

شبیه‌سازی انتقال رسوب در کانال مستقیم و آبگیر جانبی

نرگس نظری^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

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

* salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

چکیده: در این مقاله حرکت ذرات رسوب در کانال مستقیم و آبگیر جانبی بر اساس دیدگاه لاگرانژی شبیه‌سازی شده است. هدف از این مطالعه بررسی عملکرد مدل DPM در شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات رسوب و همچنین برآورد نسبت رسوب انحرافی (نسبت بار بستر ورودی به آبگیر به کانال اصلی) با استفاده از این روش است. خصوصیات جریان با استفاده از مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز در نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده است. مطالعات شامل دو بخش کلی است: در بخش اول به منظور بررسی صحت عملکرد مدل، مسیر حرکت ذره در کانال مستقیم شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج عددی حاصل با داده‌های آزمایشگاهی که به همین منظور برداشت شده است، صحت شبیه‌سازی عددی را تایید می‌کند. در بخش دوم الگوی حرکت رسوبات در آبگیر جانبی از مسیر مستقیم به صورت کیفی و کمی بررسی شد و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شد. بررسی الگوی حرکت رسوبات، نشان‌دهنده تشکیل ناحیه‌ای گوه‌ای شکل در دهانه آبگیر می‌باشد. همچنین نسبت رسوب انحرافی در مدل‌سازی عددی به صورت دست‌بالا تخمین زده شده است.

واژگان کلیدی: رسوب، ذره، دیدگاه لاگرانژی، فلوئنت، آبگیر جانبی

۱- مقدمه

عملکرد سیستم با مشکل مواجه شود. از این رو شناخت مکانیسم و بررسی فرآیند انتقال رسوب به آبگیر دارای اهمیت فراوان است و در کنترل و ارائه راهکارهای کاهش رسوب ورودی به آبگیر موثر است.

بار رسوبی کف به دو دسته بار بستر و معلق تقسیم می‌شود. بار بستر به عنوان بخشی از بار مصالح کف در نظر گرفته شده‌است که متناوباً با کف در تماس است. برای توصیف بار بستر پژوهشگران مختلف تعاریفی ارائه کرده‌اند که گاهی دارای تفاوت‌هایی با یکدیگر است. اما در بیشتر منابع موجود بار بستر شکلی از انتقال تعریف شده که بیشتر تحت تاثیر نیروی گرانش است و آثار آشفتگی از مرتبه دوم اهمیت برخوردار است. در مقابل آشفتگی بر مسیر حرکت ذرات در انتقال بار معلق نقش قابل توجهی دارد [۲].

نرخ انتقال و توزیع رسوب در رودخانه‌ها از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی دارای اهمیت فراوان است. کیفیت نامناسب آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، تغییر مورفولوژی مرزهای محیط زیست‌های آبی، خرابی تجهیزات تامین آب، رسوب‌گذاری در مخزن سدها، کانال‌های کشتیرانی و آبگیرهای جانبی از جمله دلایلی است که لزوم درک صحیحی از فرآیند انتقال رسوب را نشان می‌دهد [۱]. بحث رسوب یکی از مسائل مطرح در آبیگری از رودخانه‌ها است. در آبیگری از رودخانه‌ها معمولاً آب بدون رسوب مورد نیاز است، در حالی‌که جریان در رودخانه حاوی رسوب است، و اگر کل رسوبات همراه جریان وارد سیستم آبگیر شود، ممکن است با رسوب‌گذاری در سیستم آبگیر و داخل کانال‌ها،

از آنجا که انتقال ذرات رسوب در جریان یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین مسائل دینامیک سیالات است [۳]، با وجود سال‌ها مطالعه به وسیله مهندسين و مورفولوژیست‌های رودخانه و انجام پژوهش‌های فراوانی با هدف درک رفتار رسوب و ارائه دیدگاه‌های متفاوتی برای حل مسائل آن [۴ الی ۹]، هنوز رابطه بین نرخ جریان و انتقال رسوب حتی برای شرایط ساده جریان نیز کاملاً شناخته شده نیست [۱].

بیشتر مطالعات اولیه در مسئله انتقال رسوب با هدف به دست آوردن روابط نیمه تجربی انجام شده است. اگرچه مدل‌های نیمه تجربی به شکل گسترده‌ای در طراحی‌های مهندسی و در پیش‌بینی تغییرات ریخت شناسی کف به کار می‌رود، اما با توجه به این که بیشتر این روابط براساس داده‌های میدانی و آزمایشگاهی و در شرایط هیدرولیکی محدود به دست آمده‌اند، محدوده کاربرد این روابط روشن نیست [۷].

از سوی دیگر محدودیت تکنولوژی اندازه‌گیری، مطالعه جزئیات جریان‌های رسوبی را با مشکل روبرو می‌سازد. بنابراین با توجه به توسعه کامپیوتر در دهه‌های اخیر و همچنین مشکلات مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌سازی عددی یکی از راه‌های مفید به منظور درک کامل مکانیسم انتقال رسوب می‌باشد [۸].

در این میان پژوهشگران علم رسوب به لزوم استفاده از مدل‌های دو فازی در شناخت مکانیسم انتقال رسوب اشاره می‌کنند [۸]. در برخورد با جریان‌های دو فازی دو دیدگاه کلی وجود دارد: دیدگاه اولری و دیدگاه لاگرانژی. در دیدگاه لاگرانژی انتگرال‌گیری روی مسیر حرکت ذرات (آب و رسوب) انجام می‌گیرد و جرم انتقالی براساس رفتار تمام ذرات به دست می‌آید، ولی در دیدگاه اولری با مجموعه ذرات به عنوان یک سیال برخورد می‌شود. اگرچه هر دو فاز سیال و ذره می‌توانند بر اساس دیدگاه‌های اولری و لاگرانژی توصیف شوند، اما برای توصیف فاز جریان بیشتر از دیدگاه اولری استفاده می‌شود.

