

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

هادی داودی بنی^۱، سید محمود کاشفی پور^۲ و مهدی قمشی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز kashfipour@excite.com

۳- استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۵

چکیده

جریان غلیظ یکی از مهم ترین پدیده های مؤثر بر رسوب گذاری و کیفیت آب در مخازن سدها و منابع آب می باشد. با توجه به این که کمبود آب یکی از مهم ترین مشکلات پیش روی انسان هاست، لذا تحقیق بر روی پدیده هایی همچون جریان غلیظ که منابع آب را تحت تاثیر قرار می دهند، ضروری می باشد. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر شدت اختلاط جریان غلیظ نمکی بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها با سه دبی (۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ لیتر در ثانیه)، سه شیب بستر (۰، ۱/۷ و ۳/۴ درصد) و یک غلظت (۲۰ گرم در لیتر) در چهار بستر با ارتفاع زبری (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر) با آرایش زیگزآگی در فلومی به طول ۷/۸ متر و عرض ۳۵ سانتی متر با ارتفاع ۷۰ سانتی متر که در مجموع ۳۶ آزمایش می باشند، انجام گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش هر یک از پارامترهای شیب، دبی و ارتفاع زبری، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می یابد. در نهایت پس از انجام تحلیل ابعادی و بررسی هر یک از پارامترهای مؤثر، رابطه ای برای تخمین ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ پیشنهاد گردید.

کلید واژه ها: 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 رسوب گذاری در نقاط حساس داده نشود، عمر مفید سد به صورت چشم گیری افزایش می یابد. لذا شناخت این پدیده و تحقیق بر روی پارامترهای مؤثر بر آن می تواند 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 آن جایی 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 می گیرد که سیالی با چگالی $(\rho_a = \rho_a + \Delta\rho)$ درون سیالی با چگالی (ρ_a) جریان یابد. این اختلاف چگالی ممکن است ناشی اختلاف دما، اختلاف غلظت مواد محلول، اختلاف غلظت ذرات معلق و یا ترکیبی از آن ها باشد (Graf and Altinakar, 1998). اگر اختلاف در غلظت مواد معلق باعث اختلاف چگالی گردد، به این جریان، جریان کدر گفته می شود. 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 به صورت زیر بیان می شود.

$$g' = g \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \quad (1)$$

که در آن ρ_a چگالی سیال پیرامون، ρ_d چگالی جریان غلیظ و g شتاب ثقل زمین می باشد. از آنجائیکه عامل حرکت جریان های غلیظ، اعمال نیروی ثقل بر اختلاف چگالی دو سیال می باشد، لذا به این جریان ها جریان های ثقلی نیز گفته می شود.

هنگامی که سیال غلیظ وارد مخزن سیال پیرامون می شود، 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 لایه بندی 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 نمونه های بسیاری از جریان های غلیظ دیده می شود که فعالیت های انسان نیز بر انواع آن ها افزوده است. مواردی چون سرازیر شدن گدازه های ناشی از انفجار آتشفشان، سقوط بهمن ها، جبهه های هوای سرد و گرم، طوفان همراه با گرد و غبار، جریان های رسوبی در دریاها و مصب رودخانه ها همگی نمونه هایی طبیعی از این گونه جریان ها می باشند (Graf and Altinakar, 1998).

$$h = \frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_i} u dz\right)^2}{\int_0^{h_i} u^2 dz} \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_i} u^2 dz}{\int_0^{h_i} u dz} \quad (6)$$

که در این روابط، u سرعت نقطه ای جریان (به صورت تابعی از عمق است) و h 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) می باشد:

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

که در آن u و w سرعت های نقطه ای متوسط زمانی به ترتیب در امتداد محورهای x و z می باشند. پس از انتگرال گیری در عمق جریان غلیظ در محدوده ی بدنه جریان می توان نوشت (رابطه ۸):

$$\int_0^{h_i} \frac{\partial u}{\partial z} dz + \int_0^{h_i} \frac{\partial w}{\partial z} dz = \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_i} u dz - u_{h_i} \frac{\partial h_i}{\partial x} \right) + w_{h_i} - w_b \quad (8)$$

که در آن u_{h_i} و w_{h_i} به ترتیب مولفه های افقی و عمودی سرعت در مرز مشترک بین جریان غلیظ و سیال پیرامون و w_b سرعت عمودی در کف بستر می باشند.

