

# مدل سازی عددی پروفیل سرعت در جریان‌های گل‌آلود

## پیوسته و بررسی تاثیر شیب، غلظت و دبی بر آن

سید عباس حسینی<sup>i</sup>؛ احمد عبدی پور<sup>ii</sup>

### چکیده

در این مقاله جریان‌های گل‌آلود که به عنوان عامل اصلی انتقال رسوبات به داخل مخازن سدها، دریاها و اقیانوسها می‌باشد، به کمک یک کد عددی (FLOW-3D) شبیه‌سازی شد. این نرم افزار معادلات حاکم بر جریان را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌کند. برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در تعیین پارامترهای هیدرولیکی جریان‌های گل‌آلود (پروفیل سرعت)، از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوط مقایسه شد. برای مقایسه نتایج از آزمایشات انجام گرفته توسط حسینی و همکاران که دستگاه آزمایش شامل کانالی به طول ۱۲ متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد، استفاده گردید. پارامترهای محاسبه شده شامل پروفیل سرعت در بدنه جریان بوده‌اند. نتایج حاصل از مدل عددی پروفیل سرعت در بدنه با نتایج آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی دارد. در بخش داخلی (بین بستر تا سرعت ماکزیمم) تطابق سرعت کیفیت بهتری دارد و در بخش بیرونی (بین سرعت ماکزیمم تا جایی که سرعت تقریباً صفر می‌شود) این تطابق کمتر مشاهده می‌شود. به کمک پروفیل‌های سرعت، سرعت متوسط و سرعت ماکزیمم محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید و همچنین تاثیر شیب، دبی و غلظت بر روی سرعت و ارتفاع متوسط جریان مورد بررسی قرار گرفت. در بخش پروفیل سرعت حداقل ۰/۸۲ درصد خطا و حداکثر ۲۸/۹۵ درصد خطا مشاهده گردید. نتایج مدل عددی مربوط به پروفیل سرعت با برخی از نتایج آزمایشگاهی مطابقت کمتری داشت که بخش عمده‌ای از خطاها مربوط به عدم امکان مدل‌سازی جریان در بخش پایینی در مش‌بندی به علت کمبود حافظه کامپیوتری و بخشی از خطاها نیز به نحوه مدل‌سازی جریان گل‌آلود بوده که لزوم تحقیقات بیشتری در این زمینه و مقایسه با سایر تحقیقات را می‌طلبد.

**کلمات کلیدی:** جریان‌های گل‌آلود، جریان‌های ثقیلی، مدل سازی عددی، پروفیل سرعت.

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۳/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۱۱/۱۵

i استادیار گروه عمران آب دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
abbas\_hoseyni@srbiau.ac.ir

ii دانشجوی دکتری عمران آب دانشگاه علوم و تحقیقات  
Abdipoor63@yahoo.com

بواسطه اختلاف نسبتاً اندک در وزن واحد حجم بین دو سیال اتفاق می‌افتد. جریان‌های گل‌آلود بخشی از زنجیره جریان‌های ثقیلی حاوی رسوب می‌باشند که رسوبات عمدتاً بواسطه آشفتگی در سیال به حالت معلق می‌باشند.

جریان‌های ثقیلی یا جریان‌های چگال یک کلاس عمومی از جریان‌های لایه‌بندی شده هستند که در آنها جریان

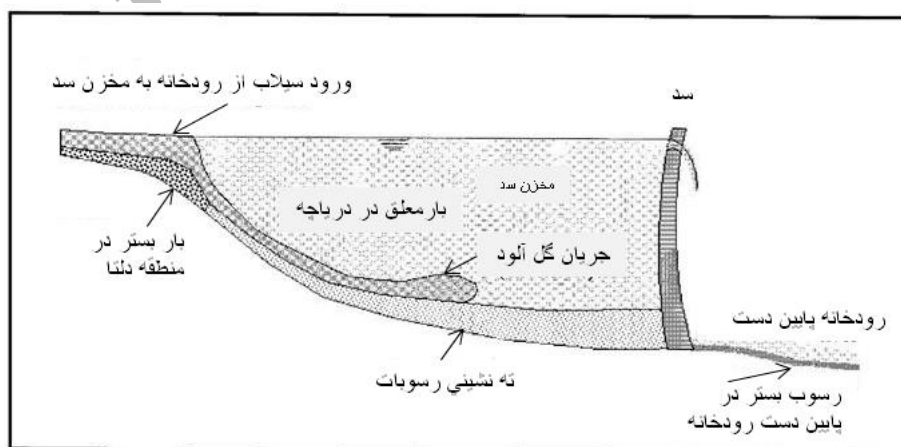
### ۱- مقدمه

می‌باشند. در شکل ۱، یک جریان گل‌آلود پیوسته طبیعی در مخزن سد مشاهده می‌گردد. جریان ورودی به مخزن با چگالی  $\rho$  قبل از استغراق، همانند یک جریان کانال باز بوده و بوسیله هیدرولیک معمولی این جریانها قابل آنالیز می‌باشد. در نقطه استغراق یک تعادل بین تفاوت چگالی و فشار استاتیکی بوجود می‌آید و سپس یک جریان دولایه بهمراه اختلاط در مرز مشترک توسعه می‌یابد [۳].