در مدل‌های اولری-لاگرانژی، معادله حاکم بر فاز

منفصل (ذره) همان معادله حرکت ذره است و شتاب، سرعت و موقعیت ذره تحت تاثیر نیروهای موثر بر روی آن تعیین می‌شود. در این مدل‌ها ابتدا فاز پیوسته جریان با استفاده از معادلات اولری یعنی همان معادلات ناویر-استوکس حل می‌شود و سپس فاز دوم (در این مطالعه، ذرات رسوب) با استفاده از دیدگاه لاگرانژی بررسی می‌شود. بدین ترتیب که با بررسی و تعیین نیروهای موثر بر ذره و گذاشتن آن‌ها در رابطه اندازه حرکت نیوتن ($F=ma$) سرعت ذره (u_p) بدست می‌آید. با جای‌گذاری سرعت ذره در معادله $\frac{dx_p}{dt} = u_p$ ، موقعیت مکانی ذره (x_p) تعیین می‌شود [۱۰].

در مدل‌های لاگرانژی می‌توان جزئیات رفتار رسوب را مطالعه کرد، زیرا ذرات منفرد رسوب به طور مستقیم دنبال می‌شوند. با توجه به انفعال ذرات از یکدیگر و توجه خاص به درک مکانیسم حرکت آن‌ها، به منظور توصیف حرکات ذرات رسوب، مدل‌های لاگرانژی مناسب‌تر خواهند بود [۷]. در این میان نرم افزار فلوئنت با قابلیت مدل‌سازی لاگرانژی فاز ثانویه، زمینه مناسبی را برای مطالعه جریان‌های دو فازی فراهم آورده است. مروری بر مطالعات انجام شده با این روش در ادامه آورده شده است.

روش DPM در زمینه‌های مختلفی همچون مهندسی مکانیک، شیمی و محیط زیست (از قبیل بررسی فرسایش توربین [۱۱]، بررسی فرایند پالایش در یک فیلتر سرمیکی [۱۲]، بررسی نرخ ته‌نشینی ذرات در هواکش‌ها [۱۳]، جداسازی ذرات در هیدروسیکلون‌ها و نرخ ته‌نشینی ذرات در یک زانویی [۱۴]) مورد استفاده قرار گرفته است. در شمس و همکاران، در سال ۲۰۰۲ مدل‌سازی عددی انتقال رسوب در رودخانه‌های متاندردی را در دو مقیاس واقعی و آزمایشگاهی انجام دادند. در این مطالعه که با استفاده از مدل فاز ناپیوسته (DPM) انجام شده است، در مقطع خاصی در بالادست رودخانه، ذرات رسوبی به صورت یکنواخت رها شده و میزان ته‌نشینی آنها در مقطع مورد نظر در پایین دست بررسی شد.

بستر ارائه شد، حرکت ذرات رسوب هرچند دارای ماهیتی تصادفی بوده، اما با توجه به اثر کمتر آشفستگی نسبت به سایر نیروها و به منظور ساده‌سازی در این مطالعه از آن چشم‌پوشی شده و مدل‌سازی به صورت قطعی^۲ انجام شده است.

۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات ناویر-استوکس بیان ریاضی الگوی جریان سیال در طبیعت است. در این معادلات از سرعت لحظه‌ای استفاده می‌شود که با توجه به قدرت کامپیوترهای موجود در شرایط فعلی نیز، حل مستقیم آن‌ها حتی در مقیاس‌های کوچک مقرون به صرفه نیست. پس پژوهشگران فرض ساده‌کننده متوسط‌گیری زمانی را در این معادلات اعمال کرده‌اند تا متناسب با شرایط موردنظر جریان، جواب‌های قابل قبولی به دست آید. معادلات یاد شده برای سیال غیرقابل تراکم در سیستم مختصات کارتزین و در حالت متوسط‌گیری شده در زمان برای جریان‌های آشفته (معادلات رینولدز) به شکل زیر است [۲۰].

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial (-\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن U_i مولفه سرعت در جهت i ، p فشار، ν لزجت سینماتیک بوده و عبارت $-\overline{\rho u_i u_j}$ به عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شود. این معادلات شامل چهار مجهول اصلی مولفه‌های سرعت در سه جهت و فشار است. از طرفی ترم $-\overline{u_i u_j}$ شش مجهول به تعداد مجهولات اضافه می‌کند. پس سیستم معادلات فوق بسته نیست و لازم است تنش‌های رینولدز با مدل آشفستگی مناسب محاسبه شوند. در این مقاله برای مدل‌سازی آشفستگی برای به دست آوردن دقت بالاتر در مدل‌سازی انحنای خطوط جریان در محدوده آبگیر و برآورد تنش‌های غیرهمگن رینولدز از مدل آشفستگی تنش‌های رینولدز (RSM) استفاده شده است [۲۱].

در این مطالعه از اندرکنش بین ذرات و از اثر ذرات روی جریان چشم‌پوشی شده است. نتایج این مدل‌سازی به علت عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نشده است [۸].

خادمی و همکاران اثر تیغه هدایت‌کننده بر کارایی هیدرولیکی حوضچه‌های رسوبگیر شبکه آبیاری از نظر راندمان تله اندازی و طول ناحیه رسوبگذاری را با استفاده از مدل لاگرانژی فاز ناپیوسته مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه راندمان تله اندازی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی که در این زمینه انجام شده، با نتایج عددی انطباق خوبی را نشان می‌دهد [۱۵].

