علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤١، شماره‌ی۳، پاییز ۹۷، ص. ١٤-١

بررسی آزمایشگاهی شدت اختلاط جریان غلیظ نمکی بر روی بستر با زبری‌های مکعبی

هادی داودی بِنی[1]، سیدمحمود کاشفی‌پور[2*] و مهدی قمشی[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز .
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز kashefipour@excite.com
۳- استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۳۱

چکیده

جریان غلیظ یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر بر رسوب‌گذاری و کیفیت آب در مخازن سدها و منابع آب می‌باشد. با توجه به این‌که کمبود آب یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش روی انسان‌هاست، لذا تحقیق بر روی پدیده‌هایی همچون جریان غلیظ که منابع آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند، ضروری می‌باشد. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر شدت اختلاط جریان غلیظ نمکی بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها با سه دبی (۰/٦، ۰/۹ و ۱/۲ لیتر در ثانیه)، سه شیب بستر (۰، ۱/۷ و ۳/٤ درصد) و یک غلظت (۲۰ گرم در لیتر) در چهار بستر با ارتفاع زبری (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر) با آرایش زیگزاگی در فلومی به طول ۷/۸ متر و عرض ۳۵ سانتی‌متر با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر که در مجموع ۳٦ آزمایش می‌باشند، انجام گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش هر یک از پارامترهای شیب، دبی و ارتفاع زبری، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد. در نهایت پس از انجام تحلیل ابعادی و بررسی هر یک از پارامترهای مؤثر، رابطه‌ای برای تخمین ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ پیشنهاد گردید.

کلید واژه‌ها: زبری بستر، جریان کدر، ضریب شدت اختلاط، مخازن سدها.

مقدمه

اگر جریان غلیظ قبل از ورود به محل سد، در مخزن کنترل شود و اجازه رسوب‌گذاری در نقاط حساس داده نشود، عمر مفید سد به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. لذا شناخت این پدیده و تحقیق بر روی پارامترهای مؤثر بر آن می‌تواند کمک شایانی در کنترل جریان غلیظ و افزایش عمر مفید سدها داشته باشد. با توجه به ارزش اقتصادی و اجتماعی کنترل جریان غلیظ و همچنین از آن‌جایی که تحقیق در زمینه زبری بستر و نقش آن در کنترل رسوبات مخازن اندک بوده، به بررسی جریان غلیظ و شناخت و کنترل آن پرداخته شده است.

به طور ساده پدیده جریان غلیظ زمانی شکل می‌گیرد که سیالی با چگالی ($\rho_d = \rho_a + \Delta\rho$) درون سیالی با چگالی ($\rho_a$) جریان یابد. این اختلاف چگالی ممکن است ناشی اختلاف دما، اختلاف غلظت مواد محلول، اختلاف غلظت ذرات معلق و یا ترکیبی از آن‌ها باشد (Graf and Altinakar, 1998). اگر اختلاف در غلظت مواد معلق باعث اختلاف چگالی گردد، به این جریان، جریان کدر گفته می‌شود. به عبارت دیگر جریان غلیظ جریانی است که به علت اعمال نیروی ثقل بر اختلاف چگالی دو سیال به وجود آید که این نیرو شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد. در واقع شتاب ثقل کاهش یافته، نیروی محرکه جریان وزنی بوده که به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$g' = g\left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a}\right) = g\frac{\Delta\rho}{\rho_a} \qquad (۱)$$

که در آن ρ_a چگالی سیال پیرامون، ρ_d چگالی جریان غلیظ و g شتاب ثقل زمین می‌باشد. از آن‌جائیکه عامل حرکت جریان‌های غلیظ، اعمال نیروی ثقل بر اختلاف چگالی دو سیال می‌باشد، لذا به این جریان‌ها جریان‌های ثقلی نیز گفته می‌شود.

هنگامی که سیال غلیظ وارد مخزن سیال پیرامون می‌شود، اگر چگالی جریان غلیظ از چگالی سیال پیرامون بیشتر باشد، جریان غلیظ از نوع زیررونده و اگر چگالی جریان غلیظ از چگالی سیال پیرامون کم‌تر باشد، جریان غلیظ از نوع رورونده خواهد بود. و اگر سیال پیرامون دارای لایه‌بندی چگالی باشد، جریان غلیظ، چگالی مناسب محیط خود را پیدا خواهد کرد و به صورت میان رونده حرکت خواهد نمود (Graf, 1983)، که جریان مورد بحث در مخازن سدها، غالباً جریان زیررونده می باشد.

در طبیعت نمونه‌های بسیاری از جریان‌های غلیظ دیده می‌شود که فعالیت‌های انسان نیز بر انواع آن‌ها افزوده است. مواردی چون سرازیر شدن گدازه‌های ناشی از انفجار آتشفشان، سقوط بهمن‌ها، جبهه‌های هوای سرد و گرم، طوفان همراه با گرد وغبار، جریان‌های رسوبی در دریاها و مصب رودخانه‌ها همگی نمونه‌هایی طبیعی از این‌گونه جریان‌ها می‌باشند (Graf and Altinakar, 1998).

حرکت جریان غلیظ درون سیال پیرامون، باعث اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون می‌گردد. شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن، که با E_w نشان داده می‌شود، ناشی از ناپایداری های حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن بوده و به صورت نسبت سرعت اختلاط W_h به سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ $\overline{U}$ تعریف می‌شود (Turner, 1983). شکل (۱) شمایی از جریان غلیظ و اختلاط آن با سیال پیرامون را نشان می‌دهد.

مطالعات بسیاری در رابطه با جریان غلیظ انجام شده است. گروهی از این مطالعات در خصوص شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون می‌باشد که روابط تئوری و تجربی بسیاری نیز در این‌باره وجود دارد. اکثر این مطالعات به دنبال رابطه‌ای برای برآورد میزان E_w هستند که خود تابعی از عدد ریچاردسون (Richardson Number) می‌باشد:

$$E_w = f(Ri) \qquad (۲)$$

معادله‌های حاکم

از آن‌جائیکه عامل حرکت جریان‌های غلیظ نیروی ثقل می‌باشد، همانند جریان در کانال‌های باز از عدد فرود برای تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می‌گردد، با این تفاوت که شتاب ثقل به‌دلیل اختلاف چگالی کاهش یافته است، که آن را عدد فرود ذره رسوبی (Densimetric Froude Number) می‌نامند و از رابطه (۳) حاصل می‌شود.

$$Fr_d = \frac{\overline{U}}{\sqrt{g'h\cos\theta}} \qquad (۳)$$

که در آن Fr_d عدد فرود ذره رسوبی، $\overline{U}$ سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ، g' شتاب ثقل کاهش یافته، h ضخامت بدنه جریان غلیظ و θ زاویه بستر با افق است. فرم دیگری از این رابطه که در اکثر مطالعات جریان‌های غلیظ به کار می‌رود عدد ریچاردسون می‌باشد که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\frac{1}{Fr_d^{\,2}} = \frac{g'h\cos\theta}{\overline{U}^{\,2}} = Ri \qquad (۴)$$

حدفاصل بین جریان کدر و سیال پیرامون معمولا به آسانی قابل تشخیص نیست لذا برای به‌دست آوردن عمق و سرعت بدنه جریان، به انتگرال گیری در عمق جریان نیاز است. Ellison و Turner (1959) روابط (۵) و (۶) را برای به‌دست آوردن عمق و سرعت متوسط ارائه نمودند.

$$h = \frac{\left(\int_0^{\infty} u dz\right)^2}{\int_0^{\infty} u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_t} u dz\right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \qquad (۵)$$

$$\overline{U} = \frac{\int_0^{\infty} u^2 dz}{\int_0^{\infty} u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \qquad (۶)$$

که در این روابط، u سرعت نقطه ای جریان (به‌صورت تابعی از عمق است) و ht ارتفاعی است که در آن سرعت برابر با صفر است (ارتفاع سرعت صفر).