تاکنون پژوهش‌های وسیعی درباره جریان‌های چگال به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است که در جدول (۱) تنها به خلاصه‌ای از کارهای عددی اشاره می‌گردد. در جدول زیر منظور از بعدهای دارای 0.5 استفاده از مقادیر متوسط در یک راستا (محور) می‌باشد.

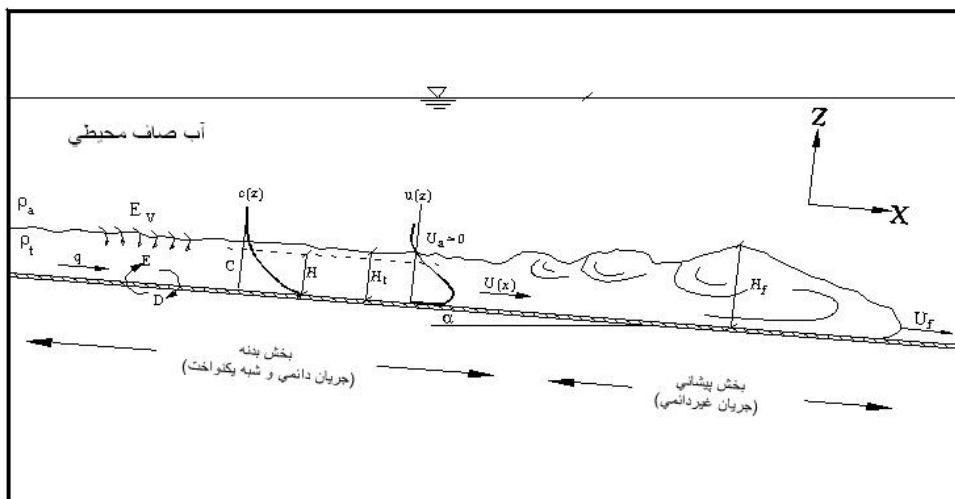
جدول ۱- خلاصه‌ای از تحقیقات عددی بر روی جریان‌های چگال

Name	Dimension	Solution Method	Turbulence model
Choi and Garcia (1993)	1.5	Finite Element	Parker et al. (1987)
Bonnecaze et al. (1995)	2.5	Finite Difference	ET (1959)
Imran et al. (1998)	2.5	Finite Difference	Parker et al. (1987)
Bradford and Katopodes (1999a)	2.5	Finite-Element	Parker et al. (1987)
Salaheldin et al. (2000)	1.5	Finite Difference	Parker et al. (1987)
Choi and Garcia (2002)	2	Finite-Difference	k- $\epsilon$
Heqing Huang and Jasim Imran (2005)	3	Finite- Volume	k- $\epsilon$
Snorre Heimsund (2007)	3	Finite- Volume	RNG
FiroozAbadi(2009)	2	Finite- Volume	k- $\epsilon$



شکل ۱- یک جریان گل‌آلود پیوسته در مخزن سد [۳]

در این جریان‌ها نیروی رانش به واسطه ذرات معلق است، که آب کدر را سنگین‌تر از جریان آب زلال می‌گرداند. این جریان‌ها جزء جریان‌های غیرپایستار می‌باشند و در آنها چگالی در جهت عمق متغیر است. این‌گونه جریان‌ها می‌توانند رسوبگذار و یا فرسایشی باشند. در مخازن سدها آب گل‌آلود رودخانه در ورود به مخزن اغلب به زیر آب صاف فرو می‌رود و جریان چگال را تشکیل می‌دهد. در این حرکت ذرات درشت‌تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و جریان حاوی ذرات ریز به راه خود ادامه می‌دهد. به محض ورود سیلاب به مخزن سد، جریان چگال حرکت خود را شروع می‌کند. اگر شیب کف زیاد باشد جریان حرکت خود را ادامه داده و اغلب به ساختمان سد می‌رسد [۱]. این جریان‌های طبیعی، جز جریان‌های پیوسته



شکل ۲- شکل شماتیک جریان چگال آزمایشگاهی و قسمتهای مختلف آن [۲]

هستند. معادلات حرکت نویر- استوکس سیال با مولفه‌های سرعت  $(u, v, w)$  در مختصات سه بعدی به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (2)$$

در این معادلات  $(G_x, G_y, G_z)$  ترم‌های شتاب جرم،  $(f_x, f_y, f_z)$  ترم‌های شتاب ویسکوز می‌باشند. علاوه بر معادلات پیوستگی و ممنتوم، معادله غلظت نیز در محاسبه تغییرات غلظت جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

### ۳- معرفی مدل عددی

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر این جریانها از یک کد عددی موجود بنام Flow-3D استفاده شده است. این برنامه عددی توانائی محاسباتی بالائی در جریانهای کانال باز داراست. نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل

در شکل ۲ جریان چگال و قسمتهای مختلف آن به صورت شماتیک نشان داده شده است همانطور که ملاحظه می‌گردد یک جریان چگال از دو بخش اصلی و مهم پیشانی و بدنه تشکیل شده است. بدنه جریان چگال بخش شبه یکنواخت جریان بوده و جریان در آن ناحیه تقریباً دائمی می‌باشد. به عبارت دیگر تغییرات زمانی و مکانی سرعت در بدنه جریان تقریباً ناچیز می‌باشد و بخش دیگر پیشانی که جریان در آن به صورت غیردائمی بوده و ارتفاع تقریباً ۲ برابر بدنه جریان می‌باشد.

