



مرکز بررسی اطلاعات و پژوهش

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی  
**ICOPMAS 2010**  
 10-8 آذر ماه ( تهران )



## مدل سازی دوفازه ی لاگرانژ-لاگرانژ انتقال بار بستر در حالت انتقال جهشی

عباس یگانه بختیاری، استادیار، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، [yeganeh@iust.ac.ir](mailto:yeganeh@iust.ac.ir)

احسان کاظمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، [kazemi@civileng.iust.ac.ir](mailto:kazemi@civileng.iust.ac.ir)

حمید هوشنگی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، [houshanghi@civileng.iust.ac.ir](mailto:houshanghi@civileng.iust.ac.ir)

### چکیده

انتقال رسوبات بصورت بار بستر در ایجاد مشکلات زیست محیطی و اقتصادی در بنادر و کاهش عمر مفید سازه های ساحلی نقش اساسی دارد. از این رو، این پدیده از مسائل بسیار مهم در مهندسی سواحل به حساب می آید. انتقال بار بستر در تنش های برشی کم تا متوسط جریان به صورت انتقال جهشی و در تنش های برشی زیاد به صورت انتقال توده ای انجام می گیرد. در مقاله ی حاضر، یک مدل دوفازه ی لاگرانژ-لاگرانژ بر پایه ی روش ذره ای SPH برای شبیه سازی هیدرودینامیک انتقال بار بستر در حالت انتقال جهشی تحت جریان یکطرفه توسعه یافته است. در مدل دوبعدی حاضر، فازهای سیال و رسوب به طور مجزا مدل سازی گشته و برهمکنش آن ها با تعریف نیروی دراگ به عنوان ترم اندرکنش سیال-رسوب در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی میدان سرعت جریان با نتایج آزمایشگاهی یگانه بختیاری (1997) مقایسه گردیده است. مطابقت خوب بین نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی بیانگر قدرت مدل لاگرانژ-لاگرانژ حاضر در شبیه سازی مکانیسم انتقال رسوبات تحت تنش های متوسط می باشد.

**کلید واژه:** انتقال بار بستر، حالت انتقال جهشی، مدل دوفازه، هیدرودینامیک ذرات هموار، مکانیسم اندرکنش

### 1- مقدمه

انتقال رسوبات بصورت بار بستر<sup>1</sup> نحوه ی تاثیر هیدرولیک میدان جریان بر روی شکل بستر را نشان می دهد و بر روی پایداری بستر نیز به شدت تاثیر گذار است. از این رو، مدل سازی صحیح انتقال بار بستر به عنوان یک امر مهم در مهندسی سواحل به حساب می آید. به علت وجود شرایط مختلف میدان جریان و ساختار پیچیده ی پدیده ی انتقال رسوبات به صورت بار بستر، مدل سازی آن بسیار مشکل و پرهزینه می باشد. از طرف دیگر با پیشرفت چشمگیری که اخیراً در عرصه ی صنعت رایانه صورت گرفته، شبیه سازی عددی به عنوان یک ابزار بسیار قدرتمند در مطالعه ی هیدرودینامیک انتقال رسوب استفاده می شود. انتقال به صورت بار بستر بسته به مقدار تنش برشی جریان ممکن است در حالت های متفاوتی صورت بپذیرد. در تنش های برشی کم تا متوسط، حرکت دانه های رسوبی بستر به صورت جهشی صورت می گیرد که این حالت از انتقال رسوبات را حالت انتقال جهشی<sup>2</sup> می نامند [1]. در تنش های برشی زیادتر، لایه های بالاتر ذرات بستر بر روی لایه های زیرین خود می لغزند و در حین برخورد به یکدیگر به صورت توده ای حرکت می کنند [2]. به این حالت از انتقال بار بستر، انتقال توده ای<sup>3</sup> می گویند.

با نگرشی کلی بر پیشینه مطالعات انتقال بار بستر، اکثر تحقیقات انجام یافته ی اخیر در زمینه ی مدل سازی انتقال بار بستر بر اساس مدل دوبویس (1879) می باشد [3]. پس از مدل دوبویس، مدل های متنوعی برای مدل سازی انتقال بار بستر در حالت انتقال جهشی ارائه گردیده است. در مدل های قدیمی تر عموماً مخلوط رسوب-سیال به صورت یک محیط تک فاز در نظر گرفته می شود، در حالی که در مدل های نسل جدید که به عنوان ابزاری دقیق تر ارائه می شوند، بار بستر به صورت دو فاز مجزای رسوب و سیال شبیه سازی می شود. در مدل های دوفازه ای که تاکنون برای شبیه سازی انتقال بار بستر در حالت جهشی ارائه شده اند، معادلات حاکم بر فاز سیال اغلب به شکل اویلری ارائه شده اند، در صورتی که برای بیان معادلات حاکم بر فاز رسوب از دیدگاه اویلری یا لاگرانژی استفاده شده است. کوبایاشی و سئو (1985) یک مدل اویلر-اویلر را برای

<sup>1</sup> Bed-load transport

<sup>2</sup> Saltation

<sup>3</sup> Sheet-flow

شبیه سازی انتقال رسوب تحت جریان دائمی به کار برده‌اند [4]. آسانو (1990) نیز با توسعه مدل کوپایاشی و سئو مدلی برای شبیه سازی انتقال بار بستر تحت اثر جریان رفت و برگشتی ارائه نمود [5]. نتایج مدل آسانو (1990) تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی هوریکاوا و همکارانش (1982) دارد [6]. مدل‌های دو فازه‌ی اویلر-اویلری که برای شبیه سازی انتقال رسوبات به صورت چھشی ارائه شده‌اند، در مدلسازی حرکات اتفاقی ذرات رسوب کارایی لازم را ندارند و به همین دلیل مدل ترکیبی اویلر-لاگرانژ به عنوان ابزاری برای رفع این نقیصه ارائه شده است. در مدل لاگرانژی رسوب، حرکت ذرات از طریق دنبال گردی تک تک ذرات رسوب و یا دانه‌های رسوب نماینده توصیف می‌شود، بنابراین رفتار نامنظم رسوب به خوبی قابل شبیه سازی می‌شود. ویبرگ و اسمیت (1989) یک مدل اویلر-لاگرانژ یک طرفه برای شبیه سازی انتقال بار بستر در حالت انتقال چھشی ارائه نموده‌اند [7]. در این مدل، بخاطر محاسبه‌ی نیروهای دراگ بزرگی که از طرف سیال بر ذرات رسوب وارد می‌گردد، میزان چھش ذرات رسوب بیش از حد انتظار تخمین زده شده است. کمپیل و برنن (1985) از یک مدل دانه‌ای که بر مبنای نگرش برخورد صلب<sup>4</sup> بین ذرات رسوب استوار است برای شبیه‌سازی بار بستر استفاده کرده‌اند [8]. این نگرش در انتقال رسوبات به صورت توده‌ای به علت برخوردهای همزمان بین ذرات رسوب دارای کاستی است، در صورتی که در نگرش برخورد نرم<sup>5</sup> که در طی برخورد تا حدی اجازه‌ی تغییر شکل پلاستیک و همپوشانی به ذرات رسوب داده می‌شود شبیه‌سازی این گونه مسائل بسیار مناسب‌تر و راحت‌تر صورت می‌گیرد. یگانه بختیاری و همکاران (2000) یک مدل دو فازه‌ی اویلر-لاگرانژ بر پایه‌ی روش المان‌های مجزا<sup>6</sup> با نگرش برخورد نرم بین ذرات برای شبیه سازی انتقال بار بستر ارائه کرده‌اند که در این مدل، میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  شبیه سازی شده است [9]. در این مدل در شبیه‌سازی حالت انتقال چھشی، اندرکنش بین سیال و ذرات رسوب به عنوان مکانیسم اصلی تبادل مومنتوم در نظر گرفته شده و در شبیه سازی حالت انتقال توده، برخوردهای بین ذرات رسوب عامل اصلی انتقال مومنتوم معرفی شده است. نتایج شبیه سازی این مدل با نتایج آزمایشگاهی یگانه بختیاری (1997) [10] مقایسه گردیده و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردیده است. مدل‌های اویلر-لاگرانژی که برای رفع کاستی‌های مدل‌های اویلر-اویلر ارائه شده‌اند در توصیف مکانیسم اندرکنش در انتقال بار بستر دچار کاستی‌هایی می‌باشند. یکی از این کاستی‌ها در مدل‌های اویلر-لاگرانژی در گسسته سازی میدان جریان می‌باشد که باعث می‌شود تا نتایج مدل عددی به شدت نسبت به اندازه شبکه حساس باشد و اگر در انتخاب اندازه‌ی المان‌های شبکه دقت کافی صورت نگیرد ممکن است در نتایج شبیه‌سازی خلل جدی ایجاد نماید. به عبارت دیگر، اندازه مش در حوزه سیستم اویلری تعیین کننده اندازه دانه‌های رسوب در حوزه لاگرانژی رسوبات می‌باشد. از این رو، در مدل ارائه شده حاضر، علاوه بر حوزه‌ی محاسباتی میدان رسوبات، برای گسسته سازی حوزه‌ی محاسباتی سیال و همچنین معادلات حاکمه‌ی فاز سیال و رسوب نیز از روش ذره‌ای هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>7</sup> مبتنی بر دیدگاه لاگرانژی استفاده شده است. به منظور صحت سنجی کارکرد مدل عددی توسعه یافته حاضر، نتایج میدان سرعت جریان با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه گردیده است.