در سال ۲۰۰۸ اثر شکل رسوب‌گیرهای کف در افزایش کارایی آنها با استفاده از مدل DPM توسط تینگلاس و همکاران بررسی شد. در این مطالعه ذرات به صورت یکنواخت از بالادست رها شده و نتایج بدست‌آمده بصورت کیفی تحلیل شده است [۱۶]. در سال ۲۰۱۲ کاوشالی و همکاران با انجام مطالعه آزمایشگاهی به بررسی صحت نتایج مدل عددی پرداخته‌اند. براساس پژوهش‌های ایشان مدل DPM در تخمین راندمان تله اندازی دقت مناسبی دارد [۱۷].

مرور پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد در تمام مطالعات انجام‌شده در خصوص به کارگیری مدل DPM، نتایج مدل به صورت حجمی ارائه شده و صحت نتایج در پیش‌بینی مسیر حرکت ذرات رسوب به صورت منفرد بررسی نشده است.

در زمینه مدل‌سازی عددی آبگیری از کانال مستقیم نیز بیشتر مطالعات به بررسی الگوی جریان پرداخته‌اند و در تعداد محدودی از آنها با توجه به شرایط تنش برشی بستر به تحلیل کیفی الگوی انتقال رسوب پرداخته شده است [۱۸ و ۱۹].

با عنایت به موارد گفته شده و برای تکمیل مطالعات پیشین، هدف این پژوهش بررسی عددی مکانیسم حرکت ذرات رسوب (بار بستر) در آبگیر با استفاده از دیدگاه لاگرانژی و به کارگیری مدل DPM است.

لازم به یادآوری است براساس نکاتی که در تعریف بار

۳- روش عددی، منفصل‌سازی معادلات و

شرایط مرزی

در نرم افزار فلونتت معادلات حاکم با استفاده از روش احجام محدود و بر روی یک میدان جابه‌جا شده گسسته‌سازی می‌شوند. در این پژوهش از روش سیمپل برای کوپل کردن میدان سرعت و مولفه فشار و همچنین از روش آپویند مرتبه دوم برای انفصال ترم‌های مختلف جابه‌جایی و پخش استفاده شده است.

با توجه به بیضوی بودن معادلات حاکم لازم است شرایط مرزی در تمامی مرزهای دامنه محاسباتی معلوم شود.

به منظور مدل‌سازی جریان در کانال مستقیم، در مرز ورودی کانال از شرط مرزی سرعت عمود بر مرز و برای خروجی کانال از شرط مرزی گرادیان صفر و برای مرزهای صلب از شرط مرزی دیوار استفاده شده است. در شرط مرزی دیوار صلب، شار انتقالی عمود بر مرز صفر بوده و به همراه شرط غیرلغزشی، شرایط مرزی سرعت در روی دیواره را ایجاد می‌کند. برای در نظر گرفتن تنش برشی مرزهای صلب از تابع دیواره استفاده شده که به صورت ترم‌های چشمه در معادلات ممتوم اعمال می‌شود.

با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، از شرط مرزی تقارن برای مدل‌سازی سطح آب استفاده شده است.

به منظور مدل‌سازی جریان در آبگیری از کانال مستقیم برای شرط مرزی ورودی از جریان توسعه‌یافته استفاده شده است. بدین منظور جریان در کانالی مشابه با کانال اصلی (از نظر شبکه میدان در مقطع، ولی بدون آبگیر) و با طولی در حدود ۶ برابر عرض جریان شبه‌سازی شد و پارامترهای جریان و آشفتگی در خروجی آن به عنوان شرط مرزی ورودی برای مدل اصلی (آبگیری از کانال مستقیم) استفاده شد. در مرزهای خروجی از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شده است.

با توجه به وجود آبگیر، مدل در این بخش دارای دو مرز خروجی است. پس نکته حائز اهمیت دیگر در مرزهای خروجی چگونگی الزام تقسیم دبی با نسبتی خاص است. نسبت دبی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی [۲۲] به مدل

داده شده است، و بنابراین نوع شرایط مرزی تأثیری بر نتایج مدل نخواهد داشت. در کف و دیواره‌های کانال از شرط مرزی دیوار استفاده شده است.

برای حالتی که اختلاف سطح آب کمتر از ده درصد عمق کل جریان باشد، استفاده از شرط مرزی تقارن برای سطح آب خطای چندانی در نتایج به دست آمده ایجاد نمی‌کند [۲۳]. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، در این بخش نیز از شرط مرزی تقارن برای سطح آب استفاده شده که در آن شار عمود بر مرز صفر فرض می‌شود.

۴- معادله حرکت ذره

برای شبه‌سازی حرکت ذرات رسوب از مدل فاز مجزا (DPM) نرم افزار فلونتت استفاده شده است. در این مدل معادلات حرکت ذره عبارتند از [۲۱]:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3vC_D \text{Re}_p}{4D^2S} (u_f - u_p) + g \left(1 - \frac{1}{S}\right) + F_x \quad (۳)$$

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (۴)$$

که در آن، u_p سرعت ذره، v لزجت سینماتیکی، x_p موقعیت ذره، D قطر ذره، S نسبت چگالی ذره به چگالی سیال و g شتاب گرانش است. Re_p عدد رینولدز ذره است و بر اساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\text{Re}_p = \frac{D|u_f - u_p|}{\nu} \quad (۵)$$

اولین عبارت سمت راست معادله ۳ نیروی درگ است که به سبب لغزش نسبی بین ذره و سیال ایجاد می‌شود. در اغلب موارد، درگ نیروی غالب بر حرکت ذره است. بر اساس مطالعات هینز [۲۴]، ضریب درگ با توجه به عدد رینولدز ذره از روابط ۶ یا ۷ محاسبه می‌شود.

$$\text{if } : \text{Re}_p \leq 1 \longrightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \quad (۶)$$

$$\text{if } : 1 < \text{Re}_p < 400 \longrightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \left(1 + \frac{1}{6} \text{Re}_p^{2/3}\right) \quad (۷)$$

F_x شتاب اضافی (نیروی بر واحد جرم ذره) است که بسته به شرایط، بیانگر نیروهایی چون جرم اضافی و نیروی برا

مشکل، ذرات در فاصله کمینه برابر شعاع ذره درون آب رها شده‌اند.