در شکل ۲،  $H_t$  ارتفاع کل جریان بوده که سرعت جریان در  $H_t$  تقریباً صفر می‌باشد.  $H$  نیز ارتفاع متوسط جریان بوده و بوسیله انتگرالگیری از پروفیل‌های سرعت در عمق جریان بدست می‌آید.

### ۲- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت و معادله انتقال برای غلظت می‌باشد. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله‌ی تعادل جرم برای یک المان سیال بدست می‌آید. بصورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

که  $V_F$  نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و  $\rho$  دانسیته سیال است. مولفه‌های سرعت  $(u, v, w)$  در جهات  $(x, y, z)$  هستند.  $A_x$  نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت  $x$  است،  $A_y$  و  $A_z$  به طور مشابه سطوح جریان در جهات  $y, z$

می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است: ۱- روش حجم سیال<sup>۱</sup> (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش کسر مساحت-حجم مانع<sup>۲</sup> (FAVOR): برای شبیه‌سازی سطوح واحجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد. برای مدلسازی عددی نیاز به یک مدل آشفتگی می‌باشد که در کد عددی پنج مدل آشفتگی برای این منظور معرفی شده است. برای معرفی جریان ذرات رسوبات به منظور تولید جریان گل‌آلود نیز از مدل آبشستگی رسوبات<sup>۳</sup> استفاده می‌گردد [۴] که در ادامه در مورد مدل آشفتگی منتخب و نحوه مدلسازی رسوبات توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۲- مدل آبشستگی رسوب

این مدل، رفتار رسوب فشرده و معلق را در محدوده محاسباتی سه بعدی Flow 3D پیش‌بینی می‌کند. این مدل فرض می‌کند بیشترین انتقال رسوب بوسیله تعلیق و حرکت افقی، به علت تاثیر گرادیان فشار محلی به وجود می‌آید. مدل، ذرات رسوب را به صورت کروی و سرعت آنها را کم فرض می‌کند. ضریب ته نشینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_f = \frac{D^2 \cdot \rho}{18\mu} \quad (3)$$

که در آن  $D$  میانگین قطر ذرات (۲۰ میکرون)،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال می‌باشند.

سرعت مکش رسوب از کف به بالا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_l = S_e \cdot \sqrt{\frac{\tau - \tau_c}{\rho}} \quad (4)$$

که در آن  $S_e$  پارامتر تجربی نرخ فرسایش رسوب که برای ذرات رسوب این تحقیق ۱ در نظر گرفته شد.  $\rho$  چگالی سیال (آب)،  $\tau$  تنش برشی و  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی که از رابطه زیر بدست آید:

$$\tau_c = S_c \cdot D \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \quad (5)$$

عدد تجربی شیلد بحرانی،  $D$  قطر متوسط ذرات،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوب (کائولن) و  $\rho$  چگالی سیال (آب) می‌باشد.

### ۴- تعریف هندسه جریان، شرایط اولیه و مرزی

#### و مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی جریان از نتیجه‌های آزمایشگاهی حسینی و همکاران که در آزمایشگاه مرکز قطب انرژی

۱- Volume Of Fluid  
2- Fractional Area/Volume Obstacle Representation  
3- Sediment Scour Model

همانطور که قبلاً گفته شد در این کد عددی پنج مدل آشفتگی ارائه شده است: طول اختلاط پراوتل، معادلات  $k-\epsilon$  یک معادله‌ای و دو-معادله‌ای و مدل‌های RNG و مدل شبیه‌سازی گردابی بزرگ.

### ۳-۱- مدل‌های آشفتگی

Flow-3D مدل آشفتگی جدیدتری بر مبنای گروه‌های نرمال شده رینولدز پیاده‌سازی کرده است. این دیدگاه شامل روشهای آماری برای استحصال یک معادله متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی است. مدل‌های بر پایه RNG، کمتر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می‌کنند. مدل RNG از معادله‌هایی استفاده می‌کند که شبیه معادله‌های مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  است، اما مقادیر ثابت معادله که به صورت عملی در مدل استاندارد  $k-\epsilon$  یافت شده‌اند، صریحاً از مدل RNG گرفته شده‌اند. از اینرو، مدل RNG قابلیت اجرایی گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد

1- Volume Of Fluid

2- Fractional Area/Volume Obstacle Representation

3- Sediment Scour Model

دانشگاه شریف انجام شده بود، استفاده شد [۲]. دستگاه آزمایش شامل کانالی به طول ۱۲ متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. ساختمان کانال سازه فلزی خرابی‌ی بوده و دیواره‌های شیشه‌ای داشته و کف آن نیز از سنگ مرمر ساختمانی که با دقت ۰/۲ میلی‌متر کف سابی و مسطح شده، تشکیل شده است. آزمایشات در شیب ماکزیمم ۳ درصد و مینیمم ۱ درصد انجام شدند. برای جزئیات بیشتر در این خصوص می‌توان به پایان‌نامه دکتر حسینی مراجعه نمود [۲].