در معادله پیوستگی فاز سیال باید مقداری برای ضریب درون آمیختگی سیال پیرامون پیدا کرد. معادله پیوستگی فاز سیال در حالت دو بعدی به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (۷)$$

که در آن u و w سرعت‌های نقطه‌ای متوسط زمانی به‌ترتیب در امتداد محورهای x و z می‌باشند. پس از انتگرال‌گیری در عمق جریان غلیظ در محدوده‌ی بدنه جریان می‌توان نوشت (رابطه ۸):

$$\int_0^{h_t} \frac{\partial u}{\partial z} dz + \int_0^{h_t} \frac{\partial w}{\partial z} dz = \left(\frac{\partial}{\partial x}\int_0^{h_t} u dz - u_{h_t}\frac{\partial h_t}{\partial x}\right) + w_{h_t} - w_b \qquad (۸)$$

که در آن u_{h_t} و w_{h_t} به ترتیب مولفه‌های افقی و عمودی سرعت در مرز مشترک بین جریان غلیظ و سیال پیرامون و w_b سرعت عمودی در کف بستر می‌باشند.

طبق تعریف، سرعت افقی در فصل مشترک و سرعت عمودی در روی بستر مساوی صفر هستند و سرعت قائم در فصل مشترک $w_{h_t} = w_h$ به عنوان سرعت درون‌آمیختگی سیال پیرامون به داخل جریان غلیظ تعریف می‌شود. در نتیجهٔ درون‌آمیختگی، سیال محیط که ابتدا در حال سکون بوده است، سرعت متوسط کوچکی عمود بر جریان اصلی پیدا می‌کند. بنابراین با توجه به مطالب فوق، معادله پیوستگی فاز سیال را می‌توان به صورت رابطه (۹) نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x}(UH) = -w_h \qquad (۹)$$

رابطه (۹)، معادله پیوستگی فاز سیال جریان غلیظ می‌باشد و فرض می‌شود که سرعت درون‌آمیختگی یا اختلاط، w_h، متناسب با سرعت جریان غلیظ، U، است رابطه (۱۰) (Turner, 1983).

$$-w_h = E_w U \qquad (۱۰)$$

E_w ضریب اختلاط سیال پیرامون یا همان ضریب ورود سیال پیرامون به داخل جریان غلیظ می‌باشد. اکثر محققین E_w را تابعی از عدد ریچاردسون معرفی می‌کنند و برخی دیگر علاوه بر عدد ریچاردسون آن را تابعی از ضریب درگ در بستر می‌دانند. E_w را می‌توان از رابطه‌ی (۱۱) به صورت تفاضل محدود با داشتن اطلاعات سرعت و عمق در دو مقطع از جریان غلیظ محاسبه نمود:

$$E_w = \left[\frac{2}{U_{i+1}+U_i}\right]\left[\frac{(Uh)_{i+1}-(Uh)_i}{x_{i+1}-x_i}\right] \qquad (۱۱)$$

که در آن i و $i+1$ نشان‌دهنده دو مقطع متوالی هستند. ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ را می‌توان با استفاده از قانون برنولی اثبات نمود. سیال پیرامون به دلیل حرکت نداشتن، فشار استاتیکی بیشتری نسبت به جریان غلیظ که متحرک می‌باشد، دارد. بنابراین گرادیان فشار ایجاد شده باعث نفوذ سیال پیرامون به درون جریان غلیظ شده و علاوه بر این به دلیل تنش و تلاطم در مرز جریان غلیظ و سیال پیرامون، عمل اختلاط و ورود آب به جریان غلیظ بیشتر می‌گردد (Graf and Altinakar, 1998).

پیشینه تحقیق

پژوهشگران با انجام آزمایش‌های گوناگون بر روی جریان‌های غلیظ با جرم مخصوص‌های متفاوت دریافتند که ضریب شدت اختلاط، E_w تابعی ازعدد ریچاردسون می‌باشد. Ellison و Turner (1959) بـا انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که با افزایش عدد ریچاردسون، ضریب شدت اختلاط به شدت کاهش می‌یابد. رابطه ارائه شده توسط این دو محقق به‌صورت رابطه (۱۲) می‌باشد:

$$E_w = \frac{0.08-0.1Ri}{1+5Ri} \qquad Ri<4 \qquad (۱۲)$$

Parker et al. (1987) با آزمایش بر روی جریان غلیظ رسوبی و بر روی دو شیب ۲/۸۶ درجه و ۴/۶ درجه و با استفاده از داده‌های محققین قبلی رابطه(۱۳) را با برازش چشمی بر کلیه داده‌ها ارائه نمودند:

$$E_w = \frac{0.075}{\left(1+718Ri^{2.4}\right)^{0.5}} \qquad (۱۳)$$

Ghomeshi (1995) با انجام آزمایش‌هایی بر روی جریان غلیظ نمکی و رسوبی و بر روی شیب کف ثابت و برابر ۰/۰۰۶۳۵ رابطه (۱۴) را برای ضریب شدت اختلاط ارائه نمود:

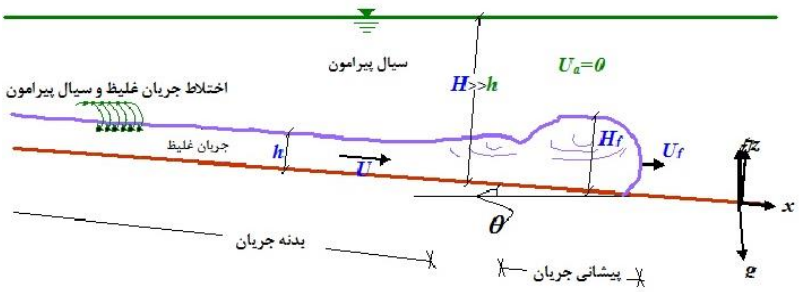
$$E_w = \frac{0.0024}{R_i^{1.06}} \qquad (۱۴)$$

Haghiabi (2004) تأثیر شیب کف بر رفتار جریان غلیظ و اختلاط بدنه جریان غلیظ با جریان نمکی و رسوبی (درشت دانه و ریز دانه) را بررسی و رابطه (۱۵) را برای ضریب شدت اختلاط ارائه نمود.

