش در آینده باشد.
- ❖ یکی از قابلیت‌های مدل‌های اویلری-لاگرانژی، شبیه‌سازی آبخستگی و رسوب‌گذاری بوده که با توسعه مدل حاضر می‌توان از آن برای بررسی آبخستگی در نواحی و سازه‌های مختلف استفاده نمود.
- ❖ با افزودن معادلات امواج به فاز اویلری می‌توان از مدل حاضر برای مدل‌سازی انتقال رسوب در سواحل نیز استفاده نمود. لازم به ذکر است برای مدل‌سازی امواج و تغییرات سطح آب باید قابلیت شبیه‌سازی سطح مشترک آب و هوا (روش VOF) به مدل فعلی افزوده گردد.

مراجع

۱. مقصودی، صادق، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "مدل‌سازی عددی دوبعدی انتقال رسوب ساحلی به‌وسیله روش هیدرودینامیک ذرات هموار" دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط‌زیست.
2. Van der Velden, E. T. J. M. (1989) "Coastal engineering volume II" Delft University of technology, 53.
۳. مهدی‌زاده، سید سجاد، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی آزمایشگاهی حرکت ذره رسوبی در نزدیکی بستر با استفاده از دستگاه PIV" دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط‌زیست.
4. Abbott, J. E., & Francis, J. R. D. (1977) "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 284(1321), 225-254.
5. Liu, Z. (2001) "Sediment transport" Aalborg Universitet, 54-56.
۶. نصرالهی، علی، (۱۳۸۹)، رساله دکتری، "شبیه‌سازی عددی انتقال بار بستر رسوب با استفاده از جریان دو فازی اویلری-لاگرانژی" دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط‌زیست.
7. Kramer, H. (1935) "Sand mixtures and sand movement in fluvial model" *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), 798-838.
8. Shields, A. (1936) "Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement"
9. Vanoni, V. A. (1975) "Sedimentation engineering" ASCE manuals and reports on engineering practices 54.
10. Shafaei Bajestan, M. (2005) "Sediment hydraulics" Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.
۱۱. اسماعیل‌زاده ش.، اسماعیلی ک. (۲۰۱۷) "مروری بر روش‌های ارائه‌شده در تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب و عوامل مؤثر بر آن" آب و توسعه پایدار، ۴(۱)، ۴۷-۵۶.
12. Novak, P., & Nalluri, C. (1975) "Sediment transport in smooth fixed bed channels" *Journal of the Hydraulics Division*, 101(ASCE# 11556 Proceeding).
13. Rottner, J. (1959) "A formula for bed load transportation" *La Houille Blanche*, 14(3), 285-307.
14. Ackers, P., & White, W. R. (1973) "Sediment transport: new approach and analysis" *Journal of the Hydraulics Division*, 99(hy11).

15. Garde, R. J., & Raju, K. R. (2000) "Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems" Taylor & Francis.
16. Bong, C. H. J., Lau, T. L., Ab. Ghani, A., & Chan, N. W. (2016) "Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion". *Water Science and Technology*, 74(8), 1876-1884.
17. Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948) "Formulas for bed-load transport" *In IAHSR 2nd meeting*, Stockholm, appendix 2. IAHR.
18. Suszka, I., & Graf, W. H. (1987) "Sediment transport in steep channels *Journal of Hydraulics science and Hydraulic Engineering*" *JSCE*, Vol. 5. No1 pp11-26.
19. Van Rijn, L. C. (1984) "Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness" *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733-1754.
20. Roušar, L., Zachoval, Z., & Julien, P. (2016) "Incipient motion of coarse uniform gravel" *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 615-630.
21. Chiew, Y. M., & Parker, G. (1994) "Incipient sediment motion on non-horizontal slopes" *Journal of Hydraulic Research*, 32(5), 649-660.
22. Dey, S., & Debnath, K. (2000) "Influence of streamwise bed slope on sediment threshold under stream flow" *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(4), 255-263.
23. Dey, S. (2003) "Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds" *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 405-415.
24. Lamb, M. P., Dietrich, W. E., & Venditti, J. G. (2008) "Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?" *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
25. Wiberg, P. L., & Smith, J. D. (1987) "Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments" *Water resources research*, 23(8), 1471-1480.
26. Zanke, U. C. E. (2003) "On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion" *International Journal of Sediment Research*, 18(1), 17-31.
27. Dey, S., Sarker, H. K. D., Debnath, K. (1999) "Sediment threshold under stream flow on horizontal and sloping beds" *Journal of engineering mechanics*, 125(5), 545-553.
28. Francis, J. R. D. (1973) "Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream" *Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), 443-471.