طبق تعریف، سرعت افقی در فصل مشترک و سرعت عمودی در روی بستر مساوی صفر هستند و سرعت قائم در فصل مشترک به عنوان سرعت درون آمیختگی سیال پیرامون به داخل جریان غلیظ تعریف می شود. در نتیجه درون آمیختگی، سیال محیط که ابتدا در حال سکون بوده است، سرعت متوسط کوچکی عمود بر جریان اصلی پیدا می کند. بنابراین با توجه به مطالب فوق، معادله پیوستگی فاز سیال را می توان به صورت رابطه (۹) نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x}(UH) = -w_{h_i} \quad (9)$$

رابطه (۹)، معادله پیوستگی فاز سیال جریان غلیظ می باشد و فرض می شود که سرعت درون آمیختگی یا اختلاط، w_{h_i} ، متناسب با سرعت جریان غلیظ، U ، است رابطه (۱۰) (Turner, 1983).

$$-w_{h_i} = E_w U \quad (10)$$

حرکت جریان غلیظ درون سیال پیرامون، باعث اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون می گردد. شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن، که با E_w نشان داده می شود، 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 \bar{U} تعریف می شود (Turner, 1983). شکل (۱) شمایی از جریان غلیظ و اختلاط آن با سیال پیرامون را نشان می دهد.

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

$$E_w = f(Ri) \quad (2)$$

معادله های حاکم

از آنجائیکه عامل حرکت جریان های غلیظ نیروی ثقل می باشد، همانند جریان در کانال های باز از عدد فرود برای تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می گردد، با این تفاوت که شتاب ثقل به دلیل اختلاف چگالی کاهش یافته است، که آن را عدد فرود ذره رسوبی (Densimetric Froude Number) می نامند و از رابطه (۳) حاصل می شود.

$$Fr_d = \frac{\bar{U}}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (3)$$

که در آن Fr_d عدد فرود ذره رسوبی، \bar{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 جریان های غلیظ به کار می رود عدد ریچاردسون می باشد که به صورت رابطه (۴) تعریف می شود.

$$\frac{1}{Fr_d^2} = \frac{g'h \cos \theta}{\bar{U}^2} = Ri \quad (4)$$

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

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:

$$E_w = \frac{0.075}{(1 + 718Ri^{2.4})^{0.5}} \quad (13)$$

Ghomeshi (1995) با انجام آزمایش‌هایی بر روی جریان غلیظ نمکی و رسوبی و بر روی شیب کف ثابت و برابر ۰/۰۶۳۵ رابطه (۱۴) را برای ضریب شدت اختلاط ارائه نمود:

$$E_w = \frac{0.0024}{R_i^{1.06}} \quad (14)$$

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.

$$E_w = 0.023R_i^{-1.0743} \quad (15)$$

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:

$$E_w = \frac{0.001}{R_i^{1.035}} \quad (16)$$

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 رابطه (۱۱) به صورت تفاضل محدود با داشتن اطلاعات سرعت و عمق در دو مقطع از جریان غلیظ محاسبه نمود:

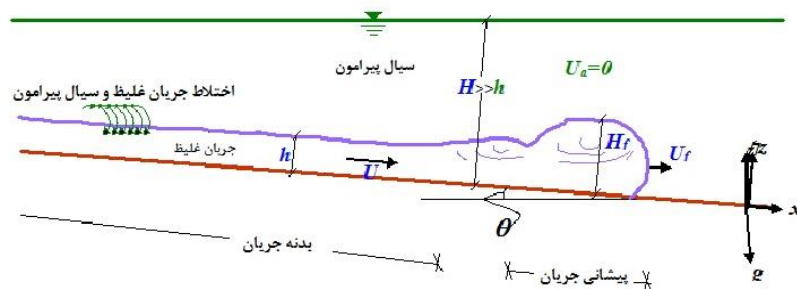
$$E_w = \left[\frac{2}{U_{i+1} + U_i} \right] \left[\frac{(Uh)_{i+1} - (Uh)_i}{x_{i+1} - x_i} \right] \quad (11)$$

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 دریافته‌اند که ضریب شدت اختلاط، E_w تابعی از عدد ریچاردسون می‌باشد. Ellison و Turner (1959) با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که با افزایش عدد ریچاردسون، ضریب شدت اختلاط به شدت کاهش می‌یابد. رابطه ارائه شده توسط این دو محقق به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد:

$$E_w = \frac{0.08 - 0.1Ri}{1 + 5Ri} \quad Ri < 4 \quad (12)$$



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

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 تأثیر 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 و نمک 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).