با توجه به اثر آشفتگی بر مسیر حرکت ذره تا قبل از برخورد به کف، در شرایط یکسان، هر آزمایش چند مرتبه تکرار شده‌است. لازم به یادآوری است که، اگرچه اثر آشفتگی در حرکت بار بستر از درجه دوم اهمیت برخوردار است اما در حرکت بار معلق تاثیر بیشتری دارد [۲]. مسیر حرکت ذره بوسیله روش عکسبرداری سریع (۱۲ فریم در ثانیه) ثبت شده‌است. با توجه به محدودیت‌هایی که برای ثبت مسیر حرکت ذره به وسیله دوربین وجود داشت، امکان استفاده از ذره با قطر کمتر و همچنین برداشت مسافت بیشتری از مسیر حرکت ذره فراهم نبود. نمونه‌ای از مسیر حرکت ذره که در آزمایشگاه برداشت شده، در شکل ۱ ارائه شده است.

مسیر حرکت ذره برای دو قطر ۴ و ۲/۵ میلی‌متری پس از پردازش داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد تحت شرایط یکسان جریان، طول مسیر طی شده توسط ذره با قطر کمتر، بیشتر است. این مسئله بر اساس رابطه ۳ قابل توجیه است. با توجه به رابطه ۳ با افزایش قطر ذره نیروی درگ وارد بر آن کاهش می‌یابد.

سافمن^۳ است. نیروی جرم اضافی به نیرویی گفته می‌شود که برای شتاب‌دار کردن سیال اطراف ذره مورد نیاز است و براساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۲۱].

$$F_x = \frac{1}{2S} \frac{d}{dt} (u_f - u_p) \quad (8)$$

نیروی برا سافمن یا نیروی برا ناشی از برش با رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۲۱].

$$F_x = \frac{2k v_f^{0.5} d_{ij}}{SD(d_{ik} d_{kl})^{0.25}} (u_f - u_p) \quad (9)$$

که در آن $k = 2/594$ و d_{ij} تانسور تغییر شکل می باشد. لازم به یادآوری است که در مدل یاد شده امکان مدل‌سازی اثر برخورد ذرات با یکدیگر وجود ندارد.

۵- شرایط فیزیکی و هیدرولیکی آزمایش

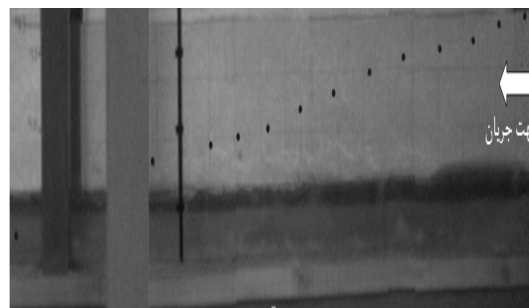
آزمایش‌ها در کانال مستقیم مستطیلی با جدار شیشه‌ای و کف پلکسی‌گلاس به طول ۶ متر و ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۴۴۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. جریان ورودی به کانال از طریق ایستگاه پمپاژ موجود در پایین دست کانال تامین شده است. عمق جریان به وسیله دریچه‌ای که در انتهای کانال قرار دارد، تنظیم می‌شود. میزان دبی جریان به وسیله دبی‌سنج الکترونیکی که در بالادست کانال موجود است، اندازه‌گیری شده است. ذرات از سطح آب، روی خط مرکزی کانال و در فاصله ۴ متری از ورودی، به صورت قائم بر جهت جریان و بدون سرعت اولیه رها شده‌اند. ذرات کروی و از جنس پلی‌استر است. چگالی و قطر ذرات به همراه سایر مشخصات هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به اینکه وزن مخصوص ذرات نسبت به آب اختلاف چندانی ندارد، رها کردن ذرات روی سطح آب سبب می‌شود که ذرات غالباً نتوانند بر کشش سطحی غلبه کرده و روی سطح شناور بمانند. برای حل این

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی آزمایش

عمق جریان (m)	سرعت متوسط جریان (m/s)	عدد رینولدز	عدد فرود	چگالی ذره (kg/m ³)	قطر ذره (mm)	تعداد تکرار آزمایش
۰/۱۷	۰/۳	۵۱۰۰۰	۰/۲۳	۱۰۶۵	۲/۵	۲
					۴	۳

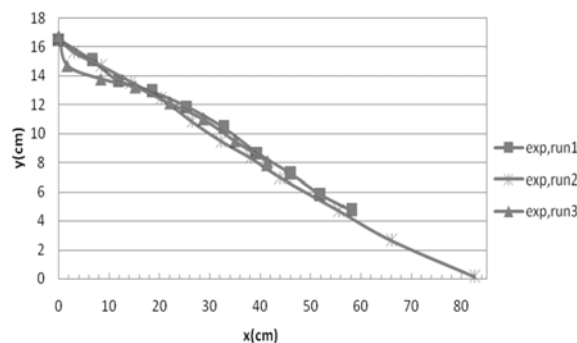
خصوصیات جریان (مانند دبی، ارتفاع جریان) و شرایط اولیه ذره (مانند قطر، چگالی و موقعیت ذره) مطابق با شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. نیروهای لحاظ شده در این مدل‌سازی عبارتند از: نیروی درگ، نیروی وزن ذره، جرم اضافه و نیروی برا سافمن.