شرایط مرزی جریان عبارتند از:

۱- سرعت ورودی جریان چگال از زیر درچه به کانال  
 ۲- غلظت جریان چگال که از حاصلضرب درصد غلظت در چگالی ذرات رسوب بدست می‌آید. چگالی ذرات رسوب  $2648 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد.

برای مدل‌سازی از دو سیال استفاده گردیده که یکی آب ساکن با چگالی  $998/53 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته  $\text{Kg/m.s}$   $10^{-3} \times 1.014$  و دیگری جریان چگال که در زیر آب ساکن قرار دارد. بنابراین در مدل‌سازی آب ساکن محیطی به عنوان شرط اولیه با فشار هیدرواستاتیک در جهت قائم (Z) در نظر گرفته شد. شبکه بندی هندسه جریان در تمام جهات ۲ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۳) و در شبیه‌سازی آشفتگی از مدل RNG استفاده شد. شرایط اولیه آزمایشات که برای شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۲) ارائه شده است.

که  $C_0$  غلظت اولیه،  $Q_0$  دبی ورودی شاره چگال،  $U_0$  سرعت ورودی جریان،  $b_0$  و  $h_0$  به ترتیب عرض و ارتفاع دریچه ورودی،  $g'_0$  شتاب ثقل کاهش یافته  $(g'_0 = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g)$ ، فلاکس شناوری ورودی  $(B_0 = b_0 \cdot h_0 \cdot U_0 \cdot g'_0)$ ، عدد رینولدز ورودی جریان،  $Ri_0$  عدد ریچاردسون اولیه جریان و  $Fr'_0$  عدد فرود اولیه جریان  $(Ri_0 = \frac{g'_0 \cdot h_0 \cdot \cos \theta}{U_0^2} = \frac{1}{Fr_0'^2})$  می‌باشد.

## ۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

همانطور که قبلاً گفته شد برای صحت سنجی نتایج مدل

عددی از نتایج شش آزمایش با شیب‌ها، دبی‌ها و غلظت‌های مختلف طبق جدول شماره ۲ استفاده شد. سری زمانی سرعت افقی جریان چگال در راستای طولی کانال در زمانهای مختلف برای یکی از آزمایشات (آزمایش شماره ۲) در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود جریان چگال در طول شیب دارای یک پیشانی و یک دنباله می‌باشد که پس از خروج پیشانی از کانال یک جریان تقریباً یکنواخت وجود خواهد داشت و شاهد جریان شبه دائمی در بدنه جریان چگال می‌باشیم.

پروفیل سرعت در بدنه جریان‌های چگال پس از گذشت چند دقیقه از عبور پیشانی جریان و پس از آنکه پیشانی به انتهای کانال رسیده و ارتفاع بدنه تقریباً ثابت و بدون تغییر ماند، در راستای خط مرکزی کانال و در فواصل ۵ و ۶ متری از ورودی در شکل ۵ ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۵ پروفیل سرعت طولی را می‌توان به دو ناحیه مشخص با رفتار متفاوت تقسیم نمود: ناحیه درونی (inner region) و ناحیه بیرونی (outer region) که بوسیله سرعت ماکزیمم ( $U_m$ ) که اغلب بعنوان دماغه پیشانی جریان گل آلود تعریف می‌گردد، از یکدیگر جدا می‌شود. ناحیه داخلی یا همان ناحیه دیوار (wall region) گرادیان سرعت مثبت داشته و آشفتگی در اثر زبری کف تولید می‌گردد. در این ناحیه رسوبات از کف مکیده شده (entrainment) و توزیع سرعت در این ناحیه یک توزیع لگاریتمی می‌باشد. ضخامت این ناحیه کمتر از نصف ضخامت ناحیه بیرونی می‌باشد. ناحیه بیرونی گرادیان سرعت منفی داشته که و این گرادیان منفی در اثر جریان روبه عقب (back flow) سیال محیطی می‌باشد. در این ناحیه آشفتگی در اثر اختلاط با سیال ساکن بالائی حاصل می‌گردد. توزیع سرعت در این ناحیه یک توزیع نرمال Gaussian می‌باشد [۲]. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد پروفیل سرعت تطابق قابل قبولی را در ناحیه درونی و تطابق کمتری را در ناحیه بیرونی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

## ۶- حساسیت سنجی و بررسی خطاها

پروفیل‌های سرعت محاسبه شده در راستای خط مرکزی

ناثیر نیروی ثقل می‌باشد. لذا می‌توان انتظار داشت که در شیب‌های کم همواره نیروی شناوری یک نیروی رانش می‌باشد و تاثیر نیروی ثقل تقریباً ناچیز می‌باشد.

افزایش دبی جریان باعث افزایش سرعت جریان گردیده است. افزایش دبی جریان تاثیر خود را در نیروی اینرسی نشان می‌دهد و بیانگر این موضوع است که افزایش نیروی اینرسی و ممان اولیه به عنوان یک نیروی رانش باعث افزایش سرعت جریان می‌گردد. علت اصلی تغییر ارتفاع بدنه، اختلاط و درون آمیختگی بواسطه ناپایداریهای K-H و خیزابها در مرز مشترک بالائی است، لذا قضاوت در مورد نحوه تغییرات ارتفاع متوسط جریان چگال با تغییر شیب، غلظت و دبی براحتی امکان پذیر نبوده و از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. پروفیل های سرعت به خوبی نشان می‌دهند که افزایش دبی باعث افزایش ارتفاع متوسط جریان می‌گردند اما افزایش شیب کف (نیروی ثقل) و غلظت باعث کاهش ارتفاع متوسط جریان می‌گردند. ارتفاع جریان یک متغیر مستقل بوده که قدرت پرش هیدرولیکی کاهش یافته و ارتفاع جریان کاهش خواهد یافت.