$$E_w = 0.023R_i^{-1.0743} \qquad (۱۵)$$

KaramZadeh (2005) در یک فلوم آزمایشگاهی برای ۱۵ شیب بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۳ و دو غلظت ۳۰ و ۴۰ گرم در لیتر با جریان غلیظ نمکی به بررسی تأثیر شیب و غلظت را بر ضریب شدت اختلاط پرداخت . نتایج وی نشان داد که با افزایش غلظت و شیب سرعت بدنه جریان افزایش و عمق جریان کاهش می‌یابد همچنین رابطه (۱۶) را برای ضریب شدت اختلاط ارائه نمود:

$$E_w = \frac{0.001}{R_i^{1.035}} \qquad (۱۶)$$



شکل ۱ - نمایی از جریان غلیظ و شماتیک اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون

Torabi et al (2007) به بررسی جریان‌های غلیظ در مقاطع غیر یکنواخت واگرا با زوایای واگرایی ۸ ، ۱۲ و ۲۶ درجه پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که شدت اختلاط سیال پیرامون در مقطع واگرا به دلیل تلاطم‌های ایجاد شده از مقطع ثابت بیشتر می‌باشد. وی رابطه (۱۷) را برای محاسبه ضریب شدت اختلاط در مقاطع واگرا پیشنهاد نموده است.

$$E_w = \frac{0.0058}{Ri^{0.6795}} \qquad (۱۷)$$

Bahrami (2010) علاوه بر عدد ریچاردسون، شدت اختلاط را وابسته به نسبت ارتفاع سیال پیرامون (H) به ارتفاع بدنه جریان غلیظ (h) دانسته و روابط ذیل را ارائه نموده است.

$$E_w = 0.0003 Ri^{-0.538} (H/h)^{2.24} \qquad H/h<7 \qquad (۱۸)$$

$$E_w = 0.0099 Ri^{-0.83} \qquad H/h>7 \qquad (۱۹)$$

Varjavand et al. (2015) با مطالعه بر روی جریان‌های غلیظ، به بررسی ضریب شدت اختلاط بر روی بستر دارای زبری استوانه‌ای و مخروطی پرداخت. نتایج وی نشان داد که E_w علاوه بر گرادیان عدد ریچاردسون، به ارتفاع زبری (r) نیز وابسته است و سپس روابط (۲۰) تا (۲۲) را برای ضریب شدت اختلاط ارائه نمود:

$$E_w = \frac{0.0026}{R_i^{1.130}} \qquad \text{بستر صاف} \qquad (۲۰)$$

$$E_w = \frac{0.0228}{R_i^{1.329}(\frac{r}{h})^{-0.749}} \qquad \text{بسترزبراستوانه ای} \qquad (۲۱)$$

$$E_w = \frac{0.0204}{R_i^{1.343}(\frac{r}{h})^{-0.721}} \qquad \text{بستر زبر مخروطی} \qquad (۲۲)$$

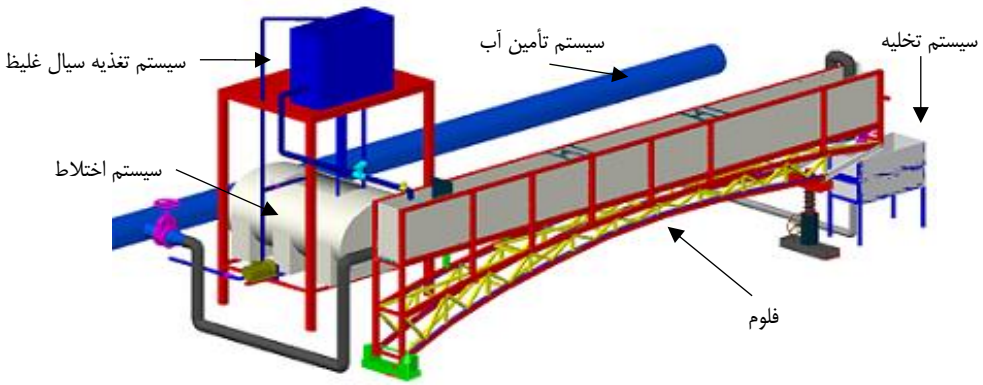
Daryaee et al. (2016) به بررسی تأثیر زبری در ناحیه دیواره بر روی مشخصات پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ رسوبی در چهار شیب و دو غلظت به همراه چهار نوع ارتفاع زبری در حالت زیر بحرانی پرداخت و به نتایج زیر دست یافت:

- افزایش ارتفاع زبری منجر به کاهش سرعت و افزایش ارتفاع پروفیل سرعت می‌شود که به نظر می‌رسد این موضوع منجر به کاهش فرسایش بستر می‌شود.
- وجود زبری به دلیل کاهش سرعت جریان غلیظ، ته‌نشینی رسوبات و کاهش غلظت در عمق را به همراه خواهد داشت.
- بیشترین میزان تأثیر افزایش زبری بر روی ارتفاع ماکزیمم (۹۶+ درصد) می‌باشد. حال آن که این تغییرات بر روی سرعت بیشتر (۲+ درصد) و بر ارتفاع پروفیل سرعت (۵- درصد) می‌باشد.

اگر جریان غلیظ به طور کامل قبل از ورود به محل سد در مخزن سد کنترل شود و اجازه رسوب‌گذاری در نقاط حساس داده نشود، کارایی مخزن به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. از آنجایی که تحقیقات در زمینه تاثیر زبری بستر در جریان غلیظ و نقش آن در کنترل رسوب مخازن اندک بوده، در این تحقیق به بررسی شدت اختلاط و عوامل موثر بر آن در جریان غلیظ نمکی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر با سه دبی (۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ لیتر بر ثانیه) و سه شیب (۰٪ ، ۱/۷٪ و ۳/۴٪) و یک غلظت (۲۰ گرم در لیتر) در بستر صاف و همچنین در سه بستر زبر با ارتفاع (۵، ۱۰، ۱۵ میلی‌متر) و با استفاده از محلول آب ونمک و ماده رنگی (پودر رنگ رنگرزی، پرمنگنات سدیم، که این ماده رنگی هیچ‌گونه تأثیری بر روی شوری سیال غلیظ ندارد) به عنوان جریان غلیظ، در فلومی شیب‌پذیر به طول هشت متر، عرض ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، انجام شده‌اند (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر شماتیک فلوم و تجهیزات آن