## 2- مدلسازی عددی

شکل (1) حوزه‌ی محاسباتی شبیه‌سازی شده‌ی باربستر را در مختصات دو بعدی نشان می‌دهد. در مدل دو فازه‌ی لاگرانژ-لاگرانژ حاضر، میدان جریان و میدان رسوب به طور مجزا گسسته سازی می‌شوند و سپس برای بهم پیوستن فازهای سیال و رسوب از نیروی دراگ به عنوان ترم اندرکنش سیال-رسوب استفاده می‌شود.

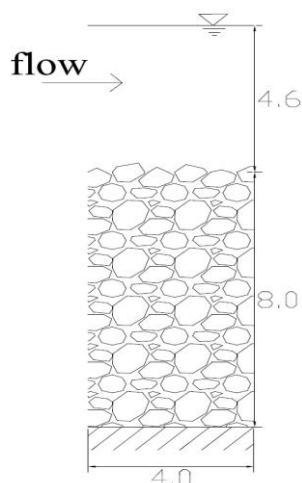
ICOPMAS

<sup>4</sup> Hard contact

<sup>5</sup> Soft contact

<sup>6</sup> Distinct Element Method (DEM)

<sup>7</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)



شکل (1) شرایط هندسی مساله (واحد ابعاد به سانتیمتر است)

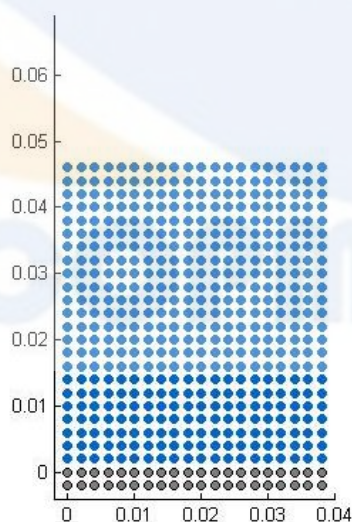
## 1-2- فاز سیال

شکل (2) حوزه محاسباتی میدان سیال و چیدمان اولیه ذرات سیال را نشان می‌دهد. در مدل حاضر، حوزه‌ی محاسباتی میدان جریان با استفاده از یک میدان پرپودیک یا تکرار شونده شامل 23 ذره در طول، 20 ذره در ارتفاع و در مجموع 460 ذره سیال با اندازه‌ی برابر با  $d_f = 0/002$  متر تشکیل شده که هریک از این ذرات دارای چگالی برابر با  $\rho_0 = 1000$  کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند. معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات ناویر-استوکس تراکم ناپذیر شامل معادلات بقای جرم یا پیوستگی و مومنوم دو بعدی هستند که در الگوی لاگرانژی به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{1}{\rho_f} \frac{D\rho_f}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P_f + \mathbf{g} + \nu_f \nabla^2 \mathbf{u}_f + F_{s-f} \quad (2)$$

در معادلات بالا  $\rho_f$ ، چگالی؛  $\mathbf{u}_f$ ، سرعت؛  $P_f$ ، فشار؛  $\nu_f$ ، لزجت لایه‌ای سیال؛  $\mathbf{g}$  شتاب گرانش و  $F_{s-f}$  نیروی اندرکنش بین فاز سیال و رسوب است که از رسوب به سیال وارد می‌شود.



شکل (2) ابعاد و موقعیت اولیه ذرات سیال (ابعاد به متر می‌باشند)

معادلات حاکمه‌ی فاز سیال به روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (I-SPH) گسسته سازی می‌شوند. برای حل این معادلات، از یک الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح<sup>8</sup> پیش رونده در زمان استفاده می‌شود که در مرحله‌ی پیش‌بینی، سرعت و موقعیت ذرات در نیم‌گام زمانی بدون در نظر گرفتن فشار تعیین شده و سپس در مرحله‌ی تصحیح، این مقادیر با در نظر گرفتن ترم گرادیان فشار در معادله‌ی مومنوم اصلاح می‌شوند.

<sup>8</sup> Prediction-Correction fractional steps

مرحله‌ی پیش‌بینی یک گام صریح بدون اعمال تراکم‌ناپذیری می‌باشد. با در نظر گرفتن ترم لزجت، شتاب گرانش و نیروی مرکزکشی به ترتیب زیر مقادیری برای سرعت و موقعیت ذرات سیال تخمین زده می‌شود.

$$\Delta \mathbf{u}_f^* = (\mathbf{g} + \nu_f \nabla^2 \mathbf{u}_f^n + F_{d-f}) \Delta t \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_f^* &= \mathbf{u}_f^n + \Delta \mathbf{u}_f^* \\ \mathbf{r}_f^* &= \mathbf{r}_f^n + \mathbf{r}_f^* \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

در معادلات بالا  $\mathbf{r}_f^*$  و  $\mathbf{r}_f^n$ ، سرعت و موقعیت ذرات سیال در گام زمانی  $n$ ؛  $\mathbf{u}_f^*$  و  $\mathbf{u}_f^n$ ، سرعت و موقعیت ذرات سیال در نیم‌گام زمانی؛  $\Delta \mathbf{u}_f^*$  اختلاف سرعت ایجاد شده در مرحله‌ی پیش‌بینی؛ و  $\Delta t$  بیانگر گام زمانی می‌باشد. پس از این محله، مقادیر مربوط به چگالی ذرات در نیم‌گام زمانی از معادله‌ی (5) محاسبه می‌شود.