در شکل (۷) پروفیل سرعت برای یک شبکه بندی با ۱۰ درصد بیشتر و یک شبکه بندی با ۱۰ درصد کمتر باهم مقایسه شده‌اند و همانطور که مشاهده می‌گردد جوابها مستقل از شبکه محاسباتی بوده و تعداد مش بندی ۱۸۰۰۰۰ عدد برای مدل سازی قابل اطمینان می‌باشند.

کانال جهت تعیین ارتفاع (H) و سرعت متوسط لایه‌ای (U) در هر مقطع اندازه گیری بوسیله معادلات زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$UH = \int_0^{\infty} u(z) dz = \int_0^{H_t} u(z) dz \quad (6)$$

$$U^2 H = \int_0^{\infty} u^2(z) dz = \int_0^{H_t} u^2(z) dz \quad (7)$$

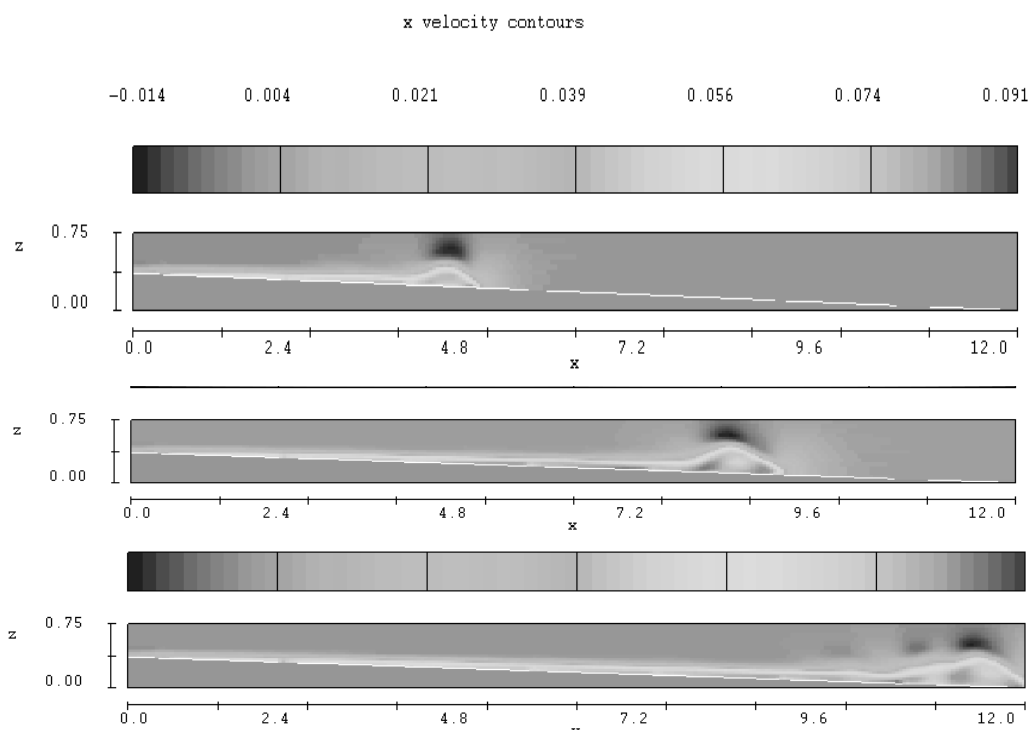
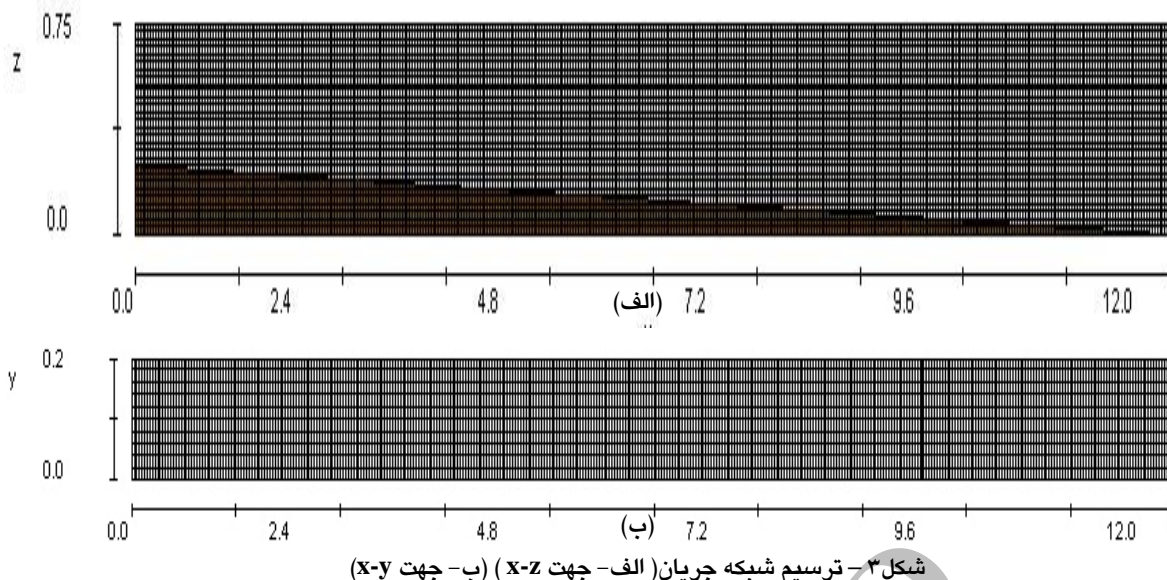
که  $u(z)$  سرعت طولی متوسط جریان در فاصله  $z$  از بستر و  $H_t$  ارتفاع کل جریان و همانطور که قبلاً نیز گفته شد مکانی که سرعت جریان تقریباً صفر می باشد. سرعت ها و ارتفاع‌های متوسط جریان بوسیله روابط (۶) و (۷) برای حالات مختلف مدل سازی، محاسبه شده و در جدول (۳) آورده شده‌اند. براساس محاسبات انجام شده، نتایج شبیه سازی عددی برای پارامترهای سرعت جریان، بطور متوسط خطائی در حدود ۸ درصد و برای ارتفاع جریان، بطور متوسط خطائی در حدود ۱۴ درصد نشان می‌دهد.