در فاصله‌ی ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای فلوم یک دریچه کشویی قرار دارد که قابلیت بازشدگی حداکثر ده سانتی‌متر را داراست. این دریچه عمل جدا نمودن محیط سیال پیرامون و سیال غلیظ و همچنین کنترل ورود سیال غلیظ به درون سیال پیرامون را بر عهده دارد. این فلوم قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۳/۸ درصد را داراست که به وسیله جک مکانیکی که در پایین دست فلوم واقع است، انجام می‌گیرد. برای ایجاد بستر زبر مصنوعی، از زبری‌های مکعب مستطیلی از جنس پلکسی گلاس به طول و عرض ۱/۵ سانتی‌متر و با ارتفاع‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر استفاده گردید. این زبری‌ها با چسب مخصوص به ورقه‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس به ابعاد ۳۵*۵۰ سانتی‌متر متصل شدند که فاصله‌ی مرکز به مرکز زبری‌ها ۱/۵ سانتی‌متر است. این ورقه‌های دارای زبری از فاصله ۱/۵ متری از ابتدای فلوم و به طول سه متر یعنی تا ۴/۵ متری، با چسب آکواریوم به کف فلوم متصل شده و بستر زبر را فراهم می سازند. شکل (۳) تصویر شماتیکی از چینش زبری‌ها به شکل زیگ‌زاگ و ورقه‌های داری زبری قرار گرفته در فلوم را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد سیال غلیظ در این آزمایش محلول آب و نمک است. در ابتدا مخزن اختلاط، با توجه به میزان غلظت مورد نظر و نمک مورد استفاده، با آب تمیز آب‌گیری می‌شود. نمک مورد استفاده ابتدا در ظروفی حل شده و به داخل مخزن اختلاط ریخته می‌شوند. پس از آن برای تفکیک جریان غلیظ و سیال پیرامون، مقداری ماده رنگی که ابتدا در ظرفی با آب داغ حل شده به مخزن اختلاط اضافه می‌گردد. بعد از آماده شدن سیال غلیظ، به وسیله پمپ، سیال غلیظ به هد تانک منتقل می‌گشت. پس از آن سیال پیرامون در پایین‌دست دریچه کشویی (محیط سیال پیرامون) به آرامی و بدون تلاطم تغذیه می‌شود. سپس با بالا آمدن سطح سیال پیرامون، شیرفلکه متصل به دبی سنج به آرامی باز شده تا سیال غلیظ پشت دریچه کشویی را پر نماید. اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیر فلکه ذکر شده صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی، به محض آنکه سطح سیال غلیظ در پشت دریچه فلوم هم سطح با سیال پیرامون گشت، دریچه کشویی فلوم گشوده شده و جریان غلیظ با دبی تنظیم شده وارد فلوم (سیال پیرامون) می‌گشت. از آنجایی‌که سیال غلیظ می‌بایست به یک‌باره وارد سیال پیرامون گردد، لذا برروی دریچه اهرمی نصب شده است.

که این عمل را انجام می‌دهد. با وارد شدن جریان غلیظ به سیال پیرامون و شروع آزمایش، جریان غلیظ در طول بستر به حرکت در آمده و پس از اتمام آزمایش و رسیدن پیشانی جریان غلیظ به انتهای فلوم، دریچه انتهایی فلوم (دریچه تخلیه) باز شده و جریان تخلیه می گردید. برای محاسبه سرعت بدنه جریان غلیظ از دستگاه سرعت‌سنج DOP2000 (Doppler) که به روش آکوستیک عمل اندازه‌گیری پروفیل سرعت را انجام می‌دهد، استفاده شد (شکل ۴). بلافاصله پس از تخلیه کامل پیشانی جریان به بیرون فلوم و حصول اطمینان از یکنواخت بودن بدنه جریان در طول فلوم، پروفیل‌های سرعت توسط دو پراب دستگاه سرعت‌سنج DOP2000 در مقاطع ۲ و ۴/۵ متری از دریچه ثبت می‌گردید. پس از اتمام ثبت پروفیل‌های سرعت، آزمایش به اتمام رسیده و شیر فلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم بسته شده و فلوم برای آزمایش بعدی تخلیه و آماده سازی می‌گشت.

به منظور ارائه معادله‌ای برای محاسبه ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ، تحلیل ابعادی صورت گرفت. پارامترهای لازم جهت تحلیل ابعادی در خصوص ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ به شکل رابطه (۲۳) می‌باشند:

$$f(U,k_s,h\ ,q_{0,}\rho_d,\rho_a,g,S,W_h) \qquad (۲۳)$$

که در آن U سرعت متوسط بدنه جریان، k_s ارتفاع زبری، h ارتفاع بدنه جریان، q_0 دبی در واحد عرض ورودی جریان غلیظ، ρ_d چگالی جریان غلیظ، ρ_a چگالی سیال پیرامون، g شتاب ثقل، S شیب بستر و W_h سرعت ورود سیال پیرامون به بدنه جریان جریان غلیظ می‌باشد. پس از انجام تحلیل ابعادی برای شدت اختلاط، رابطه‌ای مطابق رابطه (۲۴) حاصل شد:

$$f(\frac{k_s}{h},\frac{q_0}{Uh},R_i,E_w)=0 \qquad (۲۴)$$

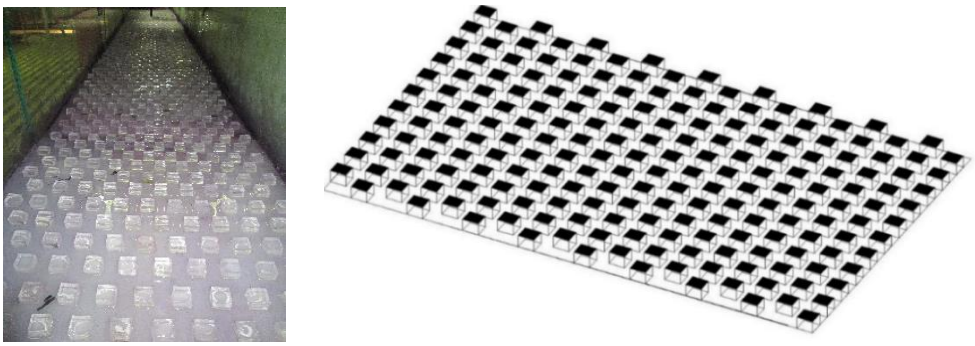
که در آن E_w ضریب شدت اختلاط جریان و R_i عدد ریچاردسون می باشند. با توجه به محاسبه میزان ضریب شدت اختلاط، رابطه بالا به صورت رابطه (۲۵) حاصل گردید:

$$E_w = f(\frac{k_s}{h},\frac{q_0}{Uh},R_i) \qquad (۲۵)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد با توجه به رابطه (۲) ضریب اختلاط تابعی از عدد ریچاردسون می‌باشد و از رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد که در واقع افزایش آن نشان‌دهنده اختلاط بین لایه‌های سیال و افزایش ورود سیال پیرامون به جریان غلیظ می‌باشد و در نتیجه آن از مقدار شار شناوری کاسته شده و قدرت جریان غلیظ کاهش می‌گردد. در این بخش به بررسی اثر شیب، دبی و ارتفاع زبری بستر بر ضریب شدت اختلاط پرداخته شده است. شکل (۵) نشان دهنده‌ی اثر شیب بر شدت اختلاط می‌باشد که میزان ضریب شدت اختلاط در برابر شیب برای بسترهای متفاوت رسم شده است. نقاط به‌دست آمده در این شکل با میانگین‌گیری از سه دبی در شیب مربوطه در بسترهای متفاوت حاصل شده است. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌گردد که با افزایش شیب، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد. به طور میانگین به ازای افزایش