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.

$$E_w = \frac{0.0058}{Ri^{0.6795}} \quad (17)$$

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.

$$E_w = 0.0003 Ri^{-0.538} (H/h)^{2.24} \quad H/h < 7 \quad (18)$$

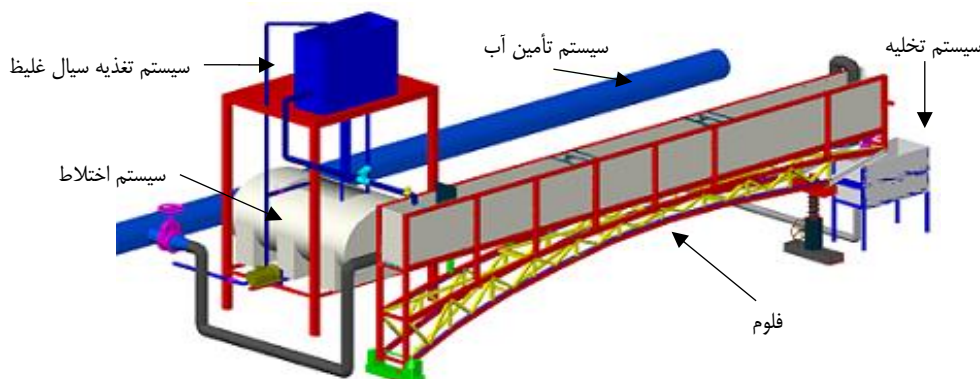
$$E_w = 0.0099 Ri^{-0.83} \quad H/h > 7 \quad (19)$$

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:

$$E_w = \frac{0.0026}{R_i^{1.130}} \quad \text{بستر صاف} \quad (20)$$

$$E_w = \frac{0.0228}{R_i^{1.329} \left(\frac{r}{h}\right)^{-0.749}} \quad \text{بسترزبراستوانه ای} \quad (21)$$

$$E_w = \frac{0.0204}{R_i^{1.343} \left(\frac{r}{h}\right)^{-0.721}} \quad \text{بستر زبر مخروطی} \quad (22)$$



شکل ۲- تصویر شماتیک فلوم و تجهیزات آن

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:

$$f(U, k_s, h, q_0, \rho_d, \rho_a, g, S, W_h) \quad (23)$$

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:

$$f\left(\frac{k_s}{h}, \frac{q_0}{Uh}, R_i, E_w\right) = 0 \quad (24)$$

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

$$E_w = f\left(\frac{k_s}{h}, \frac{q_0}{Uh}, R_i\right) \quad (25)$$

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 دهنده 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

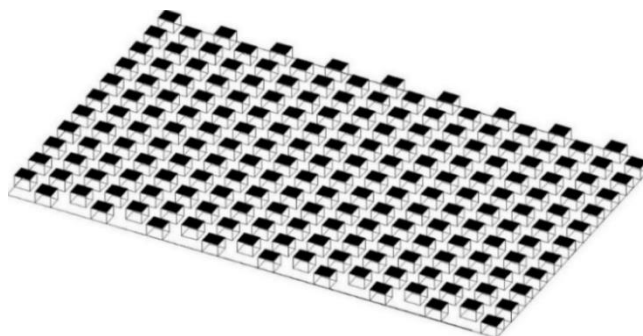
در فاصله‌ی ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای فلوم یک دریچه کشویی قرار دارد که قابلیت بازشدگی حداکثر ده سانتی‌متر را داراست. این دریچه عمل جدا نمودن محیط سیال پیرامون و سیال غلیظ و همچنین کنترل ورود سیال غلیظ به درون سیال پیرامون را بر عهده دارد. این فلوم قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۳/۸ درصد را داراست که به وسیله 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 پلکسی گلاس 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 می‌سازند. شکل (۳) تصویر شماتیکی از چینش زبری‌ها به شکل زیگ‌زاگ و ورقه‌های دارای 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 ظرفی 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 پایین دست دریچه کشویی (محیط سیال پیرامون) به آرامی و بدون تلاطم تغذیه می‌شود. سپس با بالا آمدن سطح سیال پیرامون، شیرفلکه متصل به دبی‌سنج 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 آنجایی که سیال غلیظ می‌بایست به یک‌باره وارد سیال پیرامون گردد، لذا بروی 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 می‌گردد. 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

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 حدوداً 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.