با استفاده از نتایج ارائه شده می‌توان تاثیر شیب، غلظت و دبی را بر مشخصه‌های سینماتیکی جریان چگال به خوبی مشاهده نمود (شکل ۶). با افزایش شیب کف کانال نیروی رانش ( $g' \sin \theta$ ) افزایش یافته لذا سرعت جریان به تبع آن افزایش یافته است و با افزایش غلظت اولیه ذرات معلق، مجدداً نیروی شناوری که در اینجا نیروی رانش شاره چگال می‌باشد افزایش یافته و به تبع آن سرعت جریان نیز افزایش یافته است.

تاثیر غلظت در افزایش نیروی شناوری چشمگیرتر از

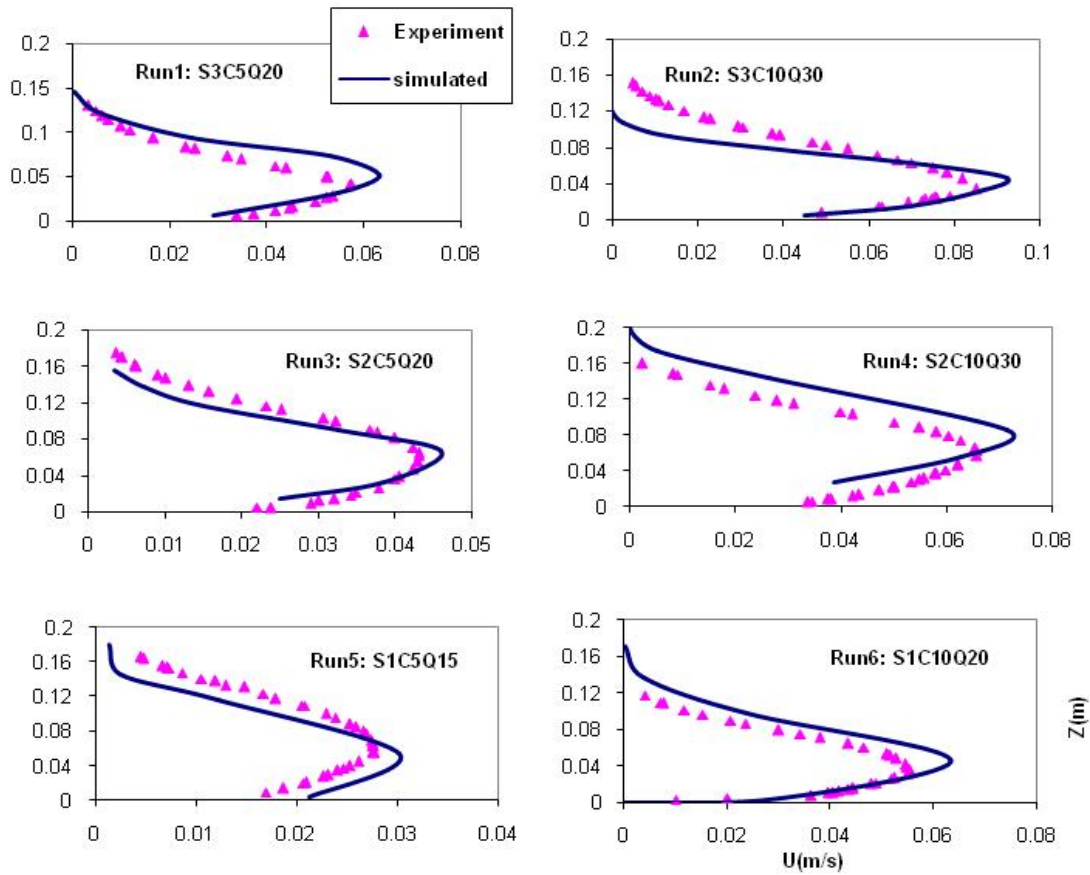
جدول ۲- شرایط اولیه برای شبیه سازی عددی

RUN.NO	Slope (%)	C <sub>0</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	Q <sub>0</sub> (lit/min)	b <sub>0</sub> (cm)	h <sub>0</sub> (cm)	U <sub>0</sub> (cm/s)	g' <sub>0</sub> (cm/s <sup>3</sup> )	B <sub>0</sub> (Cm <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	Re <sub>0</sub>	Ri <sub>0</sub>	Fr' <sub>0</sub>
No.1	3%	0.005	20	20.0	1.0	16.67	3.0638	51.06	1694.6	0.0110	9.522
No.2	3%	0.01	30	20.0	1.0	25.00	6.1226	153.04	2355.4	0.0098	10.104