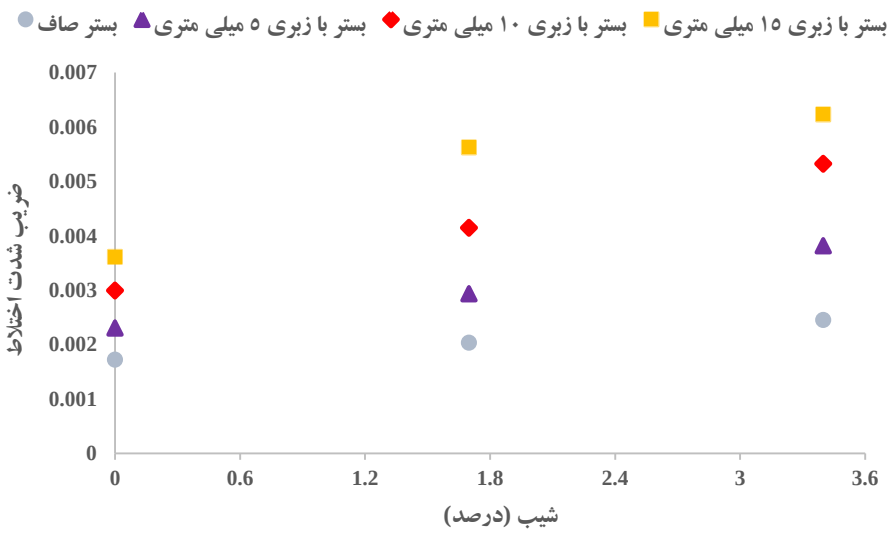
شیب از صفر درصد به ۳/۴ درصد، میزان ضریب شدت اختلاط تقریبا به میزان ۳۸ درصد افزایش یافته است. در جدول (۱) میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش شیب در تمامی بسترها برآورد شده است. شکل (۶) نشان دهنده اثر دبی ورودی جریان غلیظ بر شدت اختلاط می‌باشد. نقاط به دست آمده در این شکل با میانگین‌گیری از سه شیب در دبی مربوطه در بسترهای متفاوت حاصل شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد. به طور میانگین به ازای افزایش دبی ورودی از ۰/۶ به ۱/۲ لیتر در ثانیه، ضریب شدت اختلاط حدودا به میزان ۴۱ درصد افزایش داشته است. در جدول (۲) میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش دبی در بسترهای مختلف برآورد شده است.



شکل ۳- شمای ورقه‌ها و نمونه ورقه‌های قرار گرفته در فلوم



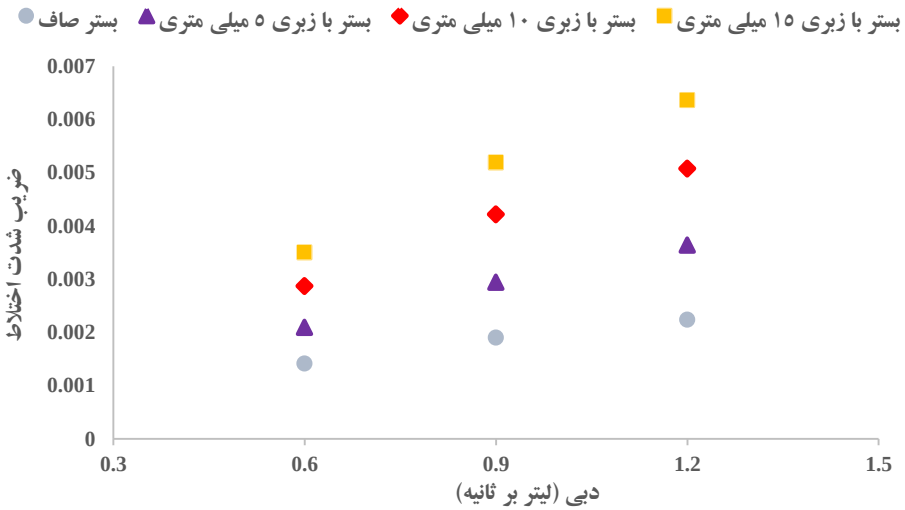
شکل ٤- نمایی از دستگاه سرعت‌سنج DOP2000 و پراب‌های دریافت کننده و صاتع کننده



شکل ۵- تغییرات ضریب شدت اختلاط در برابر شیب برای بسترهای با زبری متفاوت

جدول ۱- میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش شیب از صفر درصد به ۳/٤ درصد

میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش شیب از صفر به ۳/۴ درصد (درصد)	نوع بستر
۲۹/۷	صاف
۳۹/۵	دارای زبری ۵ میلی متری
۴۲	دارای زبری ۱۰ میلی متری
۴۳/۷	دارای زبری ۱۵ میلی متری



شکل ٦- تغییرات ضریب شدت اختلاط در برابر دبی ورودی جریان غلیظ

جدول۲- میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش دبی از ۰/٦ لیتر در ثانیه به ۱/۲ لیتر در ثانیه

میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش دبی از ۰/۶ به ۱/۲ لیتر در ثانیه (درصد)	نوع بستر
۳۶/۶	صاف
۴۲/۵	دارای زبری ۵ میلی متری
۴۳/۴	دارای زبری ۱۰ میلی متری
۴۴/۹	دارای زبری ۱۵ میلی متری

به‌منظور بررسی تأثیر زبری بر روی اختلاط سیال پیرامون، نتایج حاصل از تمامی آزمایش‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. این شکل نشان‌دهنده تأثیر زبری بر روی ضریب اختلاط می‌باشد. در این شکل ضریب اختلاط به ازای تمامی دبی‌ها و شیب‌ها در چهار بستر در برابر عدد ریچاردسون نشان داده شده است. با بررسی نتایج می‌توان گفت که افزایش زبری دو تأثیر مهم بر روی جریان غلیظ داشته که در مقابل هم عمل می‌کند:

الف- افزایش زبری باعث کاهش سرعت شده که این کاهش با افزایش عدد ریچاردسون همراه می‌باشد و در نتیجه از میزان ضریب شدت اختلاط کم شده است.

ب- افزایش زبری باعث افزایش تلاطم در فصل مشترک جریان غلیظ با سیال پیرامون شده که این تلاطم باعث افزایش ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ و افزایش ضریب شدت اختلاط می‌شود.

نکته قابل توجه در شکل (۷) این است که با افزایش ارتفاع زبری به ازای یک عدد ریچاردسون ثابت، ضریب شدت اختلاط افزایش می‌یابد. با توسعه رابطه‌ای بین عدد ریچاردسون، زبری نسبی و ضریب شدت اختلاط و به کمک تحلیل حساسیت، این نتیجه حاصل خواهد شد که تأثیر تلاطم ایجاد شده بر افزایش ضریب شدت اختلاط، نسبت به کاهش سرعت و افزایش عدد ریچاردسون و کاهش ضریب شدت اختلاط، بیشتر است (Daryaei et al., 2016). از طرفی از آن‌جایی‌که در اعداد فرود دنسیومتریک کوچک انرژی جریان برای حرکت جریان غلیظ کمتر می‌باشد، با مقایسه اعداد ریچاردسون و تغییرات ضریب

