

## بررسی آزمایشگاهی شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن در مقاطع همگرا

ایوب مرادی<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، بهنام سروری نژاد<sup>۳</sup> و حسن گلیج<sup>۴</sup>

### چکیده

مشکل رسوب‌گذاری همواره به‌عنوان مهم‌ترین عامل در کوتاه‌کردن عمر مفید سدها مطرح بوده است و سدهای مخزنی زیادی به‌دلیل پرشدن از رسوب، متروکه شده‌اند. یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در رسوب‌گذاری مخازن جریان‌های غلیظ هستند لذا شناخت فرآیندهای مؤثر در این نوع جریان برای پژوهشگران مرتبط با مدیریت مخازن و سدها مهم است. تغییرات مقطع رودخانه از جمله همگرایی‌ها و واگرایی‌ها از پارامترهای بسیار مؤثر در تغییر هیدرولیک جریان غلیظ هستند که باید نقش این پارامترها در فرایند جریان غلیظ شناسایی و نسبت به مدیریت رسوب مخازن اقدام‌های مؤثر انجام گیرد. پس در این پژوهش شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال ساکن پیرامون آن در مقاطع همگرا در یک فلوم شیب‌پذیر با سه دبی (۰/۵۸، ۰/۹۸ و ۱/۲۸ لیتر بر ثانیه)، سه غلظت (۱۰، ۱۶ و ۲۵ گرم در لیتر)، سه شیب (۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲۵ و ۰/۰۱۶) و سه زاویه همگرایی (۸، ۱۶ و ۲۵ درجه) بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش زاویه همگرایی بر میزان شدت اختلاط افزوده می‌شود و در نهایت رابطه‌ای برای شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن در محدوده آزمایش‌های انجام شده ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان غلیظ، رسوب‌گذاری، شدت اختلاط، مقاطع همگرا، مخزن‌های سدها.

**ارجاع:** مرادی ا.، قمشی م.، سروری‌نژاد ب. و گلیج ح. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن در مقاطع همگرا. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵):۸۳-۹۱.

۱-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲-استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳-دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [avoobmoradi14@gmail.com](mailto:avoobmoradi14@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۲۷

## مقدمه

جریان غلیظ به جریانی گفته می‌شود که یک سیال با سرعت مخالف صفر و چگالی متفاوت از چگالی سیالی که نسبتاً ساکن است وارد آن شود و در امتداد یکی از لایه‌های سیال ساکن به حرکت خود ادامه دهد. اختلاف در جرم مخصوص ممکن است ناشی از مواد معلق، مواد محلول، دما و یا ترکیبی از آن‌ها باشد (گراف و آلتیناکار، ۱۹۹۸). اگر جریان غلیظ ورودی به داخل سیال ساکن<sup>۱</sup> دارای دانسیته کمتر از سیال ساکن باشد، به صورت روجریان و اگر دانسیته بیشتر داشته باشد به صورت زیرجریان حرکت خواهد کرد. اگر سیال ساکن دارای لایه‌بندی دانسیته باشد، جریان غلیظ، دانسیته مناسب محیط خود را پیدا خواهد کرد به صورت میان جریان حرکت می‌کند (گراف، ۱۹۸۳).

از آنجایی که عملاً اختلاف در چگالی و یا در واقع تأثیر شتاب ثقل بر اختلاف چگالی باعث ایجاد این گونه جریان‌ها می‌شود، لذا به این جریان‌ها، جریان‌های ثقلی<sup>۲</sup> هم گفته می‌شود. اگر اختلاف دانسیته به علت مواد معلق باشد به این جریان‌ها، جریان‌های گل‌آلود<sup>۳</sup> اطلاق می‌شود. در طبیعت نمونه‌های بسیاری از جریان‌های غلیظ یافت می‌شود که فعالیت‌های انسان نیز به تنوع آن‌ها افزوده است. مواردی چون سقوط بهمن‌ها، سرازیر شدن گدازه‌های آتشفشان، جبهه‌های هوای سرد و گرم و تندرهای گرد و غبار همگی نمونه‌هایی طبیعی از این گونه جریان‌ها هستند (گراف، ۱۹۹۸).

شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال ساکن پیرامون آن که با  $E_w$  نشان داده می‌شود، ناشی از ناپایداری‌های حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن بوده و به صورت نسبت سرعت اختلاط  $W_h$  به سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ  $U$  تعریف می‌شود (ترنر، ۱۹۷۳).

در زمینه اختلاط سیال پیرامون به درون بدنه جریان غلیظ مطالعات مفیدی توسط پژوهشگران صورت پذیرفته است. اکثر این مطالعات به دنبال رابطه‌ای جهت برآورد میزان  $E_w$  هستند. پژوهشگران با انجام آزمایش‌های گوناگون روی ضریب جریان‌های غلیظ با جرم مخصوص‌های متفاوت دریافته‌اند شدت اختلاط ( $E_w$ ) تابعی از عدد ریچاردسون است. یعنی:

$$E_w = f(Ri) \quad (1)$$

رابطه‌های به دست آمده در خصوص شدت اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است. هدف این پژوهش به دست آوردن رابطه‌ای مشابه در مقاطع همگرا است.

جدول ۱- رابطه‌های ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف در خصوص شدت اختلاط به صورت تابعی از عدد ریچاردسون

| رابطه ارائه شده                                 | سال ارائه | نام پژوهشگر       |
|---|-----------|-------------------|
| $E_w = \frac{0.0015}{Ri}$                       | ۱۹۷۵      | اشیدا،<br>اگاشیرا |
| $E_w = \frac{0.00153}{0.0204 Ri}$               | ۱۹۸۵      | فوکوشیما          |
| $E_w = \frac{0.0075}{(1 + 718 Ri^{2.4})^{0.5}}$ | ۱۹۸۷      | پارکر             |
| $E_w = 0.0087 \exp(-0.106/Ri)$                  | ۱۹۹۰      | چیکیتا            |
| $E_w = \frac{0.0024}{Ri^{1.06}}$                | ۱۳۷۷      | قمشی              |
| $E_w = 0.0023(Ri)^{-1.0243}$                    | ۱۳۸۳      | حق‌آبی            |
| $E_w = 0.0021(Ri)^{-1.1238}$                    | ۱۳۸۳      | کرم زاده          |
| $E_w = 0.0033(Ri)^{-0.9301}$                    | ۱۳۸۶      | ترابی             |

## معادلات حاکم و روش حل

به هنگام ورود جریان غلیظ در توده سیال ساکن، از آنجا که مرز بین جریان غلیظ و سیال محیطی به طور معمول به دلیل وجود هاله‌ای از جریان غلیظ به خوبی قابل تشخیص نیست می‌توان ارتفاع،  $\bar{h}$ ، و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ،  $\bar{U}$ ، در یک مقطع از جریان غلیظ، را توسط رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف کرد (ترنر، ۱۹۷۳):

$$\bar{h} = \frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_t} u dz\right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \quad (2)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (3)$$

1- Stagnant Fluid  
2- Gravity currents  
3- Turbidity current

رابطه پیوستگی در فاز مایع در یک جریان غلیظ به صورت رابطه ۷ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

که در این رابطه  $u$  و  $w$  به ترتیب سرعت‌های نقطه‌ای در جهت  $X$  و  $Z$  هستند. با انتگرال‌گیری از رابطه ۷ نسبت به محور  $Z$  (عمق جریان) در فاصله  $(0 \leq z \leq h_t)$ ، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\int_0^{h_t} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_0^{h_t} \frac{\partial w}{\partial z} dz = \quad (8)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_t} u dz - u_{h_t} \frac{\partial h_t}{\partial x} \right) + w_{h_t} - w_b = 0$$

در این رابطه  $w_{h_t}$  و  $u_{h_t}$  مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت در مرز مشترک بین دو سیال و  $w_b$  سرعت عمودی در کف هستند. با توجه به این که سرعت افقی صفر در مرز مشترک و سرعت عمودی صفر در بستر برابر صفر هستند  $(w_b, u_{h_t} = 0)$ ، سرعت قائم در مرز مشترک  $(w_{h_t} = w_h)$  به عنوان سرعت نفوذ سیال پیرامون به درون جریان غلیظ تعریف می‌شود. بنابراین معادله پیوستگی در فاز سیال به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\overline{Uh}) = -w_{h_t} \quad (9)$$

سرعت عمودی سیال پیرامون را می‌توان به صورت تابعی از سرعت متوسط افقی جریان غلیظ تعریف کرد (ترنر، ۱۹۷۳):

$$\frac{\partial}{\partial x} (\overline{Uh}) = -w_{h_t} = E_w \overline{U} \quad (10)$$

برای محاسبه شدت اختلاط در مقاطع همگرا، طرفین رابطه ۱۰ در عرض مقطع  $(B)$  ضرب می‌شود.

$$\frac{\partial B \overline{Uh}}{\partial x} = E_w \overline{U} B = -w_{h_t} B \quad (11)$$

رابطه ۱۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت.

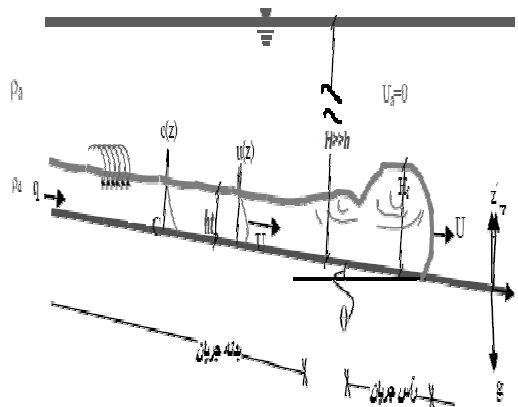
$$\frac{\partial Q}{\partial x} = E_w \overline{U} B = -w_{h_t} B \quad (12)$$

رابطه بالا می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\Delta Q = E_w \overline{U} B \Delta x \quad (13)$$

$$\Rightarrow \Delta Q = E_w \overline{U} A_w \Rightarrow E_w = \frac{\Delta Q}{\overline{U} A_w}$$

در این رابطه‌ها  $u$  سرعت نقطه‌ای و  $h_t$  ارتفاعی که در آن سرعت صفر است، هستند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- نمایی کلی از جریان غلیظ

اصولاً در جریان‌های غلیظ نیروی ثقل که عامل حرکت این گونه جریان‌ها است دارای شتابی کم‌تر از شتاب ثقل زمین  $(g)$  بوده، که این میزان در رابطه ۴ تعریف شده است:

$$g' = g \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \quad (4)$$

در این رابطه  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $\rho_d$ ،  $\rho_a$  به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ هستند.

اگر یک جریان غلیظ که روی بستر با شیب کف  $S = \tan \theta$  در حرکت است، در نظر گرفته شود، می‌توان عدد فرود جریان غلیظ  $(Fr_d)$  را به صورت رابطه ۵ تعریف کرد.

$$Fr_d = \frac{\overline{U}}{\sqrt{g' h \cos \theta}} \quad (5)$$

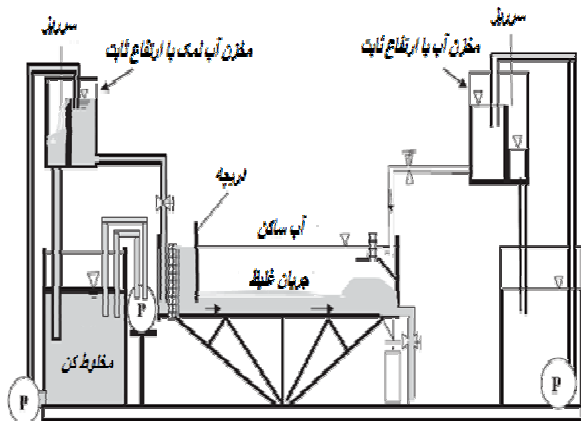
که  $\theta$  زاویه بستر با افق است و  $\overline{U}$  و  $h$  با رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند.

به این عدد، عدد فرود چگالی می‌گویند. در هر صورت رابطه ۶ در بیشتر وقت‌ها استفاده قرار می‌شود.

$$\frac{1}{Fr_d^2} = \frac{g' h \cos \theta}{\overline{U}^2} = Ri \quad (6)$$

که این تعریف عدد ریچاردسون کلی یا عمومی است (ترنر، ۱۹۷۳).

از طریق خط لوله و با شدت ثابت از مخزن اختلاط به یک منبع با ارتفاع ثابت پمپاژ و سپس از تانک با یک سیستم لوله و شیر فلکه به داخل فلوم هدایت می‌شود. دبی جریان غلیظ ورودی به فلوم با یک شیر فلکه تنظیم می‌شود که برای اندازه‌گیری آن از روش حجمی استفاده می‌شود. در این راستا ابتدا یک ظرف با حجم مشخص انتخاب و با دقت حجم آن اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری حجم، ظرف مذکور در زیر جریان قرار داده و زمان پر شدن ظرف اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن حجم و زمان پر شدن ظرف دبی ورودی جریان غلیظ محاسبه می‌شود. تمام طول فلوم با یک دریچه جداکننده کشویی به دو بخش با طول متفاوت تقسیم شد. بخش کوتاه‌تر در بالادست نقش تانک اصلی را برای سیال غلیظ مولد جریان غلیظ ایفا می‌کند.



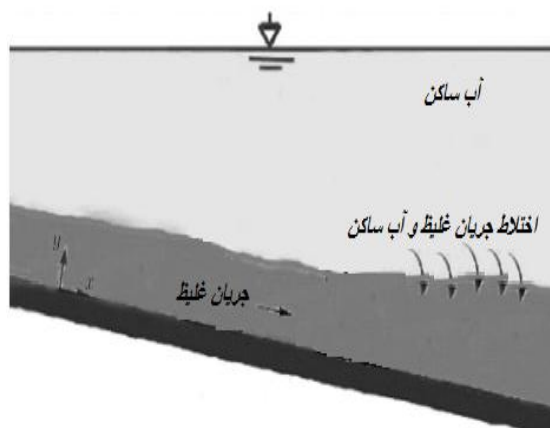
شکل ۳- نمای شماتیک از مدل فیزیکی

در شکل ۴ نمایی شماتیک از ابتدای فلوم نشان داده شده است. بخش طویل‌تر در پایین‌دست نقش مخزن را داشت که جریان غلیظ از زیر آن حرکت می‌کرد و در واقع بازه مورد آزمایش بود. دریچه ورودی یک عمق اولیه را برای جریان ایجاد می‌کرد. سپس با بالا بردن دریچه ورودی، جریان غلیظ وارد مخزن آب می‌شود و در زیر توده آب ساکن به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند و در پایین با استفاده از سیستم زهکش جریان غلیظ به خارج از آزمایشگاه تخلیه می‌شود. در طول آزمایش آب معمولی به آزمایش اضافه می‌شود تا جایگزین آب تخلیه شده توسط جریان غلیظ شود و رقوم آب را ثابت نگه دارد. آب اضافه شده به فلوم ابتدا وارد یک تانک با ارتفاع ثابت می‌شود. در نظر گرفتن تانک با سطح آب ثابت برای آب معمولی

به‌صورت تفاضل محدود رابطه بالا را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$(E_w)_{j-j+1} = \left[ \frac{1}{A_w} \right] \left[ \frac{2}{U_{j+1} + U_j} \right] [Q_{j+1} - Q_j] \quad (14)$$

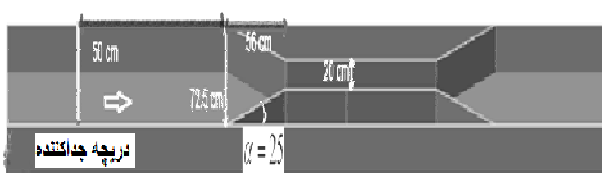
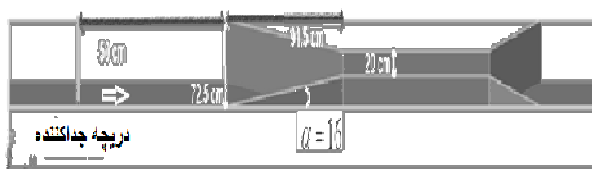
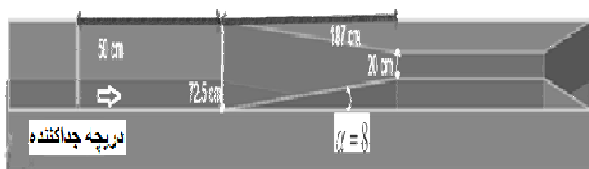
که در آن  $j$  و  $j+1$  بیانگر دو مقطع متوالی هستند. در شکل ۲ نمایی شماتیک از اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن نشان داده شده است. ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ را می‌توان با قانون برنولی اثبات کرد. سیال پیرامون که ساکن است، فشار استاتیکی بیشتری نسبت به جریان غلیظ که متحرک است، دارد. بنابراین گردادی فشار ایجاد شده باعث نفوذ سیال پیرامون به درون جریان غلیظ می‌شود (گراف، ۱۹۹۸).



شکل ۲- نمایی شماتیک از اختلاط در بدنه جریان غلیظ

### مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از یک فلوم شیب‌پذیر به‌عنوان مدل استفاده شده است که ابعاد آن به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۶، ۰/۷۲۵ و ۰/۱۶ متر بوده و دیواره‌های آن در طول ۶ متر دارای شیشه شفاف به منظور مشاهده جریان از هر دو طرف است. آزمایش‌ها با سه دبی (۰/۵۸، ۰/۹۸ و ۱/۲۸ لیتر بر ثانیه)، سه غلظت (۱۰، ۱۶ و ۲۵ گرم در لیتر)، سه شیب (۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲۵ و ۰/۰۱۶) و سه زاویه همگرایی (۸، ۱۶ و ۲۵ درجه) که در هر سه زاویه همگرایی عرض فلوم از ۷۲/۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر کاهش می‌یافت انجام شد. فلوم و تجهیزات مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در مجاورت فلوم یک مخزن اختلاط مجهز به پمپ مخلوط‌کن، برای تهیه و ذخیره جریان غلیظ در نظر گرفته شده بود. برای تهیه سیال غلیظ، نمک طعام با آب در مخزن اختلاط مخلوط می‌شد. سیال غلیظ تولید شده

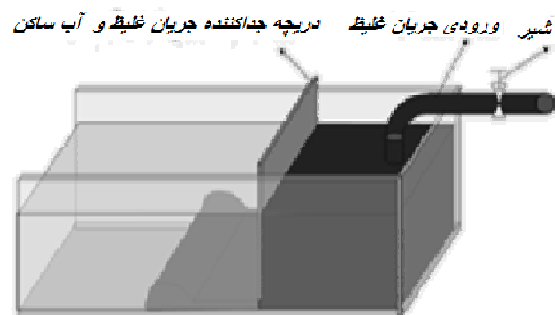


شکل ۶- نمایی از مقاطع همگرای ایجاد شده در داخل فلوم

### نتایج و بحث

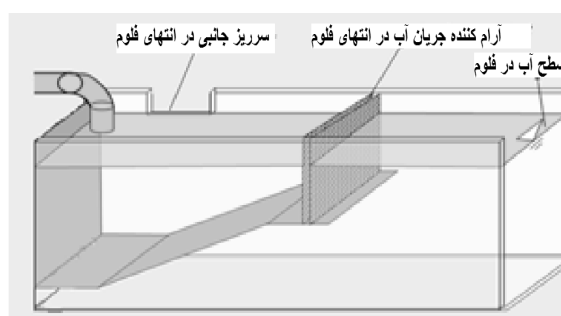
با توجه به انجام آزمایش در سه دبی، سه غلظت و سه شیب در هر زاویه همگرایی ۲۷ آزمایش انجام و ۵۴ پروفیل سرعت به دست آمد که در مجموع برای هر سه زاویه همگرایی ۸۱ آزمایش انجام و ۱۶۲ پروفیل سرعت رسم شد. نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت به دست آمده در شکل‌های ۷-الف الی ۷-و رسم شده است. با استفاده از پروفیل‌های سرعت به دست آمده در ابتدا و انتهای هر مقطع و استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ ارتفاع و سرعت جریان غلیظ برای هر پروفیل سرعت محاسبه شد. عدد ریچاردسون هر مقطع از رابطه ۶ و شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون بین دو مقطع متوالی از رابطه ۱۴ به دست می‌آید. متوسط عدد ریچاردسون دو مقطع به‌عنوان عدد ریچاردسون جریان در نظر گرفته شد. در شکل‌های ۸-الف الی ۸-ج مقادیر عدد ریچاردسون و شدت اختلاط برای به دست آوردن رابطه‌ای بین این دو پارامتر در مقابل یکدیگر رسم شده‌اند و در شکل ۸-د مقادیر عدد ریچاردسون و شدت اختلاط برای محدوده همگرایی ۸ تا ۲۵ درجه آورده شده است.

به‌منظور کنترل بهتر جریان و حذف نوسانات دبی آب بود. آب معمولی پس از تانک با سطح آب ثابت وارد حوضچه آرامش در انتهای فلوم شده تا باعث ایجاد تلاطم در آب ساکن نشود.

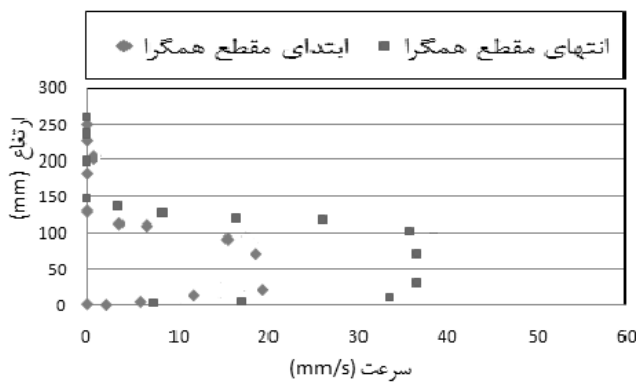


شکل ۴- شماتیک کلی از ابتدای فلوم

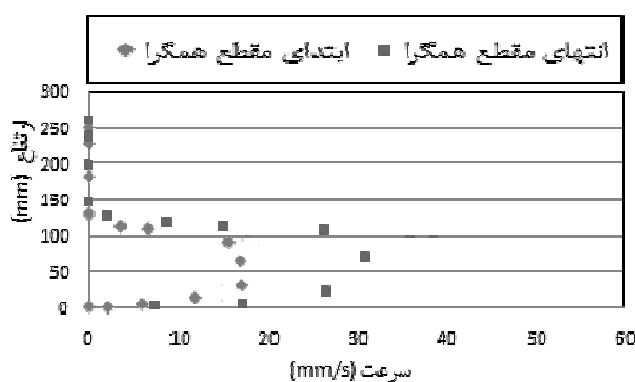
در شکل ۵ نمایی شماتیک از انتهای فلوم نشان داده شده است. در انتهای پایین‌دست فلوم یک شیر فلکه رقوم آب در فلوم را کنترل می‌کند. از جمله پارامترهای بسیار مهم در پدیده جریان‌های غلیظ، پروفیل عمقی سرعت است. با توجه به سرعت نسبتاً پایین جریان ایجاد شده در شرایط آزمایشگاه، استفاده از وسیله‌ای که ضمن دقت بسیار بالا، سرعت اندازه‌گیری مناسبی نیز داشته باشد ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی عدم ورود دستگاه اندازه‌گیری سرعت به درون جریان برای عدم ایجاد تلاطم مهم است. از این‌رو، در این پژوهش از دستگاه سرعت‌سنج صوتی *DOP2000* استفاده شد. سرعت بدنه در نقاط ابتدا و انتهای مقاطع همگرا که در شکل ۶ نمایی از آن‌ها نشان داده شده است ثبت می‌شد.



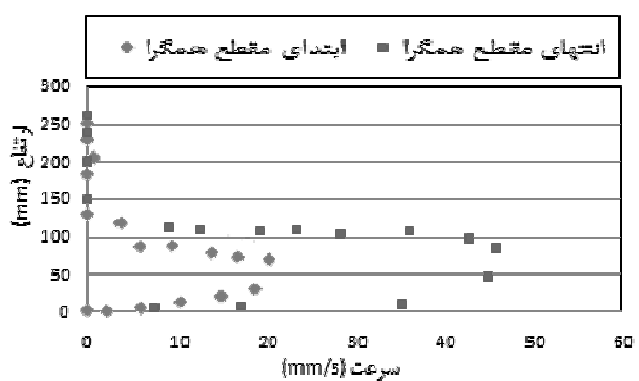
شکل ۵- شماتیک کلی از انتهای فلوم



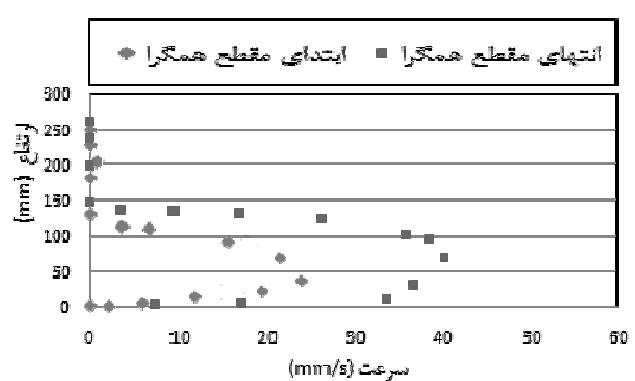
شکل ۷-ب- دبی ۰/۹۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۰ گرم در لیتر



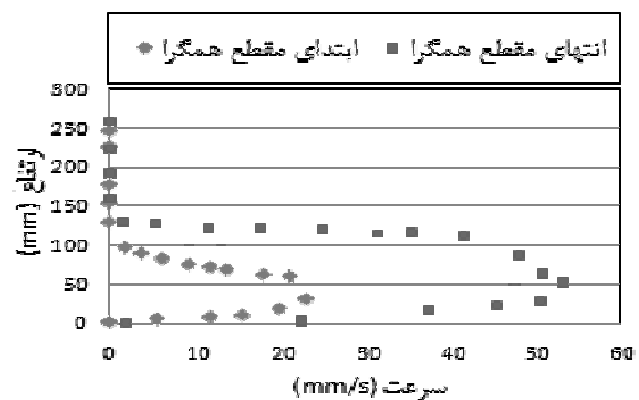
شکل ۷-الف- دبی ۰/۵۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۰ گرم در لیتر



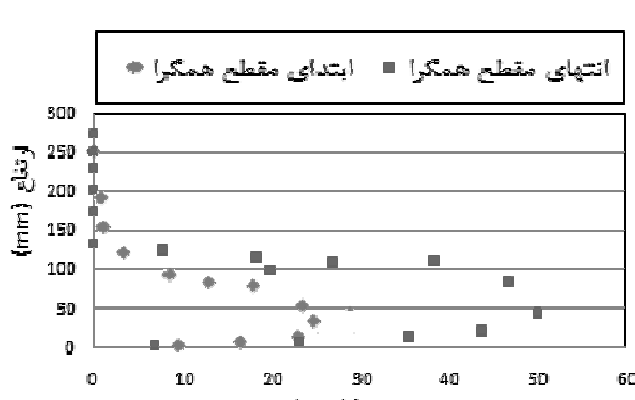
شکل ۷-د- دبی ۰/۵۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۶ گرم در لیتر



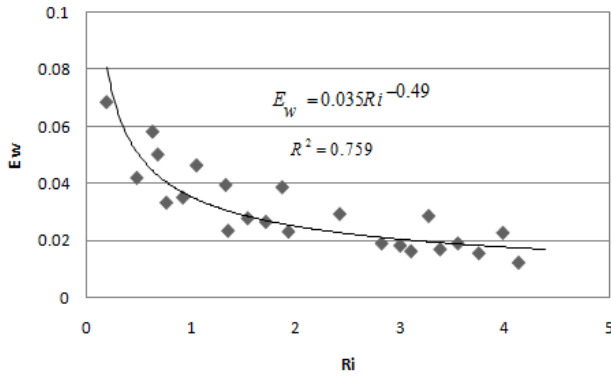
شکل ۷-ج- دبی ۱/۲۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۰ گرم در لیتر



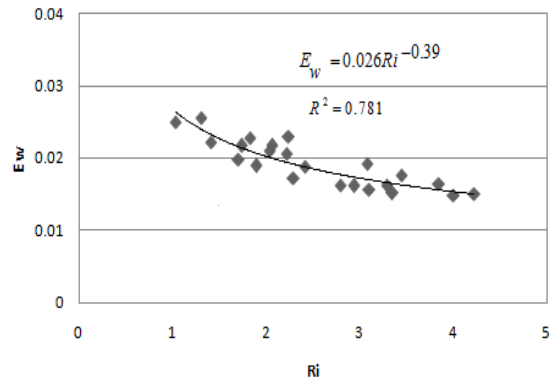
شکل ۷-و- دبی ۱/۲۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۶ گرم در لیتر



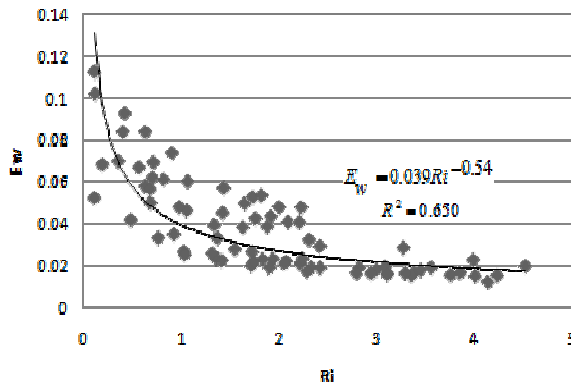
شکل ۷-ه- دبی ۰/۹۸ لیتر در ثانیه، شیب ۰/۰۰۹ و غلظت ۱۶ گرم در لیتر



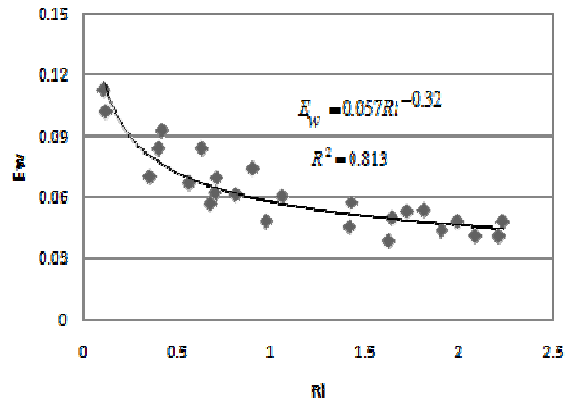
شکل ۸-ب- رابطه بین شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در بدنه در همگرایی ۱۶ درجه



شکل ۸-الف- رابطه بین شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در بدنه



شکل ۸-د- رابطه بین شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در بدنه بازای همه زوایای همگرایی



شکل ۸-ج- رابطه بین شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در بدنه

جدول ۲- رابطه‌های به دست آمده برای شدت اختلاط در مقاطع همگرا

| رابطه به دست آمده                        | زاویه (درجه) |
|--|--------------|
| $E_w = 0.026 / Ri^{0.39}$ $R^2 = 0.781$  | ۸            |
| $E_w = 0.035 / Ri^{0.49}$ $R^2 = 0.759$  | ۱۶           |
| $E_w = 0.057 / Ri^{0.32}$ $R^2 = 0.813$  | ۲۵           |
| $E_w = 0.039 / R_i^{0.54}$ $R^2 = 0.650$ | ۸ تا ۲۵      |

در نهایت با نرم‌افزار SPSS رابطه ۱۵ که در آن شدت اختلاط به صورت تابعی از عدد ریچاردسون و زاویه همگرایی است، بیان شد.

$$E_w = 0.076 \times Ri^{-0.189} + 0.096 \times \theta - 0.06 \quad (15)$$

که در آن  $\theta$  بر حسب رادیان و  $8 \leq \theta \leq 25$  است.

در شکل ۱۰ داده‌های محاسباتی از رابطه ۱۵ در مقابل داده‌های مشاهداتی رسم شده‌اند.

همان‌طور که دیده می‌شود در تمام زوایای همگرایی با افزایش عدد ریچاردسون از میزان شدت اختلاط کاسته می‌شود که این نتیجه‌گیری با نتایج به دست آمده توسط سایر پژوهشگران همخوانی دارد. با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای مذکور رابطه‌های به دست آمده برای اختلاط جریان غلیظ و آب ساکن در مقاطع همگرا در جدول ۲ آمده است.

شکل ۹ شدت اختلاط در سه مقطع همگرایی ۸، ۱۶ و ۲۵ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است با افزایش زاویه همگرایی بر میزان شدت اختلاط افزوده می‌شود که می‌توان گفت با توجه به این که در هر سه زاویه همگرایی عرض فلوم از ۷۲/۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزایش زاویه همگرایی از طول بازه کاسته شده و تغییرات مورد نظر در طول کمتری رخ داده که باعث تلاطم جریان و افزایش شدت اختلاط می‌شود.

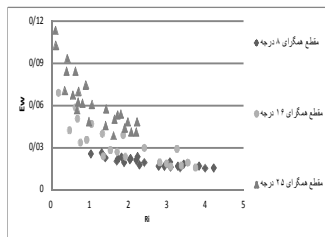
پژوهش‌ها در فلوم‌های با مقاطع ثابت یا واگرا بوده است در این پژوهش سعی شد تا رفتار جریان غلیظ و شدت اختلاط آن با سیال پیرامون در مقاطع همگرا بررسی و رابطه‌هایی مشابه رابطه‌های سایر پژوهشگران برای شدت اختلاط در مقاطع همگرا ارائه شود. بر این اساس رابطه‌هایی به دست آمد که در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به رابطه‌های به دست آمده برای شدت اختلاط در مقاطع همگرا می‌توان نتیجه گرفت که در مقاطع همگرا با افزایش زاویه همگرایی به دلیل تلاطم بیشتر جریان، اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن افزایش می‌یابد.

### سپاس‌گزاری

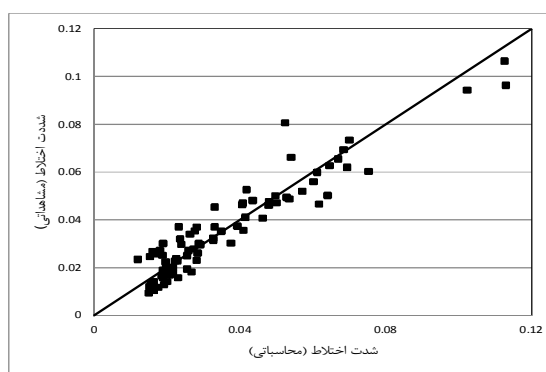
بدین وسیله از تمامی استادان و کارکنان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز که در طول انجام آزمایش‌ها ما را یاری کردند قدردانی می‌شود.

### منابع

۱. ترابی پوده ح. ۱۳۸۶. بررسی رفتار جریان غلیظ در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها. رساله دکتری. دانشگاه شهید چمران. ۱۹۸ ص.
۲. حقی‌آبی ا. ح. ۱۳۸۳. بررسی تأثیر شیب کف بر پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ. رساله دکتری. دانشگاه شهید چمران. ۲۱۵ ص.
۳. قمشی م. ۱۳۷۷. بررسی آزمایشگاهی حرکت جریان‌های غلیظ. مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولیک ایران. ۲۴۹-۲۶۰.
۴. کرم‌زاده ن. ۱۳۸۳. بررسی آزمایشگاهی کشش آب ساکن در جریان‌های غلیظ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران. ۱۲۶ ص.
5. Ashida K. and Egashira S. 1995. Basic study on turbidity currents. Proceedings of Japan Society of Civil Engineers. Tokyo. 237:37-50.
6. Chikita K. 1990. Sedimentation by river - induced Turbidity currents. field measurements and Interpretation. Sedimentology. 37: 891-905.
7. Fukushima Y. Parker G. and Pantin H. M. 1985. Prediction of ignitive turbidity currents in Scripps submarine canyon. Marin. Geo. 67:55-81.
8. Graf W. H. and Altinakar M. S. 1998. Fluvial Hydraulics-Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry. Chapter 7. Wiley. New-York. 681 pp.



شکل ۹- مقایسه شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در بدنه در سه زاویه همگرایی



شکل ۱۰- داده‌های محاسبات از رابطه ۱۵ در مقابل داده‌های مشاهداتی

$E\%$ ، درصد خطا و  $RMSE$ ، متوسط ریشه مربعات خطا که با رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ تعریف می‌شوند که در این رابطه‌ها  $E_{w(m)}$ ،  $E_{w(p)}$  به ترتیب شدت اختلاط محاسباتی و مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌های آماری هستند و  $R^2$  ضریب تبیین برای داده‌های شکل ۱۰ است، محاسبه شده است.

$$E\% = \frac{\sum |E_{w(m)} - E_{w(p)}|}{\sum E_{w(m)}} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (E_{w(m)} - E_{w(p)})^2}{n}} \quad (17)$$

$$E\% = 18/9, RMSE = 0/073 \text{ و } R^2 = 0/89$$

### نتیجه‌گیری

از آنجا که تاکنون رفتار جریان غلیظ در مقاطع همگرا توسط هیچ یک از پژوهشگران بررسی نشده و تمام



9. Graf W. H. 1983. The behavior of a silt-laden current. *International Water Power & Dam Construction*. 35(9):33-38.
10. Parker G. Garcia M. Fukushima Y. and Yu W. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*. 25(1):123-147.
11. Turner J. S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press. London. U.K. 368 p.

