

Numerical Simulation of Incipient Motion Parameters of the Sediment Particles with Eulerian-Lagrangian Approach

AMIN NOORI^{1*}, RAMIN AMINI¹

1. Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: Jan. 8, 2019- Revised: July. 21, 2019- Accepted: July. 22, 2019)

ABSTRACT

Solid particles transport in fluid flow is a common phenomenon in nature, and its typical example in hydraulic science is sediment transport in rivers. In a channel with a bed of sedimentary materials, there are no moving particles in the streams with a low discharge and remain steady in their place. As the particle velocity increases, the bed particles begin to move, which is called the threshold of motion of the sediment particles. In this study, using a numerical model based on OpenFOAM software, a two-dimensional simulation of the threshold of group motion of sediment particles in turbulent flow has been investigated. The approach used in the simulation is Eulerian-Lagrangian, in which the continuous phase is emulated in a continuous manner in the form of an Eulerian with finite volume method and sediment particles are simulated in a Lagrangian and particle tracing method. In the current model, the effect of fluid on the particle, the particle on the fluid, and the forces that the particles of the sediment enter to each other are considered. In order to consider the effect of sediment particles inner interacting, a soft contact approach and a friction damper spring impact model were used. The results of the numerical model have been compared with other researchers in the form of critical velocity method and a relation has been proposed for the particle motion threshold criterion. Also, Incipient motion of sediment particles with different criteria has been studied. The results show that the present model can simulate the phenomenon well with proper accuracy.

Keyword: Incipient motion, critical velocity, Eulerian-Lagrangian, shear stress, OpenFOAM.

شبیه‌سازی عددی معیارهای آستانه حرکت ذرات رسوب با رویکرد اویلری - لاگرانژی

امین نوری^{۱*}، رامین امینی^۲

۱. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
 (تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۴/۳۱)

چکیده

انتقال ذرات جامد در جریان سیال، یک پدیده رایج در طبیعت بوده و نمونه 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 آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب در جریان آشفته پرداخته شده است. رویکرد اتخاذ شده در شبیه‌سازی به صورت اویلری-لاگرانژی بوده که در آن فاز پیوسته به صورت اویلری و با روش حجم محدود و ذرات رسوب به صورت 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 رویکرد تماس نرم و مدل برخورد فنر دمپر اصطکاک استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل عددی در قالب روش سرعت بحرانی با محققین دیگر مورد مقایسه قرار گرفته و یک رابطه برای معیار آستانه حرکت ذرات پیشنهاد شده است. همچنین آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب با معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مدل حاضر به خوبی توانسته پدیده‌ی مذکور را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند.

واژه‌های کلیدی: آستانه حرکت، سرعت بحرانی، اویلری - لاگرانژی، تنش برشی، OpenFOAM.

مقدمه

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 ذره رسوب زمانی اتفاق می‌افتد که این نیروها به حد بحرانی خود رسیده و جریان به اندازه کافی برای حرکت ذره رسوبی نیروهای مثبت ایجاد کند. در پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون تعریف واحدی از آستانه حرکت وضوح نداشته و تفاوت قابل توجهی در تعریف آستانه حرکت بین مطالعات مختلف وجود دارد. 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 (1935) رایج‌ترین روش برای تعیین این شرایط می‌باشند. وی چهار وضعیت حرکت رسوب در بستر کانال را برای تعیین آستانه حرکت ذره‌های رسوبی مشخص کرد که شامل بدون انتقال، انتقال

ضعیف، انتقال متوسط و انتقال کلی 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 می‌کنند و در انتقال کلی تمامی ذرات در هر زمان، هر مکان و هر اندازه‌ی حرکت می‌کنند. Delft Hydraulics (1972) بر اساس مشاهدات با تعریف یک نمودار و هفت حالت حرکتی ذرات رسوب، سعی بر کمی‌سازی پدیده‌ی انتقال رسوب نمود. Graf and Pazis (1977) نیز با استفاده از تعریف تعداد ذرات متحرک که از واحد سطح و واحد زمان می‌گذرند، در قالب یک دیاگرام معیار جدیدی برای توصیف آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب ارائه کردند.

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 (1936) 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

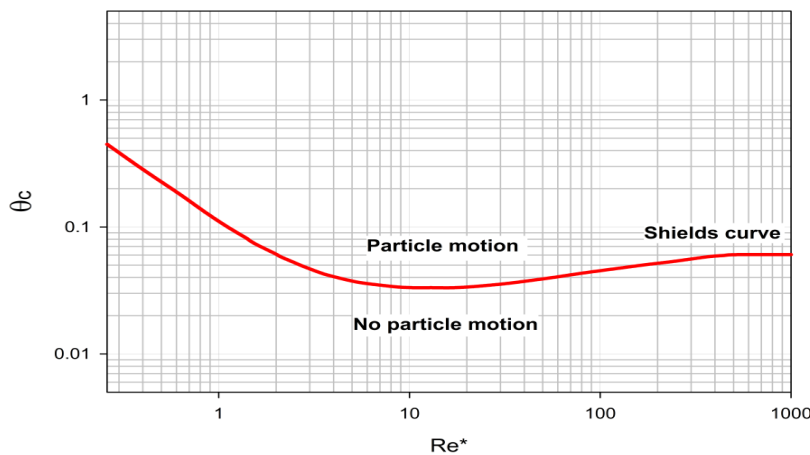
ذرات رسوب، ρ چگالی سیال و g شتاب ثقل می‌باشد. علی‌رغم استفاده فراوان محققین از دیاگرام Shields (1936) انتقاداتی نیز به آن مطرح است. اصلی‌ترین مشکل در نمودار آن است که تنش برشی و سرعت برشی به صورت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که این دو متغیر مستقل نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند. بعدها محققین دیگری مانند Iwagaki (1956)، Yalin and Karahan (1979)، Wiberg and Smith (1987) و Dey *et al.* (1999) بر مبنای تنش برشی پژوهش‌هایی را انجام داده و اصلاحاتی در دیاگرام شیلدز اعمال نمودند.

پارامترهای بدون بعد، نموداری را مطابق شکل (۱) به عنوان معیاری برای آستانه حرکت ارائه نمود. در دیاگرام Shields (1936) محور افقی و عمودی به ترتیب عدد رینولدز برشی (Re^*) و پارامتر شیلدز بحرانی (θ_c) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Re^* = \frac{u_* D}{\nu} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این روابط u_* سرعت برشی، D قطر ذره رسوب، ν ویسکوزیته سینماتیک سیال، τ_c تنش برشی بستر، ρ_s چگالی



شکل ۱. دیاگرام Shields جهت تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب

به دست آمده توسط برخی از پژوهشگران را نشان می‌دهد. علاوه بر روابط فوق، محققین دیگری با استفاده از روش سرعت بحرانی پژوهش‌هایی انجام داده و روابطی متفاوت از رابطه‌ی (۳) ارائه نمودند. رابطه‌ی (۴) با آنالیز ۲۵۰۰ داده‌ی آزمایشگاهی در شرایط آب کم‌عمق برای پیش‌بینی سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب ارائه گردیده است (Rottner, 1959):

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

Ackers and White (1973) برای بستر رسوبی با ذرات بزرگ‌تر از ۲/۴ میلی‌متر و استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی و میدانی موجود، رابطه‌ی (۵) را پیشنهاد نمودند:

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

Garde and Ranga Raju (2000) با انجام آزمایش بر آستانه حرکت ذرات رسوب روی سطوح زبر رابطه‌ی (۶) ارائه

اما تعدادی از محققین علم هیدرولیک رسوب، به‌جای استفاده از تنش برشی سرعت جریان را به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور در روابط پدیده آستانه حرکت مورد استفاده قرار داده‌اند. روابطی که پیشنهاد گردیده، عمدتاً بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی و روابط تجربی بوده است. Novak and Nalluri (1975) با استفاده از آنالیز تحلیلی روی نیروهای وارد بر یک ذره رسوب در کانال با مقاطع دایره‌ای و مستطیلی نشان دادند عمده روابط ارائه شده برای توصیف آستانه حرکت ذرات با روش سرعت بحرانی به صورت رابطه‌ی (۳) نشان داده می‌شود:

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

که در آن V_c سرعت آستانه حرکت، R شعاع هیدرولیکی، Gs نسبت جرم مخصوص رسوب به سیال، a و b ضرایبی هستند که به صورت تجربی به دست می‌آیند. Shafai Bejestan (2009) نیز رابطه‌ی مشابهی ارائه نمود که در آن به‌جای پارامتر شعاع هیدرولیکی از عمق جریان (H) استفاده شده است. عبارت سمت چپ رابطه‌ی (۳) عدد فرود بحرانی ذره رسوب (Fr_c) و $\left(\frac{H}{D}\right)^b$ یا $\left(\frac{R}{D}\right)^b$ پارامتر اندازه نسبی ذره نامیده می‌شود. جدول (۱) ضرایب a و b

کردند:

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

Bong *et al.* (2016) 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. ایشان همچنین یک رابطه برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی بر اساس ضخامت لایه‌ی رسوب توصیه کردند:

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

جدول ۱. ضرایب a و b در رابطه‌ی (۳) به دست آمده توسط محققین مختلف

نام محقق	a	b	توضیحات
(۱۹۳۵) Straub	۱/۴۹	۰/۱۶۷	کانال مستطیلی عریض
(۱۹۶۳) Neil	۱/۵۸	۰/۱	بستر ماسه‌ای با قطر یکنواخت
(۱۹۶۳) Bogardi	۱/۷	۰/۰۹۵	کانال مستطیلی
(۱۹۸۴) Novak and Nalluri	۰/۵	۰/۴	کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای
(۲۰۰۹) Shafai Bejestan	۲/۲	.	D/H<0.1
(۲۰۰۹) Shafai Bejestan	۱/۲۳۷	۰/۲۵	D/H>0.1
(۱۹۹۱) El-Zaemey	۰/۷۵	۰/۳۴	کانال دایره‌ای
(۱۹۹۶) Nalluri and Ghani	۰/۲۸۷	۰/۴	مجاری بسته مستطیلی
(۱۹۹۹) Ab Ghani <i>et al.</i>	۱/۰۷	۰/۲۳	کانال مستطیلی
(۲۰۰۳) Mei	۰/۱۲۵	۰/۴۷	مجاری بسته دایره‌ای
(۲۰۱۷) Safari <i>et al.</i>	۰/۴۸	۰/۴۷	کانال مستطیلی

و واکنش با فاز پیوسته سیال و بستر صلب و دیگر ذرات را داشته و معادلات آن با رویکردی لاگرانژی و روش ردیابی ذرات^۵ (LPT) حل می‌گردد، تشکیل می‌دهد. در این تقابل چنانچه صرفاً اثرات ذره بر سیال یا سیال بر ذره در نظر گرفته شود به آن کوپلینگ یک‌طرفه و اگر اندرکنش سیال و ذره، هر دو بر روی یکدیگر مدنظر باشد به آن کوپلینگ دوطرفه و در صورتی که اندرکنش ذره با ذره نیز لحاظ گردد، به آن کوپلینگ چهارطرفه می‌گویند.

مروری بر تحقیقات انجام شده تاکنون نشان می‌دهد رویکرد محققین در بررسی پدیده آستانه حرکت ذرات رسوب عمدتاً استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی بوده است. با توجه به این موضوع، در پژوهش حاضر به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب با استفاده از مدل عددی در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM پرداخته می‌شود. همچنین در این تحقیق با استفاده از یک مدل برخورد اثر اندرکنش ذرات با یکدیگر و در نتیجه آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب به صورت دوطرفه شبیه‌سازی شده که در مدل‌های عددی کمتر از آن استفاده شده است. در بررسی آستانه حرکت هر دو روش سرعت بحرانی و تنش برشی به کار گرفته شده و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

عمده تحقیقات انجام شده در علم هیدرولیک رسوب به‌صورت آزمایشگاهی بوده و به دلیل پیچیدگی در شبیه‌سازی و هزینه‌ی محاسباتی کمتر به مدل‌سازی عددی این پدیده پرداخته شده است. Zou (2007) با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مدلی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب ساحلی ارائه نمود. Nasrollahi *et al.* (2008) مطالعات گسترده‌ای روی مدل‌های مختلف حرکتی بار بستر انجام دادند. ایشان برای اولین بار با استفاده از روش المان مجزا، مدل‌های مختلف حرکتی بار بستر شامل غلتش^۳ و جهش^۴ را به صورت یک ذره تنها شبیه‌سازی کردند. Vetsch (2012) برای مدل‌سازی انتقال رسوب به‌وسیله روش‌های بدون شبکه، از روش SPH برای مدل‌سازی سیال و از روش المان مجزا برای شبیه‌سازی رسوب بهره برد.

در تحقیق حاضر که به صورت اویلری لاگرانژی به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب می‌پردازد، سه عامل سیال، ذره و بستر جهت مدل‌سازی این فرآیند در نظر گرفته می‌شود. سیال فاز پیوسته‌ای را که معادلات آن با رویکردی اویلری و با استفاده از روش حجم محدود 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

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

ضرایب ثابت مدل k-ε استاندارد در جدول (۲) مشاهده می‌شود:

جدول ۲. 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

برای مدل‌سازی ذرات رسوب و اندرکنش آن با فاز پیوسته روش LPT به کار برده شده که در آن تمامی 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 ، حجم V_p و جرم m_p تعریف می‌شود. در چارچوب لاگرانژی، بردار مکانی x_p هر ذره توسط معادله‌ی ساده‌ی شتاب آن ذره محاسبه می‌شود:

$$U_p = \frac{dx_p}{dt} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

با به‌کارگیری روش ردیابی ذرات تمامی ذرات به روش لاگرانژی انتقال داده می‌شوند و بنابراین ردیابی هر کدام از ذرات به‌تنهایی محاسبه می‌شود. بدین ترتیب هر ذره می‌تواند حرکت کرده و بچرخد و بنا بر قانون دوم نیوتن تعادل نیرویی و چرخشی آن به‌صورت روابط (۱۴ و ۱۵) خواهد بود:

$$\frac{m_p dU_p}{dt} = f_n + f_t + f_{pf} + f_b \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = r_c \times f_t + T_r \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در این روابط f_n و f_t نیروی عمودی و مماسی وارد بر ذره از طرف ذرات رسوب، f_b نیروهای بدنه و f_{pf} نشان‌دهنده نیروهایی است که سیال به ذره وارد می‌کند، I_p ممان اینرسی ذره، ω_p سرعت چرخشی ذره، r_c برداری از مرکز جرم ذره به سمت نقطه برخورد دو ذره، T_r ممان چرخشی اصطکاکی می‌باشند. لازم به ذکر است نیروهای وارده از طرف سیال و نیروهای بدنه بر مرکز جرم ذره وارد گردیده اما نیروهای برخورد ذرات به یکدیگر بر نقطه‌ی برخورد دو ذره وارد می‌شود. نیروهای وارد بر ذرات در این مطالعه شامل نیروهای گرادیان فشار (F_p)، شناوری (F_B)، درگ (F_D)، جرم افزوده (F_{AM}) و نیروی برکنش (F_L) بوده که در ادامه روابط آن‌ها معرفی می‌گردد.

نیروی گرادیان فشار نیرویی است که بر اثر اختلاف فشار وارده بر یک ذره حاصل شده و از رابطه‌ی (۱۶) محاسبه می‌گردد (Zhou et al, 2011):

$$F_p = (\rho(u \cdot \nabla)u)V_p \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای مدل‌سازی فاز پیوسته از روش حجم محدود و برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی جریان از مدل k-ε استاندارد استفاده شده است. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج توسط یک معادله‌ی پیوستگی و سه معادله مومنوم در جهات محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنوم به بیان ریاضی می‌باشند. معادله پیوستگی یا معادله بقای جرم در یک جریان سیال به‌صورت رابطه (۸) بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

معادلات ناویر استوکس، معادلات مومنوم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزج می‌باشد که فرم تانسوری این معادلات در مختصات کارتزین به‌صورت رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i - S_p \quad (\text{رابطه ۹})$$

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 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 رابطه (۹)، بیانگر شتاب سیال است که شامل تغییرات زمانی و مکانی سرعت بوده و جملات سمت راست این رابطه بیانگر نیرو در واجد جرم هستند. مدل k-ε استاندارد یک مدل نیمه تجربی بوده که بر پایه‌ی مدل‌سازی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال آشفتگی (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-ε فرض بر این است که جریان کاملاً آشفتگی بوده و اثر لزجت مولکولی قابل صرف‌نظر کردن است. معادلات انتقال k و ε در این مدل به‌صورت روابط (۱۰ و ۱۱) تعریف می‌شوند (Launder and Spalding, 1974):

(رابطه ۱۰)

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon$$

(رابطه ۱۱)

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

μ_t لزجت اغتشاش است که با استفاده از K و ε از رابطه‌ی

(۱۲) محاسبه می‌شود:

می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که در مقادیر بالای رینولدز ذره نیروی برکنش تقریباً برابر با مقدار نیروی درگ خواهد بود. شواهدی نیز نشان‌دهنده آن است که در مقادیر بسیار پایین رینولدز ذره نیروی برکنش تا حد منفی شدن ضعیف می‌گردد. در این مطالعه از مدل برکنش Mei and Klausner (1994) استفاده گردید.

در مدل‌سازی برخورد ذرات رسوب با یکدیگر دو رویکرد تماس نرم و سخت وجود دارد که در تماس نرم ذرات اجزای نفوذ در یکدیگر را داشته اما در تماس سخت نفوذ ذرات غیر فیزیکی در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر از رویکرد تماس نرم و مدل برخورد فنر-دمپر-اصطکاک استفاده شده است. بعد از برخورد دو ذره به یکدیگر فنر موجود در سیستم مسئولیت بازگرداندن ذرات به حالت اولیه‌ی تماس را دارد. این فنر یک نیروی بازگشتی را با توجه به خواص و جنس ماده و همچنین عمق نفوذ در جهت محور سیستم دمپر و فنر یعنی عمود بر سطح تماس وارد می‌سازد. همچنین یک نیروی مشابه دمپر ویسکوز که به سرعت دو ذره‌ی متصادم و ضریب دمپینگ بستگی دارد، سبب اتلاف انرژی در مدل می‌شود. شرح دقیق‌تری از مدل برخورد مذکور و روابط آن توسط Vetsch (2012) ذکر شده است.

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM که یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است، استفاده گردید. باز بودن منبع کد مذکور امکان بررسی تمامی جنبه‌های کد نویسی از جمله تغییر و توسعه‌ی آن برای کاربر را فراهم خواهد کرد. برای ساخت هندسه و مش‌بندی مدل موردنظر از نرم‌افزار Gambit کمک گرفته می‌شود. هندسه، ابعاد، اندازه‌ی مش و نام شرایط مرزی در این نرم‌افزار ایجاد شده و سپس توسط یک فایل واسط این اطلاعات به نرم‌افزار اصلی منتقل می‌گردد.

برای حل معادلات حاکم بر جریان از روش حجم محدود استفاده شده و قابلیت انتقال ذرات رسوب به کمک روش LPT انجام می‌گردد. برای انفصال معادلات حاکم در جملات دارای ترم زمانی از روش اوپلر، جملات گرادیان از روش خطی گاوس، جملات دیورژانس از روش خطی گاوس و Upwind، جملات لاپلاس از روش خطی گاوس اصلاح‌شده و درون‌یابی خطی استفاده شده است. همچنین برای حل دستگاه معادلات به‌دست آمده برای ماتریس ضرایب، از روش GAMG برای حل ماتریس فشار و از روش تکرار برای حل ماتریس سرعت با خطای قابل‌پذیرش 10^{-6} به کارگیری شده است. مش‌بندی برای نواحی نزدیک به مرز جامد و ذرات رسوب که تغییرات سرعت بیشتر

به نیرویی در جهت بالا که به جسم (کاملاً یا نیمه) غوطه‌ور در آب وارد شده و برابر با وزن سیال هم‌حجم جسم بوده، نیروی شناوری یا بویانسی گفته شده که با لحاظ نمودن وزن جسم به‌صورت رابطه‌ی (۱۷) محاسبه می‌گردد:

$$F_B = m_p \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

نیروی درگ نتیجه‌ی مقاومت یک ذره در سیال بوده که به سرعت نسبی سیال و ذره‌ی رسوب بستگی دارد. مؤلفان در گذشته روابط متفاوتی برای نیروی درگ پیشنهاد داده‌اند. مدل نیروی درگ زیر برای فضای متراکم ($\alpha_f < 0.8$) به‌صورت رابطه‌ی (۱۸) ارائه شده است (Ergun, 1952):

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

که در آن \bar{u}_r سرعت متوسط نسبی ذره، α_p نسبت حجمی ذره و α_f نسبت حجمی سیال می‌باشد. همچنین رابطه‌ی (۱۹) برای نیروی محاسبه‌ی نیروی درگ پیشنهاد شده است (Wen, 1966):

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

که ضریب درگ C_D و عدد رینولدز ذره Re_p با استفاده از روابط (۲۰ و ۲۱) محاسبه می‌شوند:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$Re_p = \frac{\alpha_f D_p |\bar{u}_r|}{\nu} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

در تحقیق حاضر از ترکیب دو رابطه‌ی فوق استفاده می‌گردد (Gidaspow et al., 1991):

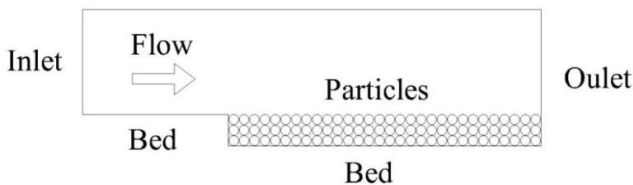
$$F_D = \begin{cases} F_{D,Ergun} & \text{for } \alpha_f < 0.8 \\ F_{D,WenYu} & \text{for } \alpha_f > 0.8 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

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 (۲۳) محاسبه می‌گردد (Odar and Hamilton, 1964):

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

ذرات کوچک در یک میدان برشی، متحمل نیرویی به نام نیروی برکنش می‌شوند که بر راستای حرکت نسبی دو فاز عمود

سرعت جلوگیری می‌کند. طبق مطالعات انجام شده در گذشته ضخامت لایه ذرات رسوب باید حداقل 3D و حداکثر 5D بوده (Salem, 2013; Gregoretti, 2000) که جهت کاهش هزینه‌ی محاسباتی در این پژوهش از سه لایه ذره‌ی رسوب استفاده شده است. ذرات رسوب دارای چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه می‌باشند. مدل حاضر دارای قابلیت اعمال دانه‌بندی به ذرات رسوب نبوده و در هر اجرا قطر ذرات یکسان در نظر گرفته می‌شود. برای تغییر استغراق نسبی و یا عدد رینولدز ذره قطر ذرات رسوب تغییر کرده که محدوده‌ی آن بین ۰/۱ تا ۱۲/۱ میلی‌متر قرار دارد. شماتیک هندسه‌ی مدل‌سازی شده در شکل (۳) نشان داده شده است.



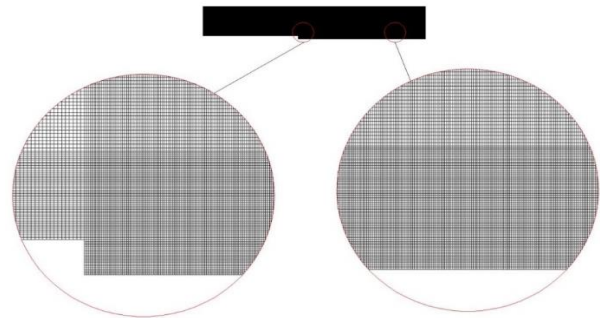
شکل ۳. شماتیک هندسه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار

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 موردنظر 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.

نتایج و بحث

در ابتدا برای اطمینان از صحت عملکرد مدل توسعه‌یافته در بخش اوپلری، پروفیل سرعت جریان قبل از آستانه حرکت ذرات رسوب و زمانی که ذرات به صورت ثابت در جای خود قرار دارند، با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای ایجاد شرایط بستر کاملاً زیر باید رابطه‌ی $K_S^+ > 70$ برقرار باشد که در آن عدد رینولدز زبری به صورت $K_S^+ = \frac{K_S u_*}{\nu}$ تعریف می‌گردد. K_S زبری معادل بوده که در این پژوهش برابر قطر ذرات رسوب در نظر گرفته شده است. مطابق شرایط آزمایشگاهی از یک ردیف ذرات با قطر ثابت در بستر به عنوان عناصر ایجاد زبری استفاده

است، ریزتر بوده و برای نواحی دورتر از مش بزرگ‌تری استفاده گردیده تا هزینه محاسباتی کاهش پیدا کند (شکل ۲). با چند بار سعی و خطا و بررسی همگرایی حل، ابعاد بهینه برای مش‌بندی هندسه‌ی مسئله به دست آمده است. برای این منظور پروفیل سرعت جریان در وسط کانال به دست آمده از مدل عددی با پروفیل سرعت تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت. با کاهش ابعاد سلول‌های محاسباتی درصد خطا کاهش یافته اما هزینه‌ی محاسباتی افزایش پیدا می‌کند. با بررسی به عمل آمده مشخص گردید ابعاد بهینه سلول‌های محاسباتی در راستای محور X بین دو تا پنج میلی‌متر، در راستای محور Y بین سه تا پنج میلی‌متر و برای محور Z که در جهت عرض کانال می‌باشد، برابر پنج میلی‌متر می‌باشد. 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.

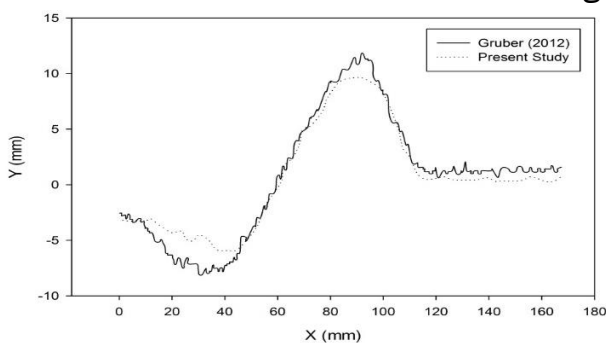


شکل ۲. نمایی از مش‌بندی هندسه و بزرگنمایی دو ناحیه

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 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 آشفته و نرخ اضمحلال آشفته‌گی نیز برای ورودی برابر مقدار ثابت و برای بقیه مرزها برابر گرادیان صفر منظور شده است. جریان به صورت 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 به دست می‌آید. این فاصله علاوه بر دلیل گفته شده، از آشفته‌گی موضعی جریان در اطراف ذرات ابتدایی در اثر گرادیان

هیدرولیکی بسیاری وجود دارد. عمق بستر فرسایش‌پذیر ۴۲ میلی‌متر بوده و در پشت این بستر، سطح بستر کانال به صورت ثابت ادامه می‌یابد. سرعت متوسط ورودی برابر ۰/۲۸۶ متربرثانیه و دبی جرمی ۰/۱۷۹ کیلوگرم برثانیه می‌باشد. همچنین از ذرات شیشه‌ای به قطر دو میلی‌متر به‌عنوان ذرات رسوب استفاده شده است. در مدل عددی سرریز در نظر گرفته نشده و سرعت پس از آن به عنوان شرایط مرزی سرعت در ورودی استفاده گردید. مقدار سرعت در مرز ورودی برابر با مقدار متوسط سرعت اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی قرار داده شد و شرایط مرزی سرعت برای دیواره‌ها به صورت عدم لغزش و شرط مرزی فشار به صورت گرادیان صفر اعمال گردیده است. فشار در خروجی نیز برابر صفر و فشار ورودی و سرعت خروجی نیز به صورت گرادیان ثابت به مرزهای مربوطه تحمیل شدند. سایر شرایط فیزیکی مسئله و سیال مورد استفاده مشابه پژوهش آزمایشگاهی انجام شده می‌باشد.

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 (۵) نتایج پروفیل بستر به دست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج Gruber (2012) بعد از گذشت زمان ۳۰ ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل شکل گرفته توسط ذرات رسوب در مدل عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی بوده و مدل عددی مقدار عمق و ارتفاع آبشستگی را کمتر از نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



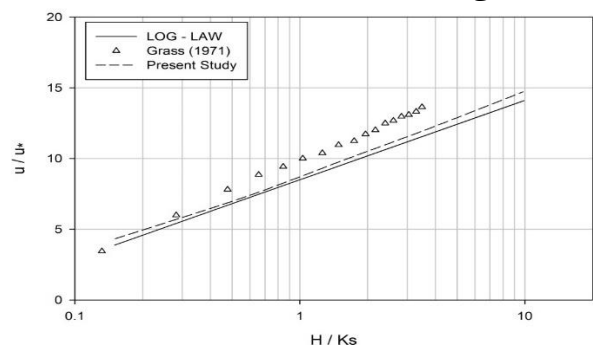
شکل ۵. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی آبشستگی پای سرریز بعد از ۳۰ ثانیه

در ادامه نتایج به دست آمده از آستانه حرکت ذرات رسوب با استفاده از روش سرعت بحرانی با نتایج آزمایشگاهی محققین دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی انتخاب شده دارای شرایطی تقریباً مشابه بوده و در کانال مستطیلی و با معیار آستانه حرکت حالت چهارم تعریف Kramer (1935) انجام شده‌اند. در نقطه‌ی آغازین حرکت ذره‌های رسوبی در بستر کانال

شده است. در حالت بستر زیر 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. پروفیل سرعت جریان روی یک بستر زبر با استفاده از رابطه‌ی (۲۴) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{H}{K_s} \right) + 8.5 \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

در این رابطه u سرعت جریان در راستای x و k ثابت ون کارمن بوده که برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده از مدل عددی و مقایسه با پروفیل سرعت لگاریتمی و نتایج Grass (1971) در رینولدز زبری ۷۴/۵ در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج برقرار بوده و مقدار درصد خطای مطلق بین حل عددی و تحلیلی پنج درصد و بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برابر ۱۱ درصد می‌باشد.

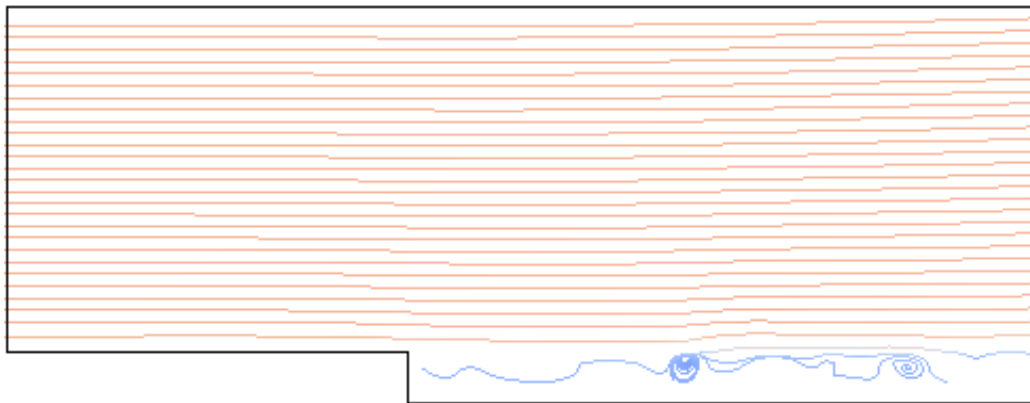


شکل ۴. پروفیل سرعت به‌دست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در زبری نسبی ۷۴/۵

برای صحت‌سنجی بخش لاگرانژی مدل از یک تحقیق آزمایشگاهی آبشستگی بعد از سرریز استفاده گردید (Gruber, 2012). کانال موردنظر 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 میلی‌تری در موقعیت ۰/۹ متری از مقطع ورودی نصب شده است. بستر فرسایش‌پذیر ۸۰ میلی‌متر بعد از انتهای سرریز شروع شده و ۳۰۰ میلی‌متر طول دارد. به جهت جلوگیری از فرسایش حجیم در پشت سرریز، فاصله ۸۰ میلی‌متری از بستر ثابت (فرسایش‌ناپذیر) تشکیل شده است که این همانند آن چیزی است که در واقعیت، در سازه‌های

رسوب گردابه تشکیل می شود.

نتایج شبیه سازی برای مدل حاضر در مقایسه با نتایج محققین دیگر که در پیشینه ذکر شده، در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش پارامتر اندازه نسبی ذره عدد فرود بحرانی ذره کاهش یافته به طوری که افزایش اندازه نسبی ذره از ۰/۰۰۰۹ به ۰/۱ سبب کاهش ۶۳ درصدی عدد فرود بحرانی می گردد. همچنین مطابق شکل، داده های به دست آمده از مدل را می توان به دو ناحیه تقسیم بندی نمود. قسمت اول شامل ذرات با اندازه نسبی کوچک تر از ۰/۰۰۸ که در این ناحیه شیب تغییرات بیشتر بوده و با افزایش اندازه نسبی از ۰/۰۰۰۹ به ۰/۰۰۸ عدد فرود بحرانی ۵۵ درصد کاهش می یابد. بخش دوم نیز شامل ذرات با اندازه نسبی بزرگ تر از ۰/۰۰۸ بوده که شیب تغییرات در این ناحیه کمتر از قسمت اول بوده و با افزایش اندازه ی نسبی از ۰/۰۰۸ تا ۰/۱ عدد فرود بحرانی حدود هشت درصد کاهش می یابد.



شکل ۶. خطوط جریان میدان حل پس از آستانه حرکت ذرات رسوب

با توجه به داده های شکل (۷) رابطه ی زیر جهت محاسبه ی آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی پیشنهاد می شود:

$$\frac{V_c}{[g(G_s - 1)D]^{0.5}} = 1.202 \left(\frac{R}{D}\right)^{0.176} \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

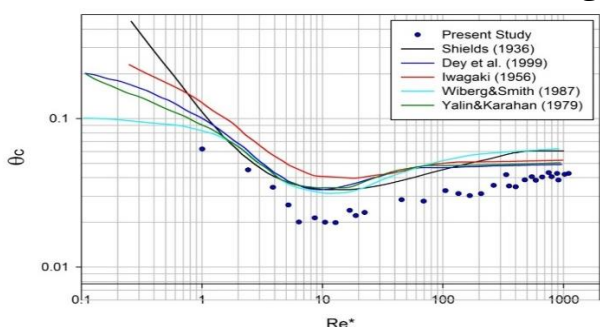
شکل (۸) مقایسه ی بین سرعت حاصل از مدل عددی و رابطه ی (۲۵) را نشان می دهد. مقدار ضریب همبستگی (R^2) و خطا با معیار خطای جذر میانگین مربع ها (RMSE) به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۴۹ بوده که در محدوده ی قابل قبولی می باشد. همچنین رابطه (۲۶) با ضریب همبستگی ۰/۹۶ و خطای ۰/۳۴ که دارای دقت بالاتری از رابطه ی (۲۵) می باشد، پیشنهاد می گردد:

ابتدا تعداد کمی از ذره ها با غلتیدن، پرش های کوتاه و یا به صورت لغزش جابجا می شوند. با افزایش دبی جریان تعداد ذره هایی که شروع به حرکت می کنند، به تدریج افزایش یافته تا جایی که هیچ ذره ای تحت تأثیر نیروهای وارده از طرف جریان ثابت نخواهد ماند. تشخیص آستانه حرکت ذره های رسوب در بستر کانال موضوعی انتزاعی بوده که نقش تعریف آستانه حرکت استفاده شده، حائز اهمیت می باشد. معیار آستانه حرکت ذرات در این پژوهش طبق حالت چهارم توصیف Kramer (1935) حرکت بی وقفه ی آن ها در هر زمان و مکان تحت تأثیر جریان سیال در نظر گرفته شده است.

شکل (۶) خطوط جریان را در دامنه ی حل در لحظه ی آستانه حرکت ذرات رسوب و حرکت به سمت پایین دست نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد خطوط جریان در ورودی به صورت موازی بوده و تقریباً تا خروجی به همین صورت باقی می ماند. اما در محل قرارگیری رسوب خطوط جریان دارای انحنا بوده و در برخی از موقعیت ها به دلیل قرارگیری شکل خاص ذرات

از مقایسه ی اطلاعات به دست آمده از مدل و میانگین نتایج محققین دیگر مشاهده می شود در قسمت اول عدد فرود بحرانی بیشتر و در قسمت دوم کمتر از مقدار میانگین عدد فرود به دست آمده می باشد. علت این موضوع یکنواخت بودن ذرات رسوب در مدل عددی بوده که سبب می گردد ذرات تحت سرعت کمتری به آستانه حرکت برسند. در حالی که در پژوهش های آزمایشگاهی انجام شده، ذرات دارای دانه بندی بوده و ذرات کوچک با قرار گرفتن بین ذرات بزرگ، محافظت شده و نسبت به مدل عددی تحت شدت جریان بیشتری به آستانه حرکت می رسند (پدیده سپری شدن). با کاهش قطر ذرات اثر پدیده ی سپری شدن کم رنگ شده و مشاهده می گردد در بخش اول نمودار بالاتر از میانگین نتایج محققین مختلف قرار گرفته است.

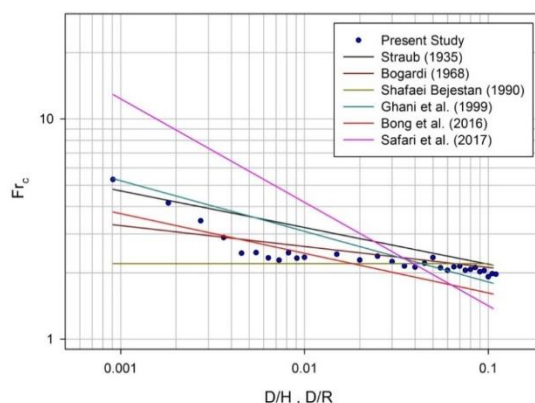
لزجت مایع بر حرکت ذرات تأثیر دارد. منطقه‌ی بینابین $Re^* > 5$ و منطقه‌ی با جریان با بستر زبر ($5 < Re^* < 250$) که در آن نیروی لزجت تأثیری رو حرکت ذره نداشته و عدد شیلدز بحرانی مقدار ثابتی است (Shafai Bejestan, 2009). در شکل (۹) نتایج به دست آمده از مدل حاضر با دیاگرام شیلدز و نتایج محققین دیگر مورد 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 عددی 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 عدم دانه‌بندی و شکل کروی ذرات بوده که در قسمت قبل تشریح شده است. همچنین مقدار پارامتر شیلدز بحرانی در ناحیه جریان با بستر زبر در این پژوهش برابر 0.4 به دست آمده که این مقدار برای دیاگرام‌های Shields (1936) و Wiberg and Smith (1987) برابر 0.6 و برای محققین دیگر تقریباً برابر 0.5 می‌باشد.



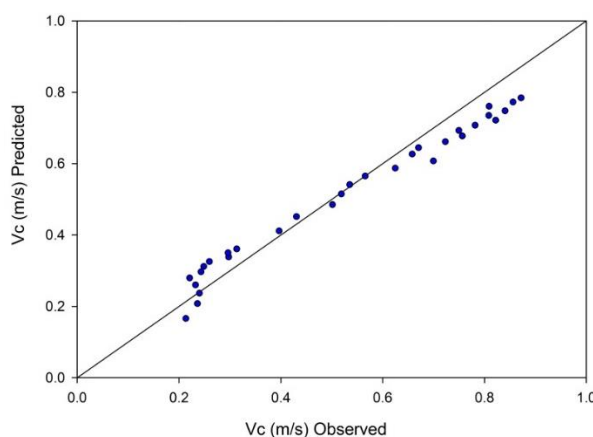
شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی آستانه حرکت

در ادامه با استفاده از دیاگرام Delft Hydraulics (1972) به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب پرداخته شده است. عدد رینولدز ذرات در این معیار بین یک تا 150 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 محدودی عدم حرکت ذرات در هر نقطه تا انتقال کلی را پوشش می‌دهد که این مراحل به صورت مشاهده‌ای به دست آمده است. در شکل (۱۰) نتایج به دست آمده از مدل عددی در

$$\frac{V_c}{[g(Gs-1)D]^{0.5}} = \frac{2.134}{1 - 0.78e^{-287.33 \frac{R}{D}}} \quad (\text{رابطه ۲۶})$$



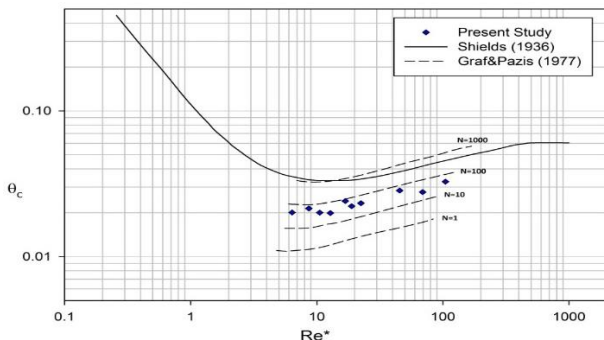
شکل ۷. مقایسه‌ی روابط مختلف آستانه حرکت ذرات رسوب در کانال مستطیلی



شکل ۸. مقایسه‌ی سرعت به دست آمده از مدل عددی و سرعت پیش‌بینی شده توسط رابطه ۲۵

همان‌طور که ذکر گردید معیار آستانه حرکت در پژوهش حاضر و اکثر تحقیقات مشابه انجام شده حالت چهارم روش Kramer (1935) بوده که روشی کیفی برای تعریف آستانه حرکت می‌باشد. در ادامه به معیارهای دیگر بررسی آستانه حرکت که توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته می‌شود. این معیارها شامل به دست آوردن نرخ انتقال صفر با استفاده از برون‌یابی نرخ انتقال اندازه‌گیری شده (دیاگرام Shields (1936) و اصلاحات صورت گرفته روی آن)، انتقال کیفی بر اساس مشاهدات (دیاگرام Delft Hydraulics (1972)) و تعداد ذرات متحرک در واحد سطح (دیاگرام Graf and Pabis (1977)) می‌شود. لازم به ذکر است مبنای همه معیارهای گفته شده روش تنش برشی بحرانی و روابط حاکم بر آن می‌باشد. با توجه به دیاگرام شیلدز جریان را می‌توان به سه ناحیه دسته‌بندی کرد. منطقه‌ی جریان با بستر صاف ($Re^* < 5$) که پارامتر شیلدز تابعی از عدد رینولدز برشی بوده و در این شرایط

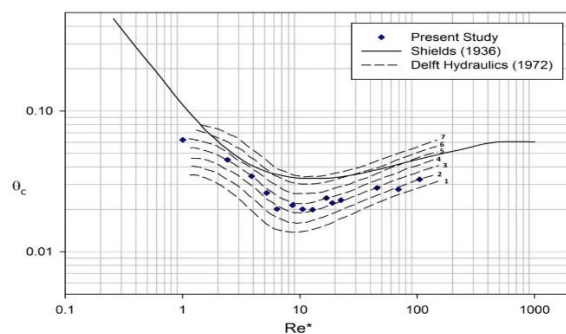
تقسیم‌بندی انجام داده‌اند. این تقسیم‌بندی‌ها شامل تعداد ذراتی است که اعداد رینولدز ذرات مختلف از جای خود حرکت می‌کنند. در مطالعات آن‌ها تعداد ذرات متحرک در واحد سطح یک، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ذره بوده و محدوده‌ی عدد رینولدز ذرات در این روش بین پنج تا ۱۰۰ می‌باشد. دیاگرام شیلدز در محدوده‌ی عدد رینولدز پنج الی 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 (۱۱) نتایج به‌دست آمده توسط مدل عددی در واحد سطح نشان می‌دهد. مطابق 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 Pazis (1977) 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 ۱۱. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Graf and Pazis (1977)

محدوده‌ی عدد رینولدز یک تا ۱۵۰ به همراه دیاگرام شیلدز و تقسیم‌بندی Delft Hydraulics (1972) نشان داده شده است. مطابق شکل مشهود است آستانه‌ی حرکت با معیار Shields (1936) منطبق بر حالات پنج و شش روش Delft Hydraulics (1972) می‌باشد. این موضوع مؤید آن است که آستانه‌ی حرکت طبق معیار Delft Hydraulics (1972) تحت جریان‌های قوی‌تری نسبت به Shields (1936) 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 (1972) نسبت به دیاگرام Shields (1936) با سرعت بیشتری رخ داده و به همین دلیل نتایج مدل عددی در حالات میانی این معیار قرار گرفته است.

Graf and Pazis (1977) با استفاده از معیار تعداد ذراتی که از واحد سطح در واحد زمان ترک موقعیت می‌کنند، چهار



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل و داده‌های آزمایشگاهی Delft Hydraulics (1972)

سرعت آستانه حرکت ذرات در روش سرعت بحرانی پیشنهاد می‌گردد.

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

با مقایسه‌ی داده‌های به دست آمده از مدل عددی و دیاگرام

Shields (1936) و محققین دیگر مشاهده گردید پارامتر شیلدز بحرانی در پژوهش حاضر کمتر از سایرین می‌باشد. مهم‌ترین علت این موضوع یکنواختی در نظر گرفتن قطر ذرات بوده که سبب می‌شود که پدیده‌ی سپری شدن رخ نداده و ذرات رسوب تحت

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از توسعه یک مدل عددی و با رویکرد اویلری - لاگرانژی به شبیه‌سازی دوبعدی آستانه حرکت گروهی ذرات رسوب در جریان آشفته پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از مدل عددی مذکور نشان می‌دهد:

با افزایش اندازه نسبی ذره از ۰/۰۰۰۹ به ۰/۱ عدد فرود بحرانی ۶۳ درصد کاهش یافته و برای رابطه‌ی آستانه حرکت ذرات در روش سرعت بحرانی ضرایب a و b به ترتیب برابر ۱/۲۰۲ و ۰/۱۷۶ به‌دست آمده است. همچنین رابطه‌ی زیر جهت پیش‌بینی

Delft (1972)، حرکت ذرات در حالت چهار رخ داده که بیانگر حرکت مکرر ذره در تقریباً همگی 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 همگی موقعیت‌ها است.

جریان با شدت کمتر زودتر به آستانه حرکت خود برسند. پارامتر شیلدز بحرانی برای ناحیه‌ی جریان با بستر زبر در پژوهش حاضر برابر 0.04 به دست آمده که این پارامتر در پژوهش محققین دیگر بین 0.05 و 0.06 پیشنهاد گردیده است. در ناحیه‌ی جریان با بستر صاف طبق معیار Hydraulics

REFERENCES

- Ab Ghani, A., Salem, A. M., Abdullah, R., Yahaya, A. S., & Zakaria, N. A. (1999). Incipient motion of sediment particles over loose deposited beds in a rigid rectangular channel. In *Proc. the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage*.
- Ackers, P., & White, W. R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 99(hy11).
- Bogardi, J. L. (1968). Incipient sediment motion in terms of critical mean velocity. *Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 62(1-2), 1.
- Bong, C. H. J., Lau, T. L., & Chan, N. W. (2016). Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion. *Water Science and Technology*, 74(8), 1876-1884.
- Hydraulics, D. (1972). Systematic investigation of two-dimensional and three-dimensional scour. *Report M648 M*, 863.
- 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.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, 48, 89-94.
- El-Zaemey, A. K. S. (1991). *Sediment transport over deposited beds in sewers*. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Newcastle upon Tyne.
- Garde, R. J., & Raju, K. R. (2000). *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. Taylor & Francis.
- Gidaspow, D., Bezburaah, R., & Ding, J. (1991). *Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach* (No. CONF-920502-1). Illinois Inst. of Tech., Chicago, IL (United States). Dept. of Chemical Engineering.
- Graf, W. H., & Paxis, G. C. (1977). Les phénomènes de déposition et d'érosion dans un canal alluvionnaire; érosion et déposition; un concept probabiliste; Weak sediment transport.
- Grass, A. J. (1971). Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Journal of fluid Mechanics*, 50(2), 233-255.
- Gregoretti, C. (2000). The initiation of debris flow at high slopes: experimental results. *Journal of Hydraulic Research*, 38(2), 83-88.
- Gruber, K. (2012). *Sediment transport in open channel flows-Experimental investigation and numerical simulation of local scour development downstream of a weir*. Ph. D. dissertation, Johannes Kepler University Linz.
- Iwagaki, Y. (1956). (I) Hydrodynamical study on critical tractive force. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, 1956(41), 1-21.
- Kramer, H. (1935). Sand mixtures and sand movement in fluvial model. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), 798-838.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.
- Mei, R., & Klausner, J. F. (1994). Shear lift force on spherical bubbles. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 15(1), 62-65.
- Nalluri, C., & Ghani, A. A. (1996). Design options for self-cleansing storm sewers. *Water Science and Technology*, 33(9), 215-220.
- Nasrollahi, A., Salehi Neyshabouri, S. A. A., Ahmadi, G., & Namin, M. M. (2008). Numerical simulation of particle saltation process. *Particulate Science and Technology*, 26(6), 529-550.
- Neill, C. R. (1968). Note on initial movement of coarse uniform bed-material. *Journal of Hydraulic Research*, 6(2), 173-176.
- در جدول ۱ آمده است
- Novak, P., & Nalluri, C. (1975). Sediment transport in smooth fixed bed channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 101(ASCE# 11556 Proceeding).
- Novak, P., & Nalluri, C. (1984). Incipient motion of sediment particles over fixed beds. *Journal of Hydraulic Research*, 22(3), 181-197.
- Odar, F., & Hamilton, W. S. (1964). Forces on a sphere accelerating in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 18(2), 302-314.
- Rottner, J. (1959). A formula for bed load transportation. *La Houille Blanche*, 14(3), 285-307.
- Safari, M. J. S., Aksoy, H., Unal, N. E., & Mohammadi, M. (2017). Experimental analysis of sediment incipient motion in rigid boundary open channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(6), 1281-1298.
- Salem, A. M. (2013). 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*.
- Shafai Bejestan, M. (2009). *Basic theory and practice of Hydraulic of sediment transport*. Shahid Chamran University.
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.
- Straub, L. G. (1935). Some observations of sorting of

- river-sediments. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), 463-467.
- Vetsch, D. F. (2012). Numerical simulation of sediment transport with meshfree methods. Ph. D. dissertation, ETH Zurich.
- Wen, C. Y. (1966). Mechanics of fluidization. In *Chem. Eng. Prog., Symp. Ser.* (Vol. 62, pp. 100-111).
- 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.
- Yalin, M. S., & Karahan, E. (1979). Inception of sediment transport. *Journal of the hydraulics division*, 105(11), 1433-1443.
- 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.
- Zou, S. (2007). Coastal sediment transport simulation by smoothed particle hydrodynamics. Ph. D. dissertation, The Johns Hopkins University.