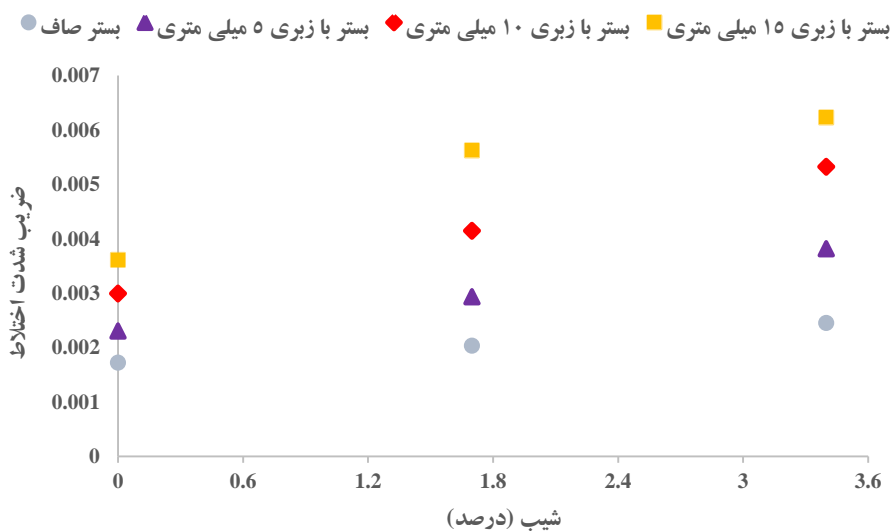
شیب از صفر درصد به ۳/۴ درصد، میزان ضریب شدت اختلاط تقریباً به میزان ۳۸ درصد افزایش یافته است. در جدول (۱) میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش شیب در تمامی بسترها برآورد شده است. شکل (۶) نشان دهنده اثر دبی ورودی جریان غلیظ بر شدت اختلاط می‌باشد. نقاط به دست آمده در این شکل با میانگین‌گیری از سه شیب در دبی مربوطه در بسترهای متفاوت حاصل شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده



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



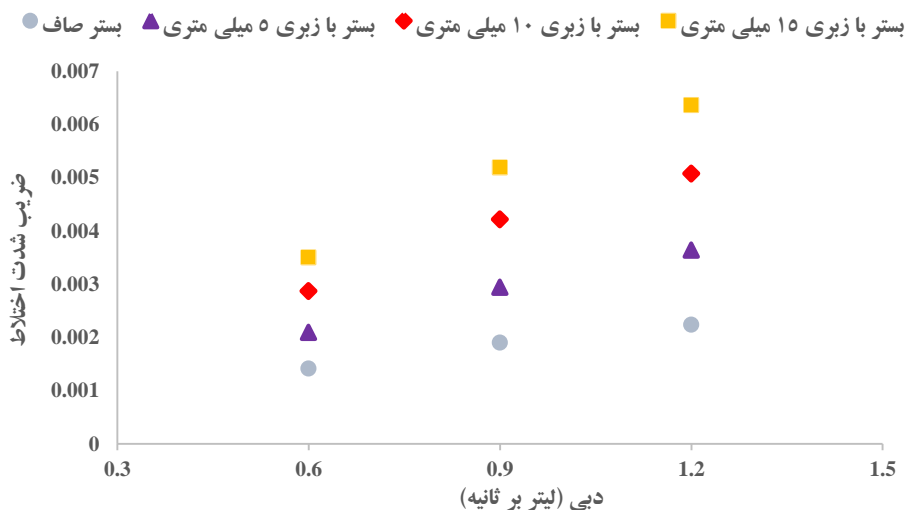
شکل ۴- نمایی از دستگاه سرعت‌سنج DOP2000 و پراب‌های دریافت کننده و صاع کننده



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 ۳/۴ درصد

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



شکل ۶- تغییرات ضریب شدت اختلاط در برابر دبی ورودی جریان غلیظ

جدول ۲- میزان افزایش ضریب شدت اختلاط به ازای افزایش دبی از ۰/۶ لیتر در ثانیه به ۱/۲ لیتر در ثانیه

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

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 آنجایی که در اعداد فرود دنسومتریکی کوچک انرژی جریان برای حرکت جریان غلیظ کمتر می‌باشد، با مقایسه اعداد ریچاردسون و تغییرات ضریب

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

شدت اختلاط، از ۸۰ درصد اطلاعات موجود (۲۸ سری) 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.