29. Lee, H. Y., & Hsu, I. S. (1994) "Investigation of saltating particle motions" *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7), 831-845.
30. Shams, M., Ahmadi, G., & Smith, D. H. (2002) "Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers" *Advances in Water Resources*, 25(6), 689-699.
31. Zou, S. (2007), Doctoral dissertation "Coastal sediment transport simulation by smoothed particle hydrodynamics" The Johns Hopkins University.
32. Yeganeh-Bakhtiary, A., Shabani, B., Gotoh, H., & Wang, S. S. (2009) "A three-dimensional distinct element model for bed-load transport" *Journal of Hydraulic Research*, 47(2), 203-212.
33. Shakibaeinia, A., & Jin, Y. C. (2011) "A mesh-free particle model for simulation of mobile-bed dam break" *Advances in Water Resources*, 34(6), 794-807.
34. Vetsch, D. F. (2012), Doctoral dissertation "Numerical simulation of sediment transport with meshfree methods" ETH Zurich.
۳۵. عطریان، علیرضا، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد "مدل‌سازی عددی انتقال بار بستر با ترکیب روشهای لاگرانژی LPT و اویلری VOF" دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست.
36. Stronge, W. J. (2000) "Contact problems for elasto-plastic impact in multi-body systems" *Impacts in Mechanical Systems* (pp. 189-234). Springer, Berlin, Heidelberg.
37. Oesterle, B., & Petitjean, A. (1993) "Simulation of particle-to-particle interactions in gas solid flows" *International journal of multiphase flow*, 19(1), 199-211.
38. Sommerfeld, M. (2001) "Validation of a stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence" *International Journal of Multiphase Flow*, 27(10), 1829-1858.
39. Hussmann, B., Pfitzner, M., Esch, T., & Frank, T. (2007, July) "A stochastic particle-particle collision model for dense gas-particle flows implemented in the Lagrangian solver of ANSYS CFX and its validation" *In Proceedings of the 6th International Conference on Multiphase Flows (ICMF)*, Leipzig, Germany (pp. 23-27).
40. Bialik, R. J. (2011) "Particle-particle collision in Lagrangian modelling of saltating grains" *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 23-31.
41. Ferziger, J. H., & Peric, M. (1999) "Computational Methods for Fluid Dynamic" Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

42. Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974) "The numerical computation of turbulent flows" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.
43. Nezu, I., & Rodi, W. (1986) "Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer" *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5), 335-355.
44. Schiller, L., & Nauman, A. Z. (1993) "A drag coefficient correlation" *Ver. Deut. Ing*, 77, 318-320.
45. Vallier, A. (2010), Doctoral dissertation "Eulerian and Lagrangian Cavitation Related Simulations Using OpenFOAM" Division of Fluid Mechanics, Department of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University.
46. Kloss, C., & Goniva, C. (2010, August) "LIGGGHTS—A New Open Source Dem Simulation Software" In 5th Int. Conf. on Discrete Element Methods (DEM5).
47. Zhou, Z. Y., Yu, A. B., & Choi, S. K. (2011) "Numerical simulation of the liquid-induced erosion in a weakly bonded sand assembly" *Powder Technology*, 211(2-3), 237-249.
48. ANSYS, I. (2009) "CFX-Solver Theory Guide" Release 12.1 ed.
49. Ergun, S. (1952) "Fluid flow through packed columns" *Chem. Eng. Prog.*, 48, 89-94.
50. Wen, C. Y. (1966) "Mechanics of fluidization" In *Chem. Eng. Prog.*, Symp. Ser. (Vol. 62, pp. 100-111).
51. Gidaspow, D., Bezburuah, R., & Ding, J. (1992) "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach" Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 75-82.
52. Saffman, P. G. T. (1965) "The lift on a small sphere in a slow shear flow" *Journal of fluid mechanics*, 22(2), 385-400.
53. Mei, R., & Klausner, J. F. (1994) "Shear lift force on spherical bubbles" *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 15(1), 62-65.
54. Tomiyama, A. (1998) "Struggle with computational bubble dynamics" *Multiphase Science and Technology*, 10(4), 369-405.
55. Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992) "Numerical modelling of discontinua" *Engineering computations*, 9(2), 101-113.
56. Graf, H. W. (1971) "Hydraulics of Sediment Transport" New York: McGraw-Hil.