No.3	2%	0.005	20	20.0	1.0	16.67	3.0618	51.03	1618.2	0.0110	9.525
No.4	2%	0.01	30	20.0	1.0	25.00	6.1245	153.11	2443.5	0.0098	10.102
No.5	1%	0.005	15	20.0	1.0	12.50	3.0638	38.30	1270.9	0.0196	7.141
No.6	1%	0.01	20	20.0	1.0	16.67	6.1287	102.14	1709.4	0.0221	6.732

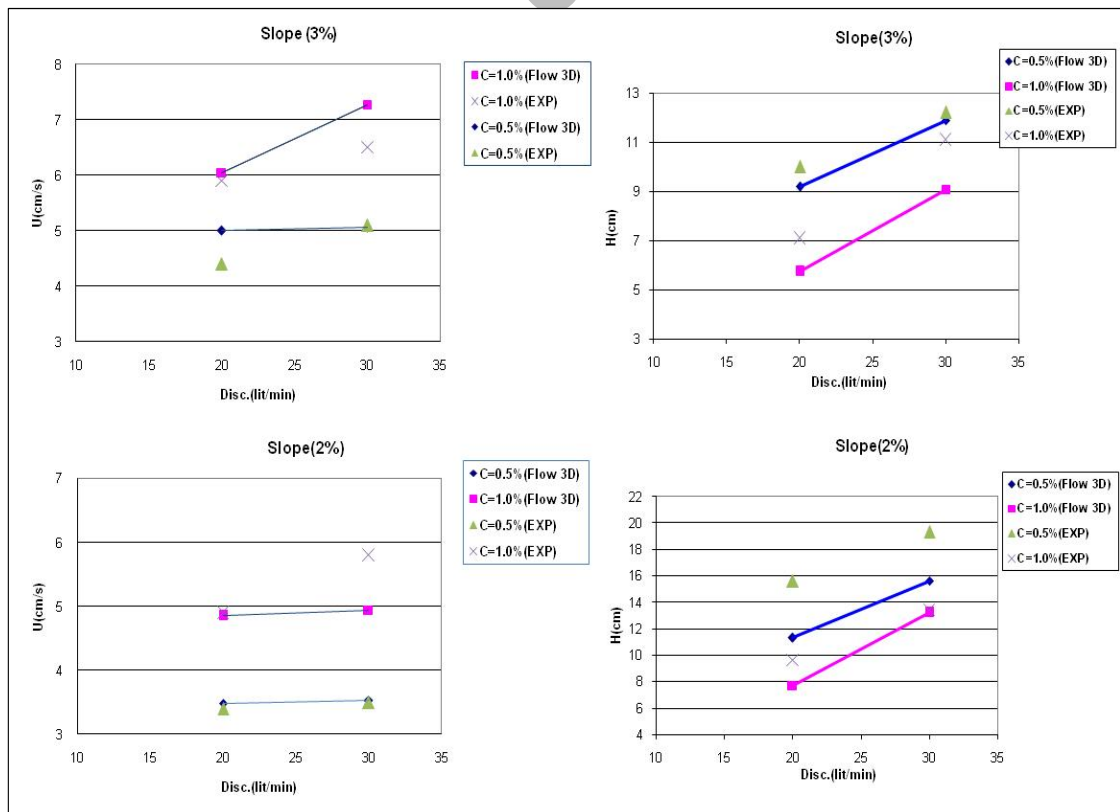


شکل ۴- الگوی جریان چگال شبیه سازی شده در زمانهای مختلف، شیب کانال ۳ درصد، غلظت ۱ درصد و دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه  
جدول (۳)- مقایسه نتایج سرعتها و ارتفاعهای متوسط جریان

شماره	توصیف	U(cm/s)			H(cm)		
		(Experiment)	(Flow 3D)	درصد خطا	(Experiment)	(Flow 3D)	درصد خطا
1	S3C5Q20	4.4	5.06	13.04	10	9.19	8.10
2	S3C10Q30	6.5	7.27	10.59	11.1	9.07	18.29
3	S2C5Q20	3.4	3.48	2.30	15.6	11.3	27.56
4	S2C10Q30	5.8	4.85	16.37	13.4	13.2	1.49
5	S1C5Q15	3.6	2.97	17.50	8.4	8.15	2.98
6	S1C10Q20	3.8	4.9	22.45	10.6	8.53	19.53
Max Error				22.45			27.56
Min Error				2.3			1.49
Average Error				8.84			13.86