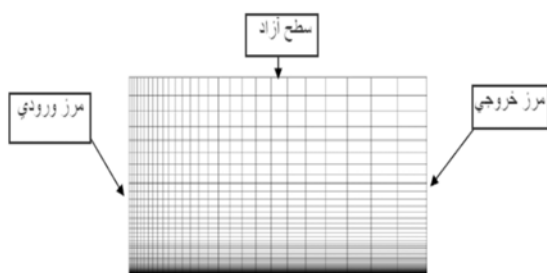
شکل ۱- مسیر حرکت ذره در شرایط آزمایش

۱-۶- مشخصات میدان محاسباتی

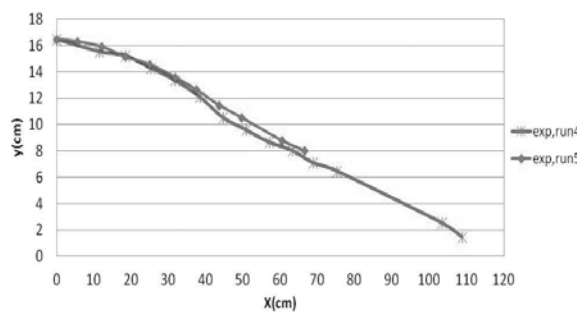
میدان محاسباتی با توجه به مطالعه آزمایشگاهی تولید شده است. میدان حل دوبعدی دارای ارتفاع ۰/۱۷ متر و طول ۶ متر است. شکل ۴ شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد. شبکه به صورت غیریکنواخت انتخاب شده، به گونه‌ای که در نواحی نزدیک دیواره و در ابتدای کانال که جریان توسعه نیافته است، شبکه ریزتر بوده و با دور شدن از مرز ورودی و کف این شبکه با نسبت ۱/۱ بزرگ شده است.



شکل ۲- مسیر حرکت ذره با قطر ۴ میلی‌متر



شکل ۴- شبکه محاسباتی و مرزهای مدل



شکل ۳- مسیر حرکت ذره با قطر ۲/۵ میلی‌متر

۲-۶- نتایج

در شکل‌های ۵ و ۶ نتایج اجرای مدل به همراه داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. بر اساس این شکل‌ها مدل با دقت خوبی توانسته است مسیر حرکت ذره را پیش‌بینی نماید.

۶- ارزیابی مدل در شبیه‌سازی حرکت ذره در کانال مستقیم

در این بخش از مطالعات مسیر حرکت ذره از زمان رهاشدگی تا لحظه برخورد به کف، بر اساس روش ذرات مجزای فلوئنت (DPM) مدل‌سازی شده است.

آزمایشگاهی، مسئله‌ای بسیار دشوار است. در این قسمت از مطالعات به منظور شناخت الگوی حرکت رسوبات و همچنین نسبت رسوب وارد شونده به آبگیر به رسوب انتقالی کانال اصلی (نسبت رسوب انحرافی) به مدل‌سازی لاگرانژی حرکت ذرات رسوب در آبگیر جانبی از کانال مستقیم پرداخته شده است.

برای بررسی عملکرد مدل به مقایسه کیفی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در پیش بینی الگوی حرکت رسوبات کف و همچنین مقایسه کمی بین نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی [۲۲] در بر آورد نسبت رسوب انحرافی پرداخته شده است.

۷-۱- مشخصات میدان محاسباتی

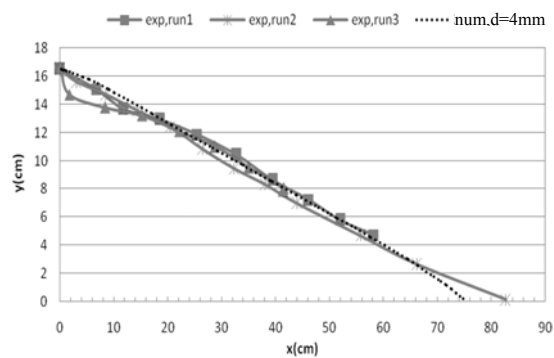
میدان محاسباتی براساس مطالعه آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس [۲۲]، ساخته شده است. این آزمایش شامل کانال مستقیم به همراه یک آبگیر است. عرض کانال اصلی (Bmain) و آبگیر (Bbranch) در آزمایش انجام شده به ترتیب برابر ۱/۵ و ۰/۶ متر است، عمق جریان ثابت بوده و به میزان ۰/۱۴۵ متر است و زاویه آبگیری ۹۰ درجه است. مشخصات جریان شامل عمق، سرعت ورودی، درصد جریان انحرافی و اعداد فرود در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همچنین قطر و چگالی ذرات در این آزمایش به ترتیب برابر ۰/۰۰۱ متر و ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. در این آزمایش حرکت بار بستر و نسبت رسوب ورودی به آبگیر مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی جریان

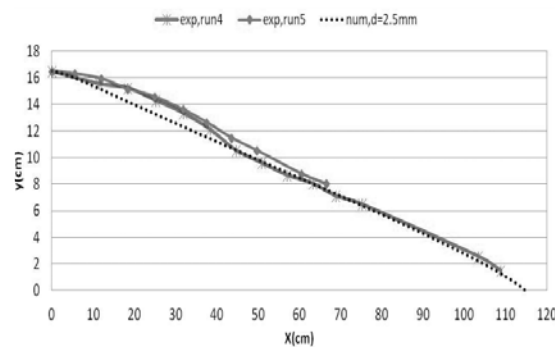
عمق جریان (متر)	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	نسبت دبی انحرافی	عدد فرود
۰/۱۴۵	۰/۳۵۹	۰/۲۰۵	۰/۱۳

تعداد گره‌های شبکه محاسباتی برابر ۲۸۵۱۸۰ است. قابل ذکر است که برای تدقیق تاثیر مرز دیواره‌ها از کلاستر بندی شبکه در نزدیکی آنها استفاده شد. همچنین با توجه به پیچیدگی میدان جریان در نزدیکی محل آبگیری از شبکه ریزتری در این منطقه استفاده شده است.