57. Gruber, K. (2012), Doctoral dissertation “Sediment transport in open channel flows- Experimental investigation and numerical simulation of local scour development downstream of a weir” Johannes Kepler University Linz.
58. Keulegan, G. H. (1938) “Laws of turbulent flow in open channels” *National Bureau of Standards Research Paper* RP 1151, USA.
59. Grass, A. J., and Mansour-Tehrani, M. (1996) “Generalized scaling of coherent bursting structures in the near-wall region of turbulent flow over smooth and rough boundaries” *Coherent flow structures in open channels*, P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best, and S. J. McLelland, eds., Wiley, New York, 41–61.
60. Grass, A. J., Stuart, R. J., and Mansour-Tehrani, M. (1991) “Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries” *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 3361640, 33–65.
61. Defina, A. (1996) “Transverse spacing of low-speed streaks in a channel flow over a rough bed. Coherent flow structures in open channels” *P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best, and S. J. McLelland, eds.*, Wiley, New York, 87–99.
62. Grass, A. J. (1971) “Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries” *Journal of fluid Mechanics*, 50(2), 233-255.
63. Deigaard, R. (1992) “*Mechanics of coastal sediment transport (Vol. 3)*” World scientific publishing company.
64. Ando, B., Coltelli, M., Prestifilippo, M., & Scollo, S. (2010) “A lab-scale experiment to measure terminal velocity of volcanic ash” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(4), 1340-1347.
65. Ancy, C., Bigillon, F., Frey, P., & Ducret, R. (2003) “Rolling motion of a bead in a rapid water stream” *Physical review E*, 67(1), 011303.
66. Foucaut, J. M., & Stanislas, M. (1997) “Experimental study of saltating particle trajectories” *Experiments in Fluids*, 22(4), 321-326.
67. Salem, A. M. (2013, November) “The effects of the sediment bed thickness on the incipient motion of particles in a rigid rectangular channel” In Proc. 17th Int. Water Technology Conf., IWTC17, Istanbul, Turkey.
68. Gregoretti, C. (2000) “The initiation of debris flow at high slopes: experimental results” *Journal of Hydraulic Research*, 38(2), 83-88.
69. Hydraulics, D. (1972) “*Systematic investigation of two-dimensional and three-dimensional scour*” Report M648 M, 863.

70. Graf, W. H., & Pazis, G. C. (1977) “ Les phénomènes de déposition et d'érosion dans un canal alluvionnaire; érosion et déposition; un concept probabiliste” *Weak sediment transport* (No. BOOK). EPFL.

Abstract

Solid particle transport in fluid flow is a common phenomenon in nature and its most common example in hydraulic science is sediment transport in rivers. In a channel with a bed of sedimentary material, at very low flow rates the bed particles have no movement and remain in place. As the discharge increases, the bed particles begin to move, this moment is called the sediment particle movement threshold.

In this study, using a numerical model based on OpenFOAM software, two-dimensional simulation of sediment particle transport individually and collectively in turbulent flow is investigated. The approach adopted in the simulation is Eulerian-Lagrangian in which the continuous phase is simulated by Eulerian finite volume method and the sediment particles are Lagrangian and particle tracking. In the present model, the effect of fluid on particle, particle on fluid as well as the forces that precipitate sediment particles are considered. In order to consider the impact of sediment particles on each other, a sediment particle collision model is used which has lower computational cost than the existing collision model.

The parameters affecting sediment flow and particle have been verified and compared with analytical and experimental results of different researchers. Then the rotation and saltation of a sediment particle were simulated on a rough bed and the flow and particle velocities, forces applied to the particle, and the horizontal and vertical velocity of the saltation were discussed. Also the threshold of group motion of sediment particles in the form of shear stress, critical velocity and two other criteria have been compared with the results of different researchers and a relationship has been proposed for critical threshold of particle motion. Finally, the parameters affecting the critical shields, including particle Reynolds number, longitudinal bed slope and repose of angle of particles are discussed. The results of this study show that the present Eulerian-Lagrangian model has been able to simulate these phenomena with good accuracy and to be used for similar problems.

Keywords: Eulerian-Lagrangian, Sediment transport, Finite volume method, Particle tracking method, Saltation, Rolling, Threshold of motion.



Shahrood University of Technology
Department of civil Engineering
Faculty of Water & Environmental Engineering

Ph.D. Dissertation in Civil Engineering - Hydraulic Structures

**Numerical simulation of bed load transport with Eulerian-
Lagrangian approach and particle collision in turbulent
flows**

By:

Amin Noori

Supervisor:

Dr. Ramin Amini

August - 2019