$$\rho_a^* = \sum_b m_b W(\mathbf{r}_a^* - \mathbf{r}_b^*, h) \quad (5)$$

در نیم‌گام زمانی، تراکم‌ناپذیری سیال اعمال نمی‌شود. بنابراین نیاز به مرحله‌ای می‌باشد تا بتوان با اعمال تراکم‌ناپذیری مقادیر بدست آمده را تصحیح نمود. در مرحله‌ی تصحیح، مقادیر بدست آمده برای سرعت و موقعیت ذرات با استفاده از ترم گرادیان فشار در معادله‌ی مومنتوم اصلاح می‌شوند.

$$\Delta \mathbf{u}_f^{**} = \left( -\frac{1}{\rho_f^*} \nabla P_f^{n+1} \right) \Delta t \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_f^{n+1} = \mathbf{u}_f^* + \Delta \mathbf{u}_f^{**} \quad (7)$$

که  $\Delta \mathbf{u}_f^{**}$ ، اختلاف سرعت ایجاد شده در مرحله‌ی تصحیح؛ و  $P_f^{n+1}$  و  $\mathbf{u}_f^{n+1}$ ، فشار و سرعت ذرات سیال در گام زمانی  $n+1$  را نشان می‌دهند. و در نهایت، موقعیت جدید ذرات با متوسط گیری زمانی مطابق با معادله‌ی ذیل محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{r}_f^{n+1} = \mathbf{r}_f^n + \frac{\mathbf{u}_f^{n+1} + \mathbf{u}_f^n}{2} \Delta t \quad (8)$$

که در آن  $\mathbf{r}_f^{n+1}$ ، موقعیت ذرات سیال در گام  $n+1$  می‌باشد. برای اعمال تراکم‌ناپذیری در گام تصحیح، از معادله‌ی پیوستگی (معادله‌ی (1)) استفاده شده و فشار محاسبه می‌شود. این معادله در شکل گسسته به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_0 - \rho_f^*}{\Delta t} + \nabla \cdot (\Delta \mathbf{u}_f^{**}) = 0 \quad (9)$$

با ترکیب معادلات (6) و (9)، معادله‌ی پواسون فشار به صورت ذیل به دست می‌آید.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho_f^*} \nabla P_f^{n+1} \right) = \frac{\rho_0 - \rho_f^*}{\rho_0 \Delta t^2} \quad (10)$$

معادله پواسون فشار را با توجه به فرمولاسیون لاپلاسیان در SPH به صورت ذیل گسسته سازی می‌شود:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla P \right)_a = \sum_b m_b \frac{8}{(\rho_a + \rho_b)^2} \frac{P_{ab} \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{|\mathbf{r}_{ab}|^2 + \eta^2} \quad (11)$$

در معادله‌ی بالا،  $P_{ab} = P_a - P_b$ ؛  $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$  و  $\eta = 0.1h$  ضریب ثابتی است که دارای مقداری برای جلوگیری از صفر شدن مخرج معادله می‌باشد. با قرار دادن معادله‌ی (11) در معادله‌ی (10)، این معادله تبدیل به یک دستگاه معادله‌ی خطی می‌شود که ماتریس ضرایب نظیر آن یک ماتریس متقارن و دارای مقادیر ویژه مثبت می‌باشد که به راحتی می‌توان با روش‌های تکراری آن را حل کرد. پس از تعیین فشار ذرات، ترم گرادیان فشار از معادله‌ی مومنتوم برای ذره‌ی دلخواه  $a$  توسط شکل استاندارد روش I-SPH، به صورت معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\left( \frac{\nabla P}{\rho} \right)_a = \sum_b m_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (12)$$

با توجه به فرمولاسیون SPH برای دیورژانس، ترم مربوط به لزجت سیال در معادله مومنتوم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [11]:

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau}\right)_a = \sum_b m_b \left(\frac{\vec{\tau}_a}{\rho_a^2} + \frac{\vec{\tau}_b}{\rho_b^2}\right) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (13)$$

که  $\vec{\tau}$ ، تانسور تنش است و با تانسور تغییر شکل ( $\vec{\Delta}$ ) ارتباط مستقیم دارد.

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu_{eff} \Delta_{ij} \quad (14)$$

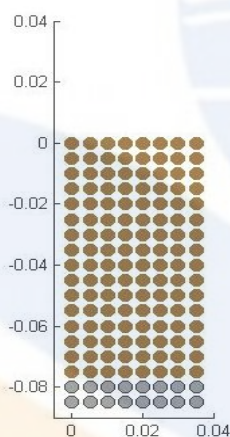
که  $\mu_{eff}$ ، ضریب لزجت است که در سیالات نیوتنی یک مقدار ثابت است و در سیالات غیر نیوتنی بر اساس نرخ کرنش تغییر می‌کند. ترم لزجت سیال نیوتنی از معادله‌ی مومنتم پس از ساده سازی به صورت رابطه‌ی زیر در می‌آید [11].

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau}\right)_a = (\nu \nabla^2 \mathbf{u})_a = \sum_b \frac{4m_b (\mu_a + \mu_b) \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)^2 (|\mathbf{r}_{ab}|^2 + \eta^2)} (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_b) \quad (15)$$

که  $\mu$ ، لزجت سیال است.

## 2-2- فاز رسوب

شکل (3) حوزه محاسباتی میدان رسوب و چیدمان اولیه‌ی ذرات رسوب را نشان می‌دهد. در مدل حاضر، حوزه محاسباتی میدان رسوبات با استفاده از یک میدان پرپودیک یا تکرار شونده شامل 16 ذره‌ی رسوب در ارتفاع و 8 ذره در طول و در مجموع 128 ذره‌ی رسوب با اندازه‌ی برابر با  $d_s = 0/005$  متر تشکیل شده است که هریک از ذرات دارای چگالی برابر با  $\rho_0 = 2600$  کیلو گرم بر متر مکعب می‌باشند.



شکل (3) ابعاد و موقعیت اولیه‌ی ذرات رسوب (ابعاد به متر می‌باشند)

فاز رسوب در مدل دوفازه‌ی انتقال بار بستر حاضر به صورت یک سیال غیرنیوتنی شبیه‌سازی شده و حرکت ذرات رسوب بستر به صورت لاگرانژی مدل می‌شود. معادلات حاکم بر میدان رسوب همان معادلات ناویر-استوکس به ترتیب شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم می‌باشند که در الگوی لاگرانژی همانند فاز سیال به شکل زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u}_s = 0 \quad (16)$$

$$\frac{D\mathbf{u}_s}{Dt} = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P_s + \mathbf{g} + \nu_s \nabla^2 \mathbf{u}_s + F_{f-s} \quad (17)$$

در این معادلات  $\rho_s$ ، چگالی؛  $\mathbf{u}_s$ ، سرعت؛  $P_s$ ، فشار؛  $\nu_s$ ، لزجت لایه‌ای میدان رسوب؛ و  $F_{f-s}$  نیروی اندرکنش بین دو فاز می‌باشد که جریان به ذرات رسوب وارد می‌کند. تحلیل معادلات حاکم بر میدان رسوبات همانند حل معادلات حاکم بر میدان جریان سیال، به کمک الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح صورت می‌گیرد. چگالی ذرات رسوب نیز عیناً، شبیه چگالی سیال تخمین زده می‌شود، اما برای محاسبه‌ی فشار در میدان رسوب مانند میدان سیال عمل می‌شود با این تفاوت که پس از تعیین فشار وارد بر هر ذره‌ی رسوب، مقدار فشار ستون آب روی هر ذره‌ی رسوب به مقدار فشار محاسبه شده اضافه می‌گردد و پس از آن ترم گرادیان فشار برای ذرات رسوب طبق معادله‌ی (12) محاسبه می‌شود.