عدم انطباقی که در ابتدای مسیر حرکت ذره دیده می‌شود، به علت تاثیر رها شدگی و اغتشاش حاصل از ورود انبر در آب است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بعد از طی مسیر و با حذف عامل ایجاد آشفتگی، نتایج برهم منطبق می‌شود. با مقایسه نتایج شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که در شکل ۶ در فاصله بیشتری نسبت به نقطه رها سازی ذره، مسیر حرکت ذره در مدل به مسیر حرکت ذرات در آزمایش منطبق می‌شود. با توجه به این که قطر ذره مورد آزمایش در شکل ۶ کمتر از شکل ۵ است به نظر می‌رسد آشفتگی حاصل از ورود انبر در آب در مسیر بیشتری بر حرکت ذره کوچکتر موثر بوده است.



شکل ۵- مسیر حرکت ذره با قطر ۴ میلی‌متر بر اساس نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی

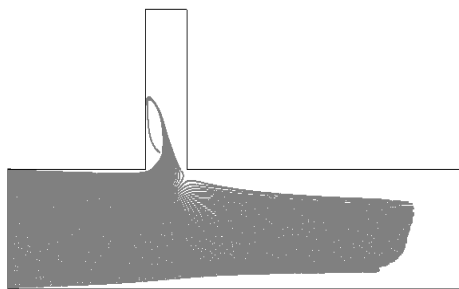


شکل ۶- مسیر حرکت ذره با قطر ۲/۵ میلی‌متر بر اساس نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی

۷-۲- مدل‌سازی الگوی حرکت ذرات بستر در آبگیر جانبی از کانال مستقیم

ردیابی لاگرانژی ذرات در جریان‌های سه بعدی پیچیده مانند جریان آبگیر هم به صورت عددی و هم به صورت

شبکه محاسباتی در شکل ۷ نشان داده شده است.

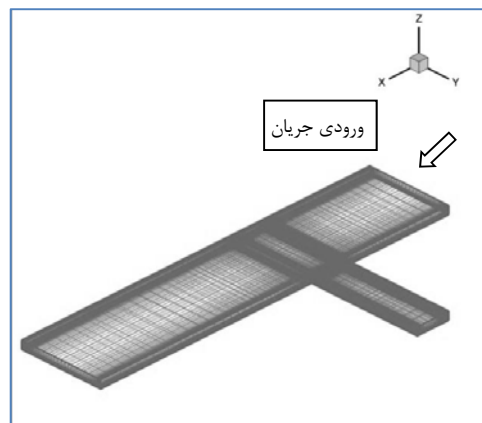


شکل ۸- الگوی حرکت ذرات رسوب در کف براساس مدل لاگرانژی

در شکل ۸ الگوی حرکت ذرات بر اساس مدل عددی ارائه شده است. خطوط خاکستری رنگ مسیر حرکت ذرات را در کانال اصلی و کانال آبگیر نشان می‌دهد. در این حالت، ذرات رها شده در فاصله کمی از محل رها شدگی به کف برخورد می‌کنند و به بار بستر تبدیل می‌شوند و همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود مسیر حرکت ذرات در تراز صفر (موقعیت کف کانال) تمام عرض کانال بالادست آبگیر را پوشانده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد رسوبات بستر از تمام عرض آبگیر وارد کانال نمی‌شوند، بلکه به صورت متمرکز و به شکل گوه‌ای وارد کانال می‌شوند و داخل ناحیه چرخشی به تله می‌افتند. علت تشکیل ناحیه گوه‌ای در داخل آبگیر به سبب وجود جریان چرخشی در دیواره داخلی و جریان ثانویه در دیواره خارجی آبگیر می‌باشد. جریان چرخشی در اثر اندرکنش ممتوم جریان در کانال اصلی و کانال آبگیر و جریان ثانویه (شکل ۹) ساعتگرد در دهانه آبگیر به سبب انحنای صفحه تقسیم که باعث عدم تعادل بین گرادیان عرضی فشار و نیروهای برشی و گریز از مرکز می‌شود، ایجاد می‌گردد [۱۸ و ۱۹]. مساحت این گوه با توجه به ویژگی‌های جریان متغیر است. حد بالای ناحیه گوه‌ای خط تقسیم جریان و حد پایین آن ناحیه جداشدگی در آبگیر است. در این ناحیه برخی از رسوبات ته نشین می‌شوند، ولی به علت الگوی چرخشی جریان، برخی از ذرات می‌چرخند و دوباره وارد ناحیه گوه‌ای شکل می‌شوند. این مسئله در مدل عددی نیز دیده می‌شود.

در این مدل‌سازی با توجه به نسبت عرض به عمق زیاد



شکل ۷- شبکه محاسباتی

مانند شرایط آزمایشگاهی، ذرات رسوب، ماسه‌ای در نظر گرفته شده و برای آنها از قطر و چگالی مشابه با شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. در مدل عددی ذرات به شکل یکنواخت و خطی در کل عرض کانال اصلی، در فاصله ۲ متری از دهانه آبگیر و در ارتفاع ۰/۰۲ متری از کف رها شده اند. با توجه به آنکه در مطالعات آزمایشگاهی [۲۲] تنها حرکت بار بستر بررسی شده، ارتفاع و محل رها شدگی ذرات در مدل عددی به گونه‌ای انتخاب شده که تمام ذرات رها شده قبل از ورودی آبگیر به بار بستر تبدیل شوند.

لازم به یادآوری است، همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، بار بستر در این مطالعه نوعی از حرکت ذرات رسوب در نظر گرفته شده که حرکت ذرات رسوب در تماس با بستر باشند [۲]. تعداد ذرات مورد بررسی در این بخش از مطالعات ۱۰۰ عدد است که به صورت همزمان رها شده‌اند. آنالیز حساسیت انجام شده نشان می‌دهد افزایش تعداد ذرات از این مقدار تغییری در درصد رسوب ورودی به آبگیر ایجاد نمی‌کند.

۲-۷- بررسی کیفی الگوی حرکت ذرات

برای بررسی کیفی حرکت ذرات، همان‌گونه که در بند ۱-۷ اشاره شد، حرکت تعداد ۱۰۰ ذره با استفاده از DPM مدل‌سازی شد.



شکل ۱۱- الگوی حرکت ذرات رسوب در کف کانال آبگیر

(دید از کف) [۲۶]

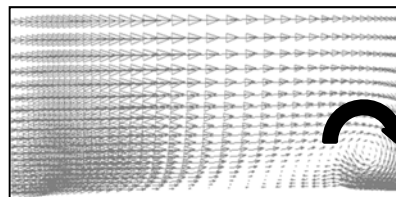
۷-۳- بررسی کمی نسبت رسوب انحرافی

در این بخش از مطالعات، مدل بر اساس شرایط یاد شده در بند ۷-۱ اجرا شد و نسبت رسوب انحرافی به آبگیر محاسبه شد. برای محاسبه نسبت رسوب انحرافی به آبگیر، تعداد ذرات وارد شونده به آبگیر بر تعداد کل ذرات رها شده در کانال اصلی تقسیم شده است. نتایج مدل اجرا شده برای شرایط هیدرولیکی بالا نشان می‌دهد از تعداد ۱۰۰ ذره رها شده در کانال اصلی، ۴۰ ذره وارد آبگیر می‌شود. به این ترتیب نسبت دبی رسوب ورودی به آبگیر به دبی رسوب در کانال اصلی (qs) در مدل ۰/۴ است. مقدار این نسبت در مطالعه آزمایشگاهی [۲۲] ۰/۳۳ است. نتایج مدل ۲۱٪ بیشتر از داده‌های آزمایشگاهی است. ممکن است علت بیشتر بودن qs در نتایج مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، تراکم بیشتر ذرات در ورودی آبگیر و ناحیه گوه‌ای شکل و نقش بیشتر مسئله برخورد ذرات در کاهش ممنوع در دهانه آبگیر نسبت به کانال اصلی در شرایط واقعی باشد که در مدل به علت عدم توانایی نرم افزار از آن چشم‌پوشی شده است. اختلاف نتایج مدل‌سازی عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی، با توجه به خطای روابط تجربی حتی در هندسه‌های ساده (تا ۲۰۰٪) [۴] قابل قبول است.

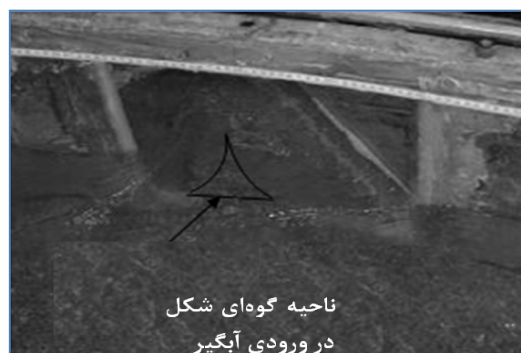
۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش در ابتدا با استفاده از روش ذرات مجزا نرم افزار فلونت مسیر حرکت ذرات در کانال مستقیم شبیه‌سازی شد. برای بررسی صحت نتایج عددی

جریان ($B_{main}/h > 10$)، انحراف مسیر حرکت ذرات به سمت مرکز در کانال اصلی و دور از آبگیر در اثر جریان ثانویه نوع دوم، ناچیز بوده و تنها در دیواره‌های طرفین کانال شکل می‌گیرد. بنابراین چنین رفتاری در رودخانه‌های طبیعی نیز با توجه به زیاد بودن نسبت عرض به عمق در آنها [۲۵]، پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۹- بردارهای سرعت در صفحه تقاطع کانال اصلی و آبگیر به منظور بررسی عملکرد مدل عددی، نمونه‌ای از الگوی حرکت ذرات رسوب بر اساس مطالعات آزمایشگاهی [۲۶] در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. در این شکل‌ها وجود ناحیه گوه‌ای در دهانه آبگیر مشخص است. مقایسه الگوی پیش‌بینی شده حرکت ذرات رسوب به وسیله مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی را نشان می‌دهد [۲۶].



شکل ۱۰- الگوی حرکت ذرات رسوب در کف کانال آبگیر

(دید از بالا) [۲۶]

- [2] Sekine, M., and Kikkawa, H. (1992). "Mechanics of saltating grains." *J. Hydr. Eng.*, 118(4), 536-558.
- [3] Lalli, F., Esposito, P. G., Piscopia, R., and Verzicco, R. (2005). "Fluid-particle flow simulation by averaged continuous model." *Computers & Fluids*, 34, 1040-1061.
- [4] Van Rjin, L.C., 1993. Principles of *Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications.
- [5] Yalin M. S. (1977). "Mechanics of sediment transport". *Oxford*.
- [6] Nezu, I. and Azuma, R. (2004). "Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open channel flows." *J. Hydr. Eng.*, 130(10), 988-1000.
- [7] Goto, H., (1998). "Computational mechanics of sediment transport." *Kyoto University*.
- [8] Shams, M., Ahmadi, G., and Smith, D. (2002). "Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers.", *Advances in Water Resources*, 25, 689-699.
- [9] Schmeeckle, M., and Nelson, J. M. (2003). "Direct numerical simulation of bedload transport using a local, dynamic boundary condition." *Sedimentology*, 50, 279-301.
- [10] Crowe, M., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. (1998). "Multiphase flows with droplets and particles." *CRC press, New York*.
- [11] Mazur, Z., Campos-Amezcuca, R., Urquiza-Beltran, G. and Garca-Gutierrez, A. (2004). "Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine", *Applied Thermal Engineering* 24 1877-1891.
- [12] Ji, Z., Li, H., Wu, X., and Choi, j. (2008). "Numerical simulation of gas/solid two-phase flow in ceramic filter vessel." *Powder Technology*, 180, 91-96.
- [13] Zhang, J., Li, A. (2008). "Study on particle deposition in vertical square ventilation duct flows by different models.", *Energy Conversion and Management* 49, 1008-1018.
- [14] Dehbi, A. (2008). "A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary layer flows.", *Nuclear Engineering and Design*, 238, 707-715.
- [15] خادمی، ا، امید، م. ح. (۱۳۸۶). "بررسی اثر تیغه هدایت کننده بر راندمان تله اندازی حوضچه رسوب گیر". مجله هیدرولیک دوره دوم، شماره ۱-ص.ص. ۱۱-۲۴.
- [16] Thinglas, T. and Kaushal, D. (2008). "Comparison of two- and three-dimensional modeling of invert trap for sewer solid management.", *Particuology*, 6, 176-184.
- [17] Kaushal, D.R., Thinglas, T., Tomita, Y., Kuchii, S. and Tsukamoto, H. (2012). "Experimental investigation on optimization of invert trap

مطالعاتی آزمایشگاهی در این راستا انجام شد. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- با توجه به کوچک بودن قطر و چگالی ذرات انتخاب شده در این پژوهش (بند ۶)، مسیر حرکت آنها متأثر از آشفتگی بوده و به همین منظور و در راستای حذف این تاثیر (تا حد امکان) آزمایش‌ها چندبار تکرار شده است.

- مقایسه نتایج نشان می‌دهد مدل با دقت خوبی توانسته است مسیر حرکت ذره را پیش‌بینی کند.

- براساس نتایج عددی و آزمایشگاهی در بررسی حرکت تک ذره در کانال مستقیم، تحت شرایط یکسان جریان، طول مسیر طی شده به وسیله‌ی ذره با قطر کمتر، بیشتر است، که علت آن، کاهش نیروی درگ و افزایش وزن ذره در اثر افزایش قطر ذره است.

همچنین نتایج مدل‌سازی الگوی حرکت رسوب ورودی به آبگیر عبارتند از:

- در دهانه آبگیر یک ناحیه گوه‌ای شکل ایجاد می‌شود و رسوبات از این ناحیه وارد آبگیر می‌شوند.

- مانند آنچه در شرایط آزمایشگاهی دیده می‌شود، نتایج مدل نشان می‌دهد احتمال وارد شدن ذرات ته‌نشین شده در ناحیه چرخشی به منطقه گوه‌ای شکل وجود دارد.

- مقایسه نتایج حاصل از مدل لاگرانژی در تعیین نسبت رسوب ورودی به آبگیر با داده‌های آزمایشگاهی با در نظر گرفتن خطاهای متداول در مسائل برآورد رسوب، انطباق مناسبی را نشان می‌دهد.

- نسبت رسوب انحرافی در مدل‌سازی عددی به شکل دست‌بالا تخمین زده شده است. این مسئله می‌تواند به سبب فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی ایجاد شده باشد. در این مدل‌سازی از اندرکنش بین ذرات به علت عدم توانایی مدل در برآورد آن چشم‌پوشی شده است.

۹- منابع

- [1] Sharma, S., and Kavvas, M. L. (2005). "Modeling non-cohesive suspended sediment transport in stream channels using an ensemble-averaged conservation equation." *J. Hydr. Eng.*, 131(5), 380-389.

رسوب در آبگیر جانبی از مسیر مستقیم." رساله دکتری،
دانشگاه تربیت مدرس

[23] Taylor E. H. (1944) "Flow characteristics at rectangular open-channel junctions", Trans. Journal of Hydraulic Engineering; Vol. 109, pp 893-902.

[24] Hinds, C.W. (1982) "Aerosol technology, properties behavior, and measurement of airborne particles". John Wiley and Sons.

[۲۵] دهقانی، ا. (۱۳۸۶). " مطالعه آزمایشگاهی کنترل

رسوب به آبگیر جانبی در قوس ۱۸۰ درجه." رساله

دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

configuration for sewer solid management", Powder Technology, 215, 1-14

[۱۸] صفرزاده، ا. (۱۳۸۴). " شبیه‌سازی عددی الگوی

جریان در آبگیر جانبی از قوس ۱۸۰." پایان نامه

کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

[19] Neary, V., Sotiropoulos, F., and Odgaard, A. J. (1999). " Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows." J. Hydr. Eng., 125(2), 126-140.

[20] Versteeg H. K., Malalasekera W. (1995) "An introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical.

[21] Fluent, 2005. Fluent 6. 2 Users Guide, USA.

[۲۲] عباسی، ع. (۱۳۸۲). " مطالعه آزمایشگاهی کنترل