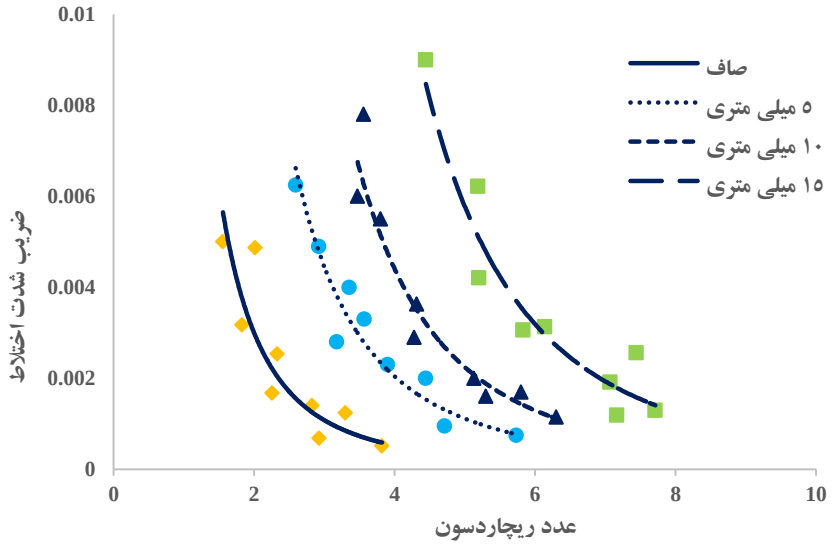
شدت اختلاط به ازای زبری‌های مختلف، مشاهده می‌شود که تأثیر زبری در اعداد ریچاردسون بالا مشهودتر است. به عنوان مثال محدوده‌ی تغییرات ضریب شدت اختلاط در بستر با زبری ۱۵ میلی‌متری نسبت به بستر صاف حدود ۰/۰۰۳۳۳ یا ۴۲٪ بیشتر می‌باشد. محدوده تغییرات ضریب شدت اختلاط (تفاضل بیشترین و کمترین مقدار ضریب شدت اختلاط) به ازای زبری‌های مختلف در جدول (۳) نشان داده شده است.

معادله‌های گسترش یافته برای ضریب شدت اختلاط

افزایش عمق جریان در مسیر حرکت به واسطه‌ی اختلاط سیال پیرامون اتفاق می‌افتد. با توجه با این‌که در جریان غلیظ شتاب ثقل کاهش می‌یابد، وجود زبری و افزایش دبی جریان غلیظ به نوعی عامل افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌شود. لذا منطقی است که ضریب شدت اختلاط علاوه بر عدد ریچاردسون، تابعی از زبری نسبی و دبی جریان غلیظ نیز باشد. برای استخراج رابطه ضریب شدت اختلاط، از ۸۰ درصد اطلاعات موجود (۲۸سری) به منظور توسعه مدل و از ۲۰ درصد آن‌ها به منظور تست مدل مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار (SPSS)، رابطه‌ای به صورت رابطه (۲۶) با $R^2 = 0.78$ برای ضریب شدت اختلاط حاصل شد.

$$E_w = \left[\frac{-0.009 + 0.036\frac{q_0}{Uh} + 0.046\frac{k_s}{h}}{R_i^{1.88}} \right] \qquad (۲۶)$$

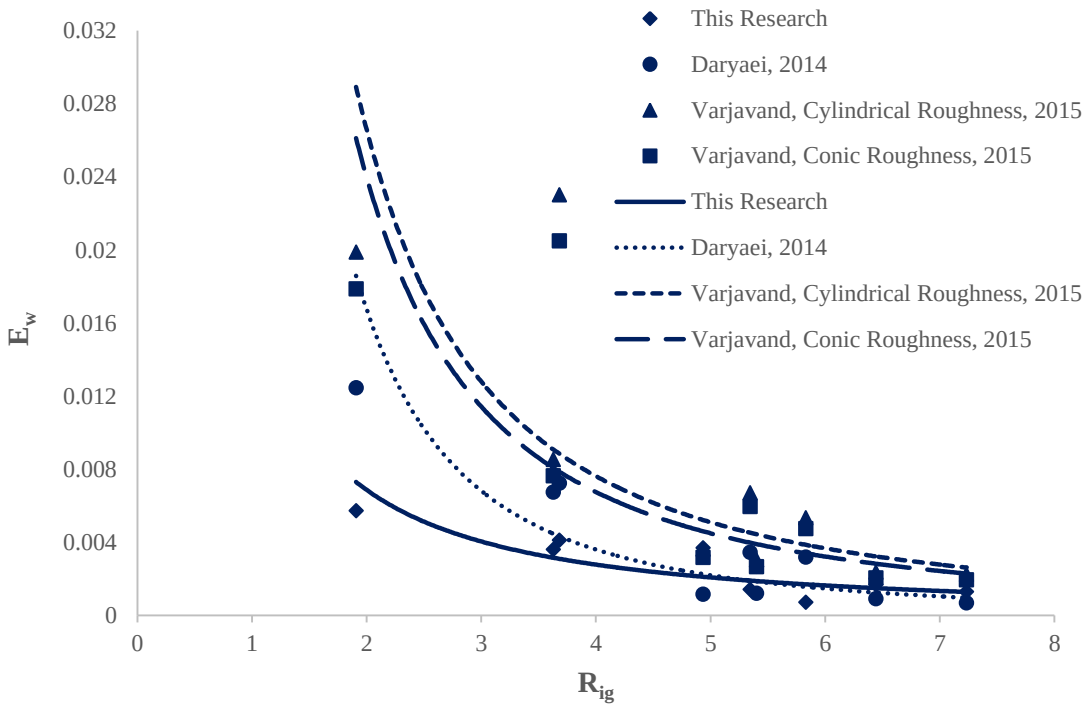
شکل (۸) مقادیر ضریب شدت اختلاط با میانگین‌گیری در تمامی بسترها را برای تحقیق حاضر در مقایسه با روابط ارائه شده محققین دیگر نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج محققین دیگر تطابق خوبی دارد و نتایج نزدیک به هم هستند.



شکل ۷- تغییرات ضریب شدت اختلاط سیال پیرامون در برابر عدد ریچاردسون به ازای زبری‌های متفاوت

جدول ۳- محدوده تغییرات ضریب شدت اختلاط در زبری‌های متفاوت

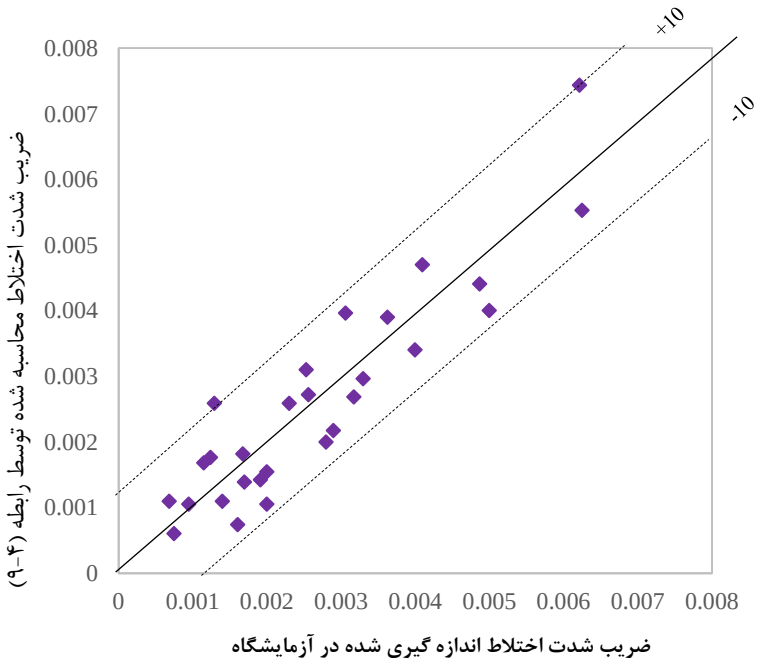
ارتفاع زبری (میلی‌متر)	میزان تغییرات ضریب شدت اختلاط
بستر صاف	۰/۰۰۴۴۸
۵	۰/۰۰۵۵
۱۰	۰/۰۰۶۶۵
۱۵	۰/۰۰۷۸۱