چنان که اسکند (1967) بیان نمود، در یک سیال غیرنیوتنی، رابطه‌ی بین تنش برشی با کرنش برشی خطی نیست [12]. این نوع سیالات دارای یک تنش برشی بحرانی می‌باشند که برای مقادیر پایین‌تر از آن، سیال جریان نمی‌یابد و بدین علت گاهاً سیالات ویسکو-پلاستیک<sup>9</sup> نامیده می‌شوند [13]. تا وقتی که تنش برشی وارد بر یک سیال غیرنیوتنی از مقدار تنش برشی بحرانی تجاوز نکند، سیال رفتاری مشابه با یک جسم جامد دارد اما هنگامی که تنش برشی از این مقدار تخطی کند، سیال همانند یک سیال نیوتنی با لزجت ثابت شروع به حرکت می‌کند. رفتار شکل‌پذیری سیال را می‌توان بر اساس رابطه‌ی بین تنش برشی و نرخ کرنش توصیف کرد. یکی از ساده‌ترین مدل‌هایی که برای تعریف رفتار ویسکو-پلاستیک سیالات غیرنیوتنی استفاده می‌شود مدل شکل‌پذیر بینگهام می‌باشد. براساس این مدل، حرکت سیال زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی وارد بر سیال ( $\tau$ ) از تنش برشی بحرانی ( $\tau_y$ ) تخطی کند. معادله‌ی حرکت سیال بر اساس مدل بینگهام به صورت زیر بیان می‌شود.

$$|\tau| \leq \tau_y \rightarrow \mathbf{S} = 0$$

$$|\tau| > \tau_y \rightarrow \tau = \left( \frac{\tau_y}{|\mathbf{S}|} + 2\mu_s \right) \mathbf{S} \quad (18)$$

که

$$|\mathbf{S}| = \sqrt{\mathbf{S} : \mathbf{S}} = \sqrt{\sum_{i,j} S_{ij} S_{ij}} \quad (19)$$

در روابط فوق،  $\mu_s$ ، لزجت پلاستیک سیال غیرنیوتنی و  $|\mathbf{S}|$ ، نرخ ثابت کرنش برشی ( $\mathbf{S}$ ) است. نرخ کرنش برشی ( $\mathbf{S}$ )، با فرض میدان سرعت به فرم  $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ ، در فضای دوبعدی با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla' \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ترم‌های مشتق سرعت در معادله‌ی بالا به راحتی با فرمولاسیون SPH تقریب زده و گسسته‌سازی می‌شوند. حال می‌توان تانسور تنش ( $\tau$ ) را محاسبه کرد. بدین ترتیب، ترم لزجت لایه‌ای از معادله‌ی مومنتوم بر اساس فرمولاسیون استاندارد SPH برای محاسبه‌ی دیورژانس به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

$$\left( \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau \right)_a = \sum_b \left( \frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (21)$$

که  $\nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$ ، گرادیان کرنل است که نسبت به ذره‌ی  $a$  گرفته می‌شود. قابل ذکر است که حاصل ضرب نقطه‌ای تانسور تنش  $\tau$  و بردار گرادیان کرنل  $\nabla W$ ، یک بردار می‌باشد.

## 2-4- مؤلفه‌ی اندرکنشی سیال-رسوب

در انتقال بار بستر، که نیروهای اصطکاک بین جریان و رسوبات بستر عامل حرکت دانه‌های رسوب می‌باشند نیروی دراگ مهمترین نیرو در اکثر جریان‌های دوفازه‌ی سیال-رسوب محسوب می‌شود. در مدل حاضر، از اثر نیروی لیفت<sup>10</sup> صرف‌نظر شده و صرفاً نیروی دراگ به دلیل اهمیتی که در انتقال بار بستر دارد به عنوان عمده‌ترین نیروی اندرکنشی بین سیال و رسوب در نظر گرفته شده است. نیروی دراگ برای هر ذره‌ی رسوب با رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d A |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) \quad (22)$$

که در معادلات بالا  $\rho_s$ ، چگالی رسوب؛  $C_d$ ، ضریب دراگ؛  $\mathbf{u}_f$ ، سرعت میدان جریان؛  $\mathbf{u}_s$ ، سرعت ذره‌ی رسوب و  $A$ ، سطح مقطع عمود بر جریان ذره‌ی رسوب می‌باشد که در مدل دوبعدی حاضر برابر با اندازه‌ی ذره در نظر گرفته می‌شود. ضریب دراگ تابعی از عدد رینولدز ذرات بار بستر می‌باشد. برای تعیین ضریب دراگ از مدل مورسی و الکساندر (1972) استفاده شده است [14]. نهایتاً با توجه تقریب نیروی دراگ به روش SPH می‌توان نیروی اندرکنش سیال-رسوب را به شکل زیر بدست آورد.

<sup>9</sup> Visco-Plastic

<sup>10</sup> Lift

$$F_{f-s} = \frac{F_a}{m_s} = \frac{1}{2} \sum_b \frac{m_b}{m_a} C_d D_a |\mathbf{u}_b - \mathbf{u}_a| (\mathbf{u}_b - \mathbf{u}_a) W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (23)$$

که عمل جمع بر روی ذرات  $b$  که در محدوده‌ی تأثیر ذره‌ی  $a$  قرار دارند صورت می‌گیرد. نیروی بدست آمده نیروی دراگ وارد بر ذرات رسوب است و نیروی عکس العمل آن نیروی وارد بر ذرات سیال است که با اعمال ضریب منفی (-) در این رابطه محاسبه می‌شود.

## 2-5- شرایط مرزی

### دیواره‌ی صلب

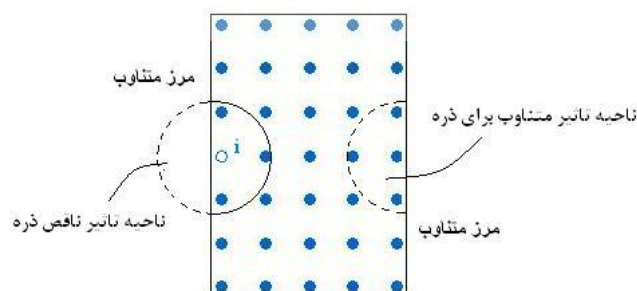
مرزهای جامد با تعریف ذراتی با موقعیت ثابت بر روی مرز شبیه‌سازی شده‌اند. این ذرات با اعمال نیروی دافعه به ذرات سیال واقع در نزدیکی مرز جامد، مانع از نفوذ آنها به داخل دیواره می‌شوند. علاوه بر این، چند ردیف از ذرات دیگر نیز برای کامل نمودن ناحیه‌ی تأثیر ذرات مرزی در بیرون مرزهای جامد قرار داده می‌شود که اصطلاحاً ذرات مجازی<sup>11</sup> نامیده می‌شوند. تعداد لایه‌های ذرات مجازی تنها به مقدار طول هموار ( $h$ ) بستگی دارد که در مدل حاضر دو لایه در نظر گرفته شده است.