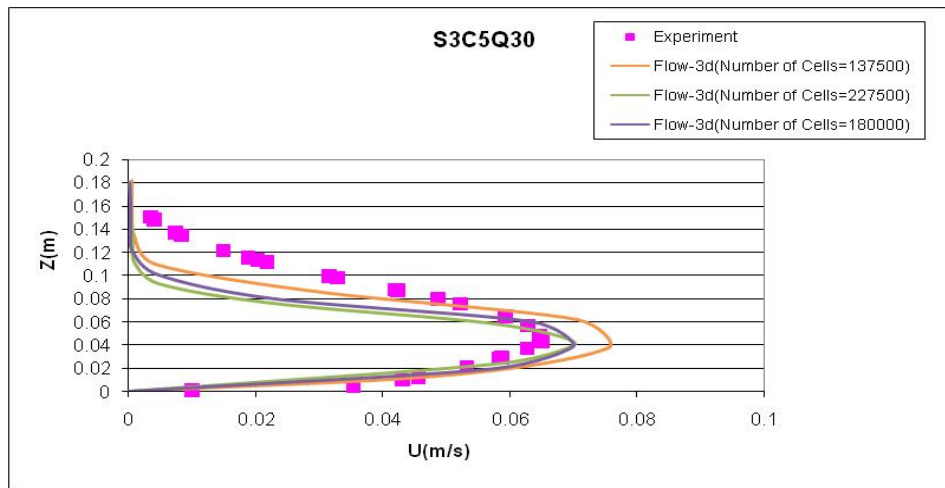


شکل ۵- مقایسه پروفیل های سرعت شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۶- تاثیر شیب، غلظت و دبی بر ارتفاع و سرعت متوسط جریان





شکل ۷ - مقایسه پروفیل سرعت برای شبکه‌بندی مختلف

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی بر آن بود جریان گل‌آلود آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی گردیده و پارامترهای متوسط جریان حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردند.

در این تحقیق، کد عددی Flow 3D به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی رفتار جریان‌های گل‌آلود آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایجی به شرح ذیل برای یک حالت از جریان‌های گل‌آلود آزمایشگاهی بدست آمد:

❖ نتایج حاصل از مدل عددی برای پروفیل سرعت

در بدنه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در ناحیه داخلی پروفیل، تطابق سرعت کیفیت بهتری دارد و در ناحیه بیرونی این تطابق کمتر مشاهده می‌شود.

❖ کمیت‌های هیدرودینامیکی جریان شامل ارتفاع و

سرعت متوسط جریان به کمک پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل عددی محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که برای سرعت متوسط حداقل ۲ درصد و حداکثر ۲۲ درصد مشاهده گردید. خطاهای مشاهده شده برای ارتفاع متوسط جریان حداقل ۲ و حداکثر ۲۸ درصد می‌باشد.

❖ در بررسی خطاهای عددی ابعاد و اندازه شبکه

بندی مدل عددی و محدودیت توان محاسباتی نرم‌افزار با افزایش تعداد سلولها بایستی مورد تاکید قرار گیرد. بخشی از خطاها نیز مربوط به انتخاب مدل توربولانس جهت مدلسازی مناسب آشفتگی در این جریانها می‌باشد که لزوم تحقیقات بیشتر را در این زمینه می‌طلبد. به نظر می‌رسد مدلسازی دو فازی جریان گل‌آلود به اصلاح نتایج شبیه‌سازی کمک نماید.

❖ با ریز نمودن ابعاد شبکه و مش‌بندی، بدلیل نیاز

به حافظه کامپیوتری زیاد، شبیه‌سازی عددی ناموفق بود. ضمناً امکان ریز نمودن شبکه در بخشهای از جریان با گرادیان بالا، در نسخه نرم‌افزار استفاده شده مورد توجه قرار گرفت که با موفقیت همراه نبود. این موضوع یکی از محدودیتهای مدلسازی می‌باشد.

❖ تاثیرات دبی، غلظت و شیب بر شکل پروفیل‌های

سرعت مورد مقایسه قرارگرفت و نتایج نشان دادند که با افزایش دبی ورودی جریان، پروفیل‌های سرعت پهن شده و گسترش بیشتری پیدا می‌کند و ارتفاع جریان و سرعت ماکزیمم جریان افزایش می‌یابد همچنین با افزایش شیب کف کانال نیروی رانش  $(g' \sin \theta)$  افزایش یافته لذا سرعت جریان به تبع آن افزایش می‌یابد و با

سید عباس حسینی، "مطالعه آزمایشگاهی ساختار هیدرودینامیکی جریان‌های گل‌آلود با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی" (رساله دکتری)، دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۸۵.

Pyc, K., (1994), "Sediment transport and depositional processes", Blackwell scientific publication.

Theory of Flow 3-D Manual Ver.8.2, 2004

- [۲] افزایش غلظت اولیه ذرات معلق، مجدداً نیروی شناوری که در اینجا نیروی رانش شماره چگال می‌باشد افزایش یافته و به تبع آن سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد.

[۳]

[۴]

## ۸- مراجع

- [۱]-[۱] بهار فیروزآبادی، "بررسی تجربی و تئوری جریان‌های مطبق و تهیه مدل ریاضی از جریان چگالی حاوی ذرات" (پایان‌نامه دکتری)، دانشگاه شریف، بهمن ۱۳۷۸

Archive of SID