شکل ۸- تغییرات ضریب شدت اختلاط سیال پیرامون در برابر عدد ریچاردسون به ازای زبری‌های متفاوت

جدول ٤- نتایج حاصل از تحلیل و بررسی آماری رابطه (۲۷)

R^2	α	$\%E$	$RMSE$
۰/۷۸	۰/۹۱	۲۰/۵	۰/۰۰۰۷



شکل ۹- بررسی دقت رابطه (٤)-(۹) در بازه $\pm 10\%$

لازم به ذکر است این مدل در مورد جریان‌های غلیظ نمکی با رژیم زیر بحرانی و $1.6 < R_i < 7.7$ صادق می‌باشد. جهت ارزیابی دقت رابطه به دست آمده، از معیارهای آماری استفاده می‌گردد. جدول (۴) نتیجه بررسی میزان درصد خطای رابطه (۲۷) را نشان می‌دهد. در این جدول E%، درصد خطای نسبی، RMSE، جذر میانگین مجذور مربعات خطا و α شیب خط رگرسیون می باشند که به‌صورت روابط (۲۷) تا (۲۹) تعریف می‌شوند (Moradi et al, 2015).

$$\%E = \frac{\sum \left| E_{w(m)} - E_{w(p)} \right|}{\sum E_{w(m)}} * 100 \qquad (۲۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \left(E_{w(m)} - E_{w(p)} \right)^2}{n}} \qquad (۲۸)$$

$$\alpha = \frac{E_{w(m)}}{E_{w(p)}} \qquad (۲۹)$$

که در این روابط $E_{w(m)}, E_{w(p)}$ به ترتیب شدت اختلاط به‌دست آمده توسط روابط و شدت اختلاط اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و n تعداد داده های آماری می باشند.

با توجه به جدول (۴) به نظر می‌رسد رابطه‌ی (۲۷) با دقت نسبتاً قابل قبولی قادر به پیش‌بینی میزان ضریب شدت اختلاط می‌باشد. در شکل (۹) مقایسه دیگری بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر محاسبه شده توسط رابطه (۲۷) در محدوده $\pm 10\%$ صورت گرفته است. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که محدوده نسبتاً قابل قبولی از نتایج در بازه مورد نظر قرار گرفته است، به‌صورتی که ۷۹ درصد از داده‌ها در مرحله تست در بازه $\pm 10\%$ قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

پیشروی جریان غلیظ تحت تأثیر عوامل مهمی از جمله شدت اختلاط سیال پیرامون و اصطکاک بستر قرار دارد. این تحقیق به بررسی تأثیر همزمان زبری، شیب بستر و دبی جریان بر روی ضریب شدت اختلاط می‌پردازد. بدین منظور آزمایش‌ها با در نظر گرفتن چهار ارتفاع زبری، سه شیب و سه دبی صورت پذیرفت. از مهم‌ترین نتایجی که از این آزمایش‌ها حاصل شد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

– با افزایش شیب بستر، ضریب شدت اختلاط افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به طور میانگین به ازای افزایش شیب از صفر درصد به ۳/۴ درصد، میزان ضریب شدت اختلاط تقریبا ۳۶ درصد افزایش یافته است.

– با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد. به طور میانگین با افزایش دبی ورودی از ۰/۶ به ۱/۲ لیتر در ثانیه، در تمامی شیب‌ها و بسترها، ضریب شدت اختلاط حدودا ۵۱ درصد افزایش یافته است.

– افزایش ارتفاع زبری، باعث افزایش ضریب شدت اختلاط می‌شود. به عنوان مثال ضریب شدت اختلاط در بستر با زبری ۱۵ میلی‌متری نسبت به بستر صاف حدود ۰/۰۰۳۳۳ یا ۴۲٪ بیشتر می‌باشد.

– پس از انجام تحلیل ابعادی و با استفاده از رگرسیون غیرخطی توسط نرم‌افزار (SPSS) رابطه‌ای با همبستگی خوبی برای محاسبه ضریب شدت اختلاط استخراج گردید.

منابع

1- Bahrami, H. 2010. Investigation of hydraulic jump phenomenon in density current. Ph.D. Thesis. *Shahid Chamran University of Ahvaz.* (In Persian).

2- Daryaee, M., Kashefipour, S.M. and Ghomshi, M., 2016. Experimental Study of the Effect of Roughness on the Velocity and Concentration Profiles of Sedimentary Density Current Body, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, *4* (81), pp.19-28.

3- Ellison, T.H. and Turner, J.S., 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, *6*(3), pp.423-448.

4- Ghomeshi, M., 1995. Reservoir sedimentation modelling, Doctor of Philosophy thesis, Department of Civil and Mining Engineering, *University of Wollongong*, 1995.

5- Graf, W.H. and Altinakar, M.S., 1998. *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry* (No. 551.483 G7).

6- Graf, W.H., 1983. The hydraulics of reservoir sedimentation. *International Water Power and Dam Construction*, *35*(4).

7- Haghiabi, A.H., 2004. The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents. *Water Engineering. Ahvaz: Shahid Chamran University*, *270*.

8- KaramZadeh, N. 2005. Experimental Study of Water Entrainment of Density Currents. Master of Science Thesis. Faculty of Water Sciences Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, (In Persian).

9- Moradi A,. Ghomeshi, M,. Sarvarinezhad, S.B,. Golayj, H,. 2015. Experimental Study of Water Entrainment of Density Currents in Converging Sections. *Iran Water Research Journal*. *8*(15): 83-91, (In Persian).

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), pp.123-147.

11- Torabi, P.H., Fathi, M.M., Ghomeshi, M. and Shafaei, B.M., 2007. Head Velocity and Entrainment of Density Current in an Expansion Reach, *Iran-Water Resources Research*, *1*(7); pp.56-67. (In Persian).

12- Turner, J., 1983. S. 1973 Buoyancy effects in Fluids, Cambridge University Press.

13- Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y. and Yu, W., 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, *25*(1), pp.123-147.

14- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D. and Gorgij, A.D., 2015. Experimental Observation of Saline Underflows and Turbidity Currents, Flowing Over Rough Beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *42*(11), pp.834-844.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering **Vol. 41, No. 3, Fall 2018, p. 1-14**

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of Water Entrainment of Salty Density Current Over the Bed with Cubic Roughness

H. Davoodi Beni[1], S.M. Kashefipour[2*] and M. Ghomeshi[3]

1- M. Sc. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (*kashefipour@excite.com).*

3- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received:15 March 2016 Accepted: 21 September 2016

Keywords: Bed Roughness, Turbidity Current, Water Entrainment Coefficient, Dams Reservoirs.