### سطح آزاد

هنگامی که یک ذره‌ی سیال در روی سطح آزاد قرار بگیرد، چگالی آن نسبت به چگالی ذرات داخلی سیال کاهش قابل توجه‌ای پیدا می‌کند و از این طریق می‌توان پی برد که آیا یک ذره مشخص بر روی سطح آزاد قرار دارد یا خیر [15]. به عبارت دیگر، ذراتی که تغییرات چگالی آنها کمتر از یک درصد چگالی ذرات داخلی سیال باشد، ذرات سطح آزاد تعریف می‌شوند و یک شرط مرزی دیرپچله با فشار صفر برای آنها در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که برای محاسبه گرادیان فشار برای ذرات سطح آزاد با توجه با اینکه در آن سوی مرز آزاد، دیگر ذره‌ای وجود ندارد، نمی‌توان از معادله‌ی (12) مستقیماً استفاده کرد و باید تعدادی ذرات مجازی نیز در نظر گرفت. فرض می‌کنیم ذره‌ی  $i$  یک ذره‌ی درونی سیال با فشار  $P_i$  و ذره‌ی  $s$  یک ذره‌ی سطح آزاد با فشار صفر می‌باشند. در این صورت، برای محاسبه‌ی گرادیان فشار بین این دو ذره، یک ذره مجازی  $m$  در آن سوی مرز سطح آزاد قرار داده می‌شود که باید از لحاظ موقعیت در نقطه‌ی قرینه‌ی ذره‌ی  $i$  نسبت به ذره‌ی  $s$  باشد. فرض می‌شود که فشار ذره‌ی مجازی  $m$  برابر با  $-P_i$  می‌باشد. به این ترتیب، شرط فشار صفر برای ذره سطح آزاد  $s$  ارضا می‌شود. توجه شود که ذرات مجازی که خارج از مرز سطح آزاد قرار داده می‌شوند تنها برای محاسبه‌ی گرادیان فشار بین ذرات داخلی و ذرات مرز سطح آزاد استفاده می‌شوند و نقشی در محاسبه‌ی تنش برشی ندارند.

### مرز تکرار شونده در جریان ورودی و خروجی

بنا به فیزیک مسئله، برای شرایط مرزی سمت چپ و راست محدوده‌ی محاسباتی، از شرط مرزی متناوب استفاده می‌شود. مفهوم شرط مرزی متناوب این است که ذرات مجاور با یک مرز باز کناری با ذرات نزدیک به مرز کناری در سمت دیگر، در تعامل هستند. این خاصیت در شکل (4) قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل، ذره‌ی  $a$  در مجاورت مرز چپ قرار دارد و ناحیه‌ی تأثیر آن به طور کامل درون محدوده‌ی مسئله قرار نمی‌گیرد. بنا به شرط مرزی متناوب، این قسمت از ناحیه‌ی تأثیر ذره در سمت دیگر محدوده‌ی مسئله (مرز راست) قرار می‌گیرد؛ و به این ترتیب، ذره‌ی  $a$  با ذرات مجاور مرز سمت راست در تعامل می‌باشد. در مدل حاضر، سرعت و فشار ذراتی که مرز ورودی و خروجی را تشکیل می‌دهند با سرعت و فشار ذرات متناظرشان در درون محدوده‌ی اصلی برابر می‌باشند.



شکل (4) شرط مرزی متناوب برای مرز سمت چپ

<sup>11</sup> Dummy particles



در مدل حاضر، مقدار گام زمانی توسط عامل لزجت سیال و عدد کورانت<sup>12</sup> کنترل می‌گردد [11]:

$$\Delta t \leq \min\left(0.1 \frac{l_0^2}{\mu_{eff} / \rho}, 0.1 \frac{l_0}{V_{max}}\right) \quad (24)$$

که  $l_0$ ، فاصله‌ی اولیه‌ی بین ذرات و  $V_{max}$ ، سرعت حداکثر در هر گام زمانی است. ضریب  $0/1$  در معادله‌ی (24) تضمین می‌کند که ذرات در هر گام زمانی تنها به میزان اندکی حرکت داده می‌شوند.

### 3- ارائه نتایج و تفسیر آن‌ها

در این قسمت، نحوه‌ی کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی دوفازه‌ی لاگرانژی توسعه یافته بر اساس روش I-SPH ارائه می‌گردد. در روند شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی، پارامترهای محاسباتی گوناگونی باید به مدل معرفی شود که از آن جمله می‌توان به چگالی سیال، چگالی رسوب، تعداد ذرات سیال و رسوب و دیواره‌ی کف، لزجت سیال و رسوب و طول هموار ( $h$ ) اشاره کرد. برخی از پارامترهای فوق، ناشی از مشخصات فیزیکی مسئله می‌باشند مانند لزجت رسوب که با توجه به شرایط ارائه شده در مدلسازی فیزیکی یگانه بختیاری (1997) [10] به عنوان ورودی به مدل معرفی می‌شود. اما برخی از پارامترهای مدل کاملاً تابعی از شرایط محاسباتی و مخصوص نحوه‌ی شبیه‌سازی می‌باشند، که از این بین به تعداد ذرات سیال و رسوب و نیز تعداد ذرات مجازی دیواره مرزی کف و طول هموار می‌توان اشاره نمود که به صورت سعی و خطا انتخاب می‌گردند.

همانگونه که قبلاً گفته شد، در مدل عددی حاضر میدان رسوبات مشابه با یک میدان سیال غیرنیوتونی شبیه‌سازی شده و رابطه‌ی تنش-کرنش در میدان رسوبات توسط مدل بینگهام تعریف می‌شود. پس تنش بحرانی ( $\tau_y$ ) و لزجت پلاستیک سیال غیرنیوتونی ( $\mu_s$ ) دو پارامتر ثابتی هستند که برای شبیه‌سازی رفتار سیال غیرنیوتونی به آن‌ها نیاز می‌باشد. هرچند که این دو پارامتر از خواص رسوبات می‌باشند، می‌توان مقادیر مربوط به رسوبات با خواص مختلف را در شرایطی آزمایشگاهی بدست آورد. ولی از آنجایی که مقادیر آزمایشگاهی مربوطه موجود نمی‌باشند، برای تعیین این مقادیر از روش سعی و خطا و کالیبراسیون مدل عددی استفاده می‌شود. به این ترتیب که، برای انتقال بار بستر بر روی یک شیب خاص (در اینجا شیب دو درصد  $i_b = 2\%$ )، این مقادیر طوری تعیین می‌شوند تا نتایج شبیه‌سازی مربوط به سرعت سیال با نتایج آزمایشگاهی یگانه بختیاری (1997) مطابقت خوبی پیدا کنند. بنابراین، با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای تنش بحرانی و لزجت رسوبات در انتقال بار بستر بر روی شیب 2 درصد و مقایسه‌ی نتایج حاصل برای سرعت متوسط جریان، مقادیر  $\tau_y = 1220 \text{ pa}$  و  $\mu_s = 0.26 \text{ pa.s}$  برای تنش بحرانی و لزجت رسوب، بدست آمده و به این ترتیب واسنجی مدل نیز صورت می‌گیرد. این مقادیر برای انتقال رسوب بر روی شیب 3 درصد نیز اتخاذ می‌شوند و با انجام مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان با نتایج آزمایشگاهی برای این شیب‌ها، مدل حاضر صحت-سنجی می‌گردد.

### 3-1- توزیع سرعت جریان سیال

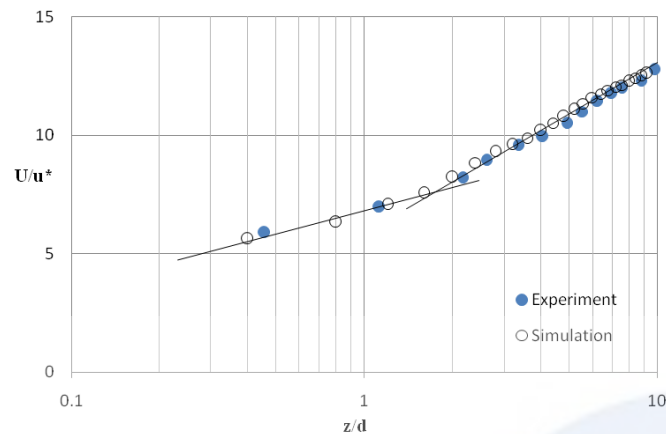
شکل‌های (5) و (6) به ترتیب توزیع سرعت متوسط جریان در شیب‌های 2 و 3 درصد را ارائه می‌نمایند. در شکل‌های مزبور نتایج ارائه شده مدل شبیه‌سازی و مطالعات آزمایشگاهی یگانه بختیاری (1997) [10] با یکدیگر در مقیاس نیمه لگاریتمی مقایسه شده است. چنان که یگانه بختیاری (1997) اشاره نموده، تا شیب 3 درصد شدت تنش‌های برشی بستر در محدوده‌ی تنش‌های متوسط بوده و انتقال بار بستر به صورت انتقال جهشی حاکم بوده است. چنان که از شکل‌های مزبور مشاهده می‌شود مطابقت نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در محدوده‌ی انتقال جهشی بسیار خوب می‌باشد و مدل عددی به خوبی نحوه‌ی توزیع سرعت متوسط جریان در انتقال بار بستر به صورت جهشی را شبیه‌سازی نموده است. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد که توزیع سرعت متوسط سیال یک پروفیل دولایه<sup>13</sup> است که شیب پروفیل سرعت در این دو لایه متفاوت می‌باشد. در بخشی که شیب ملایم‌تر است، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که محدوده‌ی انتقال رسوبات بار بستر به صورت جهشی صورت می‌گیرد و سپس در یک نقطه‌ی انتقالی شیب پروفیل سرعت به بخش دوم که انتقال رسوبات وجود ندارد و اصطلاحاً به آن منطقه‌ی آب صاف<sup>14</sup> گفته می‌شود تغییر می‌یابد. یگانه بختیاری و همکاران (2000) در مدل عددی خود نشان داده‌اند که پروفیل سرعت در

<sup>12</sup> Courant Number

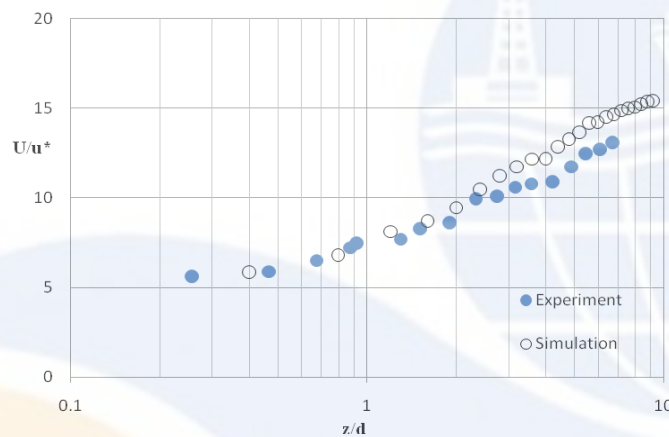
<sup>13</sup> Two-layer profile

<sup>14</sup> Clear water

منطقه‌ی آب صاف از پروفیل سرعت لگاریتمی تبعیت نموده و شیب پروفیل سرعت در بخش دوم برابر با  $1/k$  می‌باشد، که در آن  $k=0.41$  ثابت جهانی فون کارمن<sup>۱۵</sup> است [9].



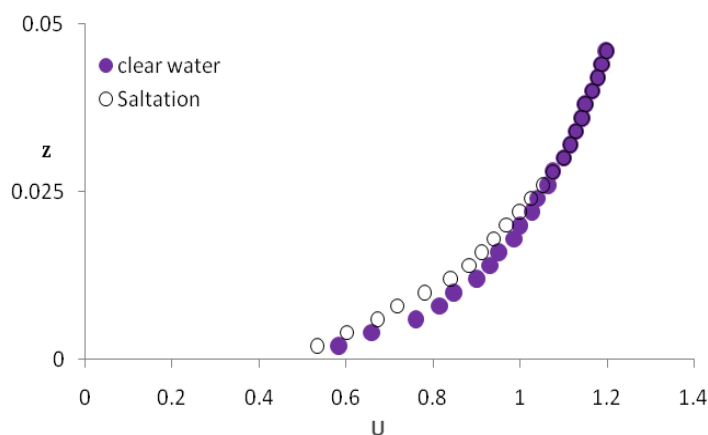
شکل (5) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی سرعت جریان در انتقال بار بستر بر روی شیب بستر 2 درصد ( $\tau_* = 0.115$ )



شکل (6) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان و نتایج آزمایشگاهی برای شیب 3 درصد ( $\tau_* = 0.173$ )

نحوه‌ی تشکیل پروفیل دولایه در توزیع سرعت متوسط جریان را می‌توان در شکل (7) بهتر مشاهده نمود. در محدوده‌ی نزدیک بستر که رسوبات به صورت جهشی انتقال می‌یابند، سرعت متوسط جریان در مخلوط سیال-رسوب کمتر از حالت سرعت جریان در شرایط آب صاف یا بدون انتقال رسوبات می‌باشد. اما در محدوده‌ی آب صاف که رسوب وجود ندارد سرعت متوسط جریان در هر دو حالت یکسان است.

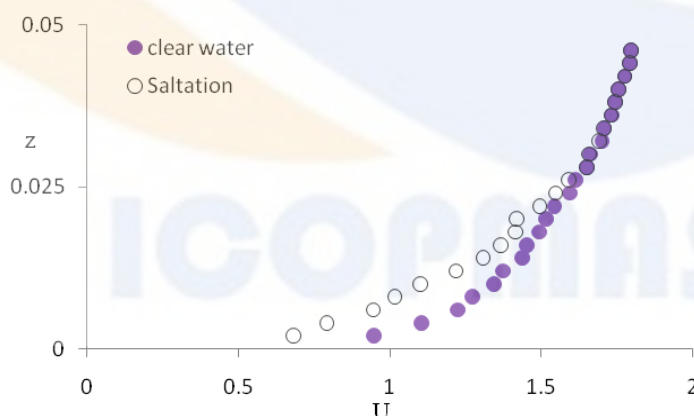
<sup>15</sup> Von-Kármán Constant



شکل (7) مقایسه‌ی توزیع سرعت جریان برای شیب 2 درصد در حالت آب صاف و انتقال جهشی

با افزایش شیب بستر در یک دبی ثابت، مؤلفه‌ی نیروی ثقل افزایش یافته و باعث افزایش سرعت متوسط جریان می‌گردد. این افزایش سرعت متوسط و تنش برشی سیال باعث افزایش نرخ انتقال رسوبات گشته و نیروی دراگ اعمال شده بر ذرات جهنده‌ی بار بستر را افزایش می‌دهد، به ترتیبی که ذرات با سرعت بیشتری از بستر جدا شده و تا ارتفاع بالاتری حرکت می‌کنند. مطابق با شکل (6) پروفیل سرعت متوسط در منطقه‌ی انتقال رسوبات به صورت جهشی دارای شیب ملایم‌تری نسبت به قسمت جریان صاف می‌باشد. اما چنان که ذکر شد به دلیل افزایش تنش برشی سیال و اعمال نیروی دراگ بیشتر، محل تغییر شیب در منحنی سرعت متوسط برای شیب 3 درصد در ارتفاع بالاتری نسبت به شیب 2 درصد رخ می‌دهد.

شکل (8) توزیع سرعت متوسط جریان را در شیب 3 درصد نشان می‌دهد. با توجه به افزایش نیروی دراگ سیال وارد بر ذرات رسوب که به صورت جهشی انتقال می‌یابند، نقطه‌ی یکسان شدن پروفیل سرعت متوسط در اعماق بالاتری نسبت به حالت 2 درصد رخ می‌دهد و تفاوت میان سرعت‌های متوسط در دو حالت وجود انتقال بار بستر به صورت جهشی و آب صاف بسیار بارزتر می‌باشد.



شکل (8) مقایسه‌ی توزیع سرعت جریان برای شیب 3 درصد در حالت آب صاف و انتقال جهشی

یگانه بختیاری (1997) به صورت آزمایشگاهی و سپس یگانه بختیاری و همکاران (2000) به صورت تحلیلی نحوه‌ی تغییر پروفیل سرعت متوسط جریان از جریان صاف به جریان با انتقال بار بستر به صورت جهشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به ویژه یگانه بختیاری (1997) ابراز داشته که پروفیل دولایه‌ی سرعت متوسط جریان مشخصه‌ی جریان‌هایی هستند که رسوبات به صورت بار بستر جهشی در آن‌ها منتقل می‌شوند و مشخصه‌ی بارز آن‌ها میزان تنش برشی بستر است که نرخ آن از مقادیر کم تا متوسط متغیر است.

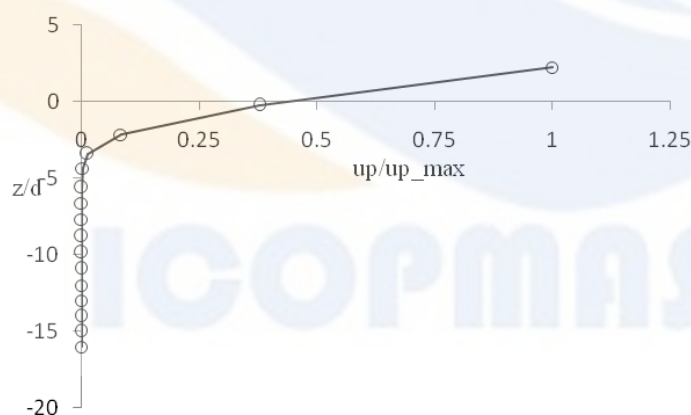
گوتو و همکاران (1994) مکانیزم رخ داد پروفیل دولایه‌ی سرعت متوسط جریان را به نحوه‌ی انتقال مومنتم بین رسوبات انتقال یافته به صورت بار بستر جهشی و جریان سیال به صورت ذیل تشریح نموده‌اند [16]. در لایه‌ای که رسوبات بار بستر به صورت جهشی انتقال می‌یابند،

انتقال مومنتم به صورت ذیل بین رسوبات و جریان سیال انجام می‌شود. در حالت اول، جریان سیال در قالب نیروی دراگ بخشی از مومنتم خود را به ذرات رسوب جهشی انتقال می‌دهد و در حالت دوم، رسوبات بار بستر که به صورت جهشی انتقال می‌یابند بخشی از مومنتم به دست آورده-ی خود را در حین انتقال جهشی و برخورد با ذرات بستر و سپس اوج‌گیری دوباره از دست می‌دهند. به عبارت دیگر، دلیل کاهش سرعت متوسط جریان در لایه‌ای که رسوبات بار بستر به صورت جهشی انتقال می‌یابند آن است که بخشی از مومنتم سیال در این لایه در قالب نیروی دراگ به رسوبات منتقل شده و پروفیل سرعت متوسط جریان در این بخش با شیب ملایم‌تر مشاهده می‌گردد و می‌توان با تقریب بسیار مناسبی اظهار نمود که مکانیزم اصلی انتقال رسوبات که در قالب اندرکنش بین جریان سیال و رسوبات جهشی به صورت نیروی دراگ وارد شده به خوبی در این بخش مدل گشته است.

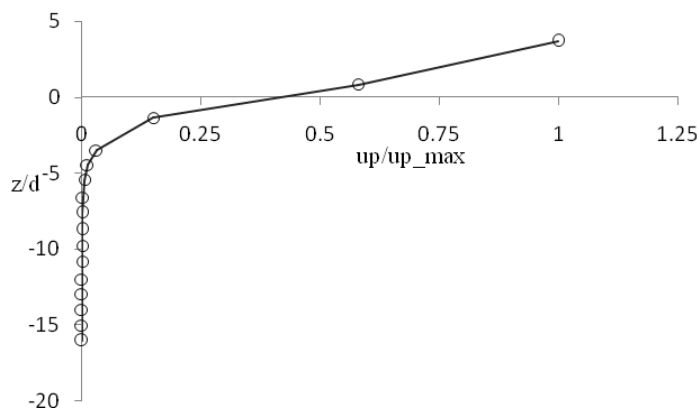
### 3-2- توزیع سرعت ذرات رسوب

در انتقال رسوب به صورت بار بستر، حرکت دانه‌های رسوب عمدتاً ناشی از دو عامل ذیل می‌باشد. الف) نیروی دراگ وارده از طرف جریان متوسط سیال و ب) تأثیر لزجت بین دانه‌های رسوب. زمانی که میدان جریان سرعت نسبی با میدان رسوب داشته باشد، دانه‌های رسوبی که در معرض جریان هستند مواجه با نیروی دراگی از طرف جریان سیال می‌شوند، شروع به حرکت کرده و به صوت بار بستر انتقال می‌یابند. این حرکت سبب ایجاد تنش برشی در بین دانه‌های رسوب بستر شده و به این ترتیب دانه‌هایی که در لایه‌های پایین‌تر بستر وجود دارند به سبب حرکت دانه‌های فوقانی در معرض تبادل مومنتم و احیاناً شروع به انتقال می‌نمایند. شکل‌های (9) و (10) به ترتیب توزیع سرعت در لایه رسوبات بستر را برای شیب‌های 2 و 3 درصد نشان می‌دهند. چنان که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش شیب بستر و سرعت متوسط جریان، تبادل مومنتم بین جریان و دانه‌های رسوب بستر به علت افزایش نیروی دراگ وارد بر دانه‌های رسوب بستر افزایش می‌یابد و این امر موجب جدا شدن دانه‌های رسوب از بستر و افزایش سرعت آن‌ها در پروسه‌ی انتقال به صورت بار بستر می‌گردد.

همان گونه که از این شکل‌ها به خوبی مشاهده می‌شود، دانه‌های رسوبی که در لایه‌های بالاتری قرار دارند مومنتم بیشتری با جریان سیال تبادل کرده و نسبت به رسوباتی که در لایه‌های زیرین قرار دارند دارای سرعت متوسط بیشتری می‌باشند. اما از طرف دیگر در پروسه‌ی تبادل مومنتم در جهت عمودی که بین دانه‌های رسوب در لایه‌های مختلف صورت می‌گیرد باعث حرکت رسوبات در لایه‌های زیرین نیز می‌گردد. به عبارت دیگر، در هر دو شکل یک الگوی نسبتاً یکسان از توزیع سرعت رسوبات در انتقال بار بستر قابل مشاهده می‌باشد. در تمامی حالت‌های انتقال بار بستر، در لایه‌های رسوب بالای سطح اولیه بستر،  $z/d > 0$ ، یک پروفیل مقعر در توزیع سرعت رسوبات مشاهده می‌شود، در حالی که در لایه‌های پایین‌تر از سطح اولیه بستر،  $z/d < 0$ ، یک پروفیل محدب مشاهده می‌گردد. این تغییر تدریجی در شکل پروفیل سرعت رسوبات در هریک از شیب‌ها نشان از تغییر در رژیم انتقال رسوبات می‌باشد.



شکل (9) توزیع سرعت ذرات رسوب برای شیب بستر 2 درصد ( $\tau_* = 0.115$ )



شکل (10) توزیع سرعت ذرات رسوب برای شیب بستر 3 درصد ( $\tau_* = 0.173$ )

در شیب 2 و 3 درصد، شدت تنش برشی میدان سیال می‌تواند رسوبات را به صورت انتقال جهشی حرکت دهد و مکانیزم حاکم در انتقال رسوبات بار بستر تبادل مومتمم بین جریان و رسوبات می‌باشد. این ویژگی در پروفیل سرعت متوسط رسوبات که به صورت بار بستر انتقال می‌یابد در مطالعات میدانی درک و همکاران (1988) در رودخانه‌های طبیعی نیز گزارش شده است [17].

#### 4- نتیجه گیری

انتقال رسوبات به صورت بار بستر در شرایط جریان یکطرفه یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی عمران می‌باشد. به دلیل مشکلات زیادی که انتقال بار بستر در محیط‌های ساحلی به وجود می‌آورد، شبیه‌سازی این پدیده اهمیت بسیار زیادی در تخمین میزان خرابی و صدمات ناشی از آن دارد. در تحقیق حاضر، یک مدل دوفازه‌ی لاگرانژی برای شبیه‌سازی انتقال بار بستر در مختصات دو بعدی بر مبنای روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر ارائه گردیده است و برای انجام شبیه‌سازی یک برنامه‌ی کامپیوتری به زبان *MATLAB* توسعه یافته که توانایی تحلیل دو بعدی انتقال بار بستر بر روی شیب‌های مختلف را داراست.

در انتقال بار بستر، در غلظت‌های زیاد مدل‌های تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی دچار ضعف می‌باشند و روش دوفازه با تحلیل مجزای فازها امکان مدلسازی مناسب هر فاز و سپس به هم پیوستن فازها را ارائه می‌کند. مدل‌های دو فازه اویلر-اویلر در تبیین میزان انتقال متوسط رسوبات کارایی نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهند اما در مدلسازی حرکات اتفاقی ذرات رسوب کارایی لازم را ندارند. از این رو، مدل ترکیبی اویلر-لاگرانژ به عنوان ابزاری برای رفع این نقیصه ارائه شده است. مدل‌های اویلر-لاگرانژ ارائه شده برای شبیه‌سازی انتقال بار بستر نیز در توصیف مکانیسم اندرکنش در انتقال بار بستر تحت تنش‌های برشی بالا دچار ضعف می‌باشند، زیرا در این مدل‌ها میدان سیال با دیدگاه اویلر گسسته‌سازی می‌شود و به همین خاطر نتایج مدل به شدت نسبت به اندازه شبکه حساس می‌باشد و اگر اندازه‌ی المان‌های شبکه با دقت انتخاب نگردد نتایج مدل دچار اختلال می‌شود. از این رو در تحقیق حاضر یک مدل دوفازه لاگرانژ-لاگرانژ ارائه شده که نه تنها انتقال رسوب برای مقادیر پایین تا متوسط تنش برشی بستر را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، بلکه در تنش‌های برشی بالا نیز کارآمد و مناسب عمل می‌نماید. با توجه به نتایج مدل عددی، در تنش‌های برشی متوسط پروفیل سرعت جریان سیال یک پروفیل دولایه است که در این حالت انتقال رسوبات به صورت انتقال جهشی صورت می‌گیرد و مکانیسم اصلی انتقال، در قالب تبادل مومتمم بین جریان و رسوبات صورت می‌گیرد که عمدتاً ناشی از نیروی دراک جریان می‌باشد. مطابقت خوب بین نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان با نتایج آزمایشگاهی یگانه بختیاری (1997) حاکی از این است که مدل عددی حاضر قابلیت مدلسازی مکانیزم انتقال رسوب به صورت بار بستر را برای حالت انتقال جهشی به خوبی داراست.

#### 5- مراجع

- [1] Bagnold, R. A. (1973). "The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water", Proc. Royal soc. London A, 332, 473-504.
- [2] Sumer, B. M., Kozakiewicz, A., Fredsoe, J., and Deigaard, R. (1996). "Velocity and concentration profiles in sheet-flow layer of movable bed", J. Hydr. Engrg. ASCE, 122(10), 549-558.
- [3] Duboys, M. P. (1879). Le Rhone et les Rivieres a Lit affouillable, Annales de Ponts et Chaussées, Series 5, 18, 141-195.
- [4] Kobayashi, N. and Seo, S. N. (1985). "Fluid and Sediment Interaction over a plane bed." Jour. of

Hydr. Div., ASCE, Vol. 106, HY12, pp. 2029-2051.

- [5] Asano, T. (1990). "Two-plane flow model on oscillatory sheet-flow." Proc., 22nd ICCE, ASCE, Delft, pp. 2372-2384.
- [6] Horikawa, K., Watanabe, A. and Katori, S. (1982). "Sediment transport under sheet-flow condition." Proc. 18th ICCE, ASCE, Cape Town, pp. 1335-1352
- [7] Wiberg, P. L. and Smith, J. D. (1989). "Model for calculating bed-load transport of sediment." Jour. Hydr. Engrg. ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 101-123.
- [8] Campbell, C. S. and Brennen, C. E. (1985). "Computer simulation of granular shear flows." Jour. Fluid Mech., Vol. 151, pp. 167-188.
- [9] Yeganeh-Bakhtiary, A. Gotoh H. and Sakai, T. (2000). "Applicability of Euler-Lagrange coupling multiphase-flow model to bed-load transport under high bottom shear", J Hydraul Res 38, pp. 389-398.
- [10] Yeganeh-Bakhtiary, A. (1997). "Velocity profile of sediment-laden flow in transition from saltation to sheet-flow." Proc. XXVII IAHR Cong., San Francisco, USA, JFK- SP, pp. 1-6.
- [11] Shao, S. D. Lo, E. Y. M. (2003). "Incompressible SPH Method for Simulating Newtonian and Non-Newtonian Flows with a Free Surface". Adv. Water Resour. Vol 26(7), PP. 787-800.
- [12] Skelland, A. H. P. (1967). "Non-Newtonian flow and heat transfer. New York: John Wiley and Sons Inc.
- [13] Bird, R. B. Dai, G. C. and Yarusso, B. J. (1983). "The rheology and flow of visco-plastic materials." Rev Chem Eng.; 1: 1-70.
- [14] Morsi, S. A. and Alexander, A. J. (1972). "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems." Journal of Fluid Mechanics, Vol. 55, Part. 2, pp. 193-208.
- [15] Edmond, Y. Shao, S. (2002). "Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method", Applied Ocean Research, Vol. 24, pp. 275-286
- [16] Gotoh, H., Tsujimoto. T. and Nakagawa, H. (1994). "Numerical model of interphase momentum transfer and interparticle collision in bed-load layer." Proc. APD-IAHR, pp. 565-572.
- [17] Drake, T. G. Shreve, R. L. Dietrich, W. E. Whiting, P. E. and Leopold, L. B. (1988). "Bed-load transport of fine gravel observed by motion-picture photography." J. Fluid Mech. 192, 193-217.

ICOPMAS