Introduction

Each year rivers transport a lot of sediments, especially for flood times, to dams' reservoirs and the main cause for this transportation is density current phenomenon. This phenomenon forms when a liquid with a density of ($\rho_d = \rho_a + \Delta\rho$) flows in another liquid with density of (ρ_a). This density deference could be due to the temperature, or dissolve solids, or suspended solids deference or a combination of them (Graf and Altinakar, 1998). Vargavand (2013) made a density current using the solution of water and salt and investigated the effect of a bed with cylindrical and conical roughness on water entrainment coefficient. His results showed that the water entrainment coefficient not only affected by Richardson number but the height of bed roughness is also an important parameter. Daryaee (2014) investigated the water entrainment coefficients for four bed slopes, two sediment concentrations and four different bed roughness height in a sedimentary density current. The results of this research showed that by increasing roughness height velocity decreases and this increases Richardson number and a result water entrainment coefficient decreases. However, roughness blocks cause for more turbulent flow which extended up to interface of density current and ambient water and this phenomenon makes more water entrainment.

The aim of this research is to investigate the effect of bed roughness, bed slope, and hydraulic parameters of density current such as flow rate and concentration on water entrainment of a salty density current.

Methodology

Three flow rates of (0.6, 0.9 and 1.2 lit/s), three bed slopes of (0, 1.7 and 3.4%), four bed roughness heights of (0, 5, 10, and 15mm) were the main variables in this study. Experiments were conducted in a tilting flume with 800cm long, 35cm width and 70cm height with density current being provided using a solution of water and salt with a constant concentration of 20 gr/cm^3. The cubic blocks with dimensions of 1.5×1.5cm with desired height were used in bed as roughness elements and were distributed in zigzag pattern with an average of 25% surface coverage. Velocity profiles from body of density current were measured using DOP2000 and two siphon series were designed to be able to provide samples from the whole entire flow depth. Concentrations were measured using an EC meter, HACH model, and a calibrated mathematical equation which relates EC and concentration.

Dimensional analysis was carried out using the well-known π theorem and the following equation is proposed:

$$E_w = f(\frac{k_s}{h}, \frac{q_0}{Uh}, R_i) \quad (1)$$

Where, E_w refers to water entrainment coefficient; $\frac{k_s}{h}$ is relative roughness; k_s is the height of cubic blocks; h states for body depth of current; Uh is density current rate at the unit width for body of flow; U is the average velocity of density current body; $\frac{q_0}{Uh}$ refers to relative discharge; q_0 is the inlet discharge of density current; $R_i = \frac{g'hcos\theta}{U^2}$ is Richardson number; g' refers to reduced acceleration due to gravity ($=g\Delta\rho/\rho$); θ is the bed slope.

Results and Discussion

The effect of bed roughness on water entrainment is shown in Figure 1. The average water entrainment coefficients for different inlet flow rates and bed slopes were calculated and are illustrated against Richardson number for four bed roughness elements in Figure 1. As many researchers reported in the literature it is found that water entrainment coefficient has adverse relationship with Richardson number. This figure also shows that for the same Richardson number water entrainment coefficient increases with increasing bed roughness and this is due to more turbulence along the depth of flow and this causes for more water entrainment. However, the results showed that by increasing bed roughness the velocity of body decreases and as a result Richardson number increases and this means lower water entrainment. Increasing inlet flow rate and concentration of density current have direct effect on water entrainment coefficient. Because increasing both parameters make higher velocity and lower Richardson number and this phenomenon increases water entrainment.

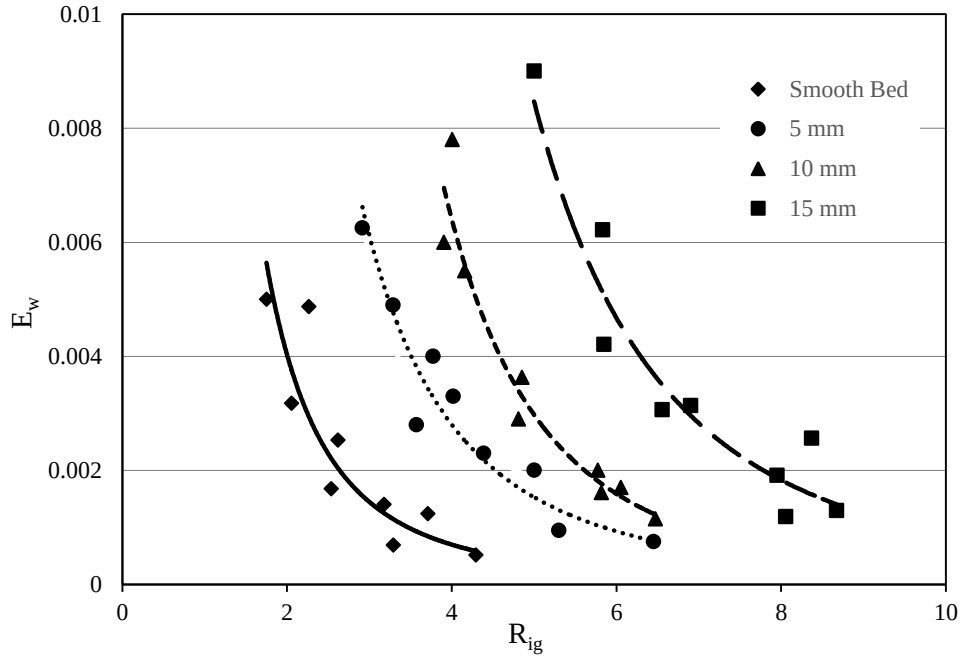


Fig 1- Water entrainment coefficient for different Richardson Number and bed roughness

An equation was developed using regression analysis and SPSS statistical model describing the relationship between water entrainment coefficient and the parameters considered. This equation may be written as:

$$E_w = \left[\frac{-0.009 + 0.036\frac{q_0}{Uh} + 0.046\frac{k_s}{h}}{R_i^{1.88}} \right] \quad (2)$$

Conclusions

Density current and its characteristics are always affected by hydraulic and geometric parameters. One of the main properties of density current is water entrainment which causes to decrease the concentration of density current when the current progresses in dam reservoir towards the body of dam. In this study a series of experiments were designed and conducted with the main variables affecting water entrainment coefficient being inlet density current discharge, bed slope and bed roughness. It was found that by increasing bed slope from 0% to 3.4% water entrainment coefficient increases in average of 36%. Also with increasing inlet density current discharge from 0.6 to 1.2lit/s the average of water entrainment coefficients for all bed slopes and bed roughness heights shows an increasing about 51%. For the same Richardson number increasing bed roughness height from 0 to 15mm shows an increase of about 42%.

References

1- DARYAEE, M., KASHEFIPOUR, S.M. and GHOMSHI, M., 2016. Experimental Study of the Effect of Roughness on the Velocity and Concentration Profiles of Sedimentary Density Current Body.

2- Graf, W.H. and Altinakar, M.S., 1998. *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry* (No. 551.483 G7).

3- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D. and Gorgij, A.D., 2015. Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *42*(11), pp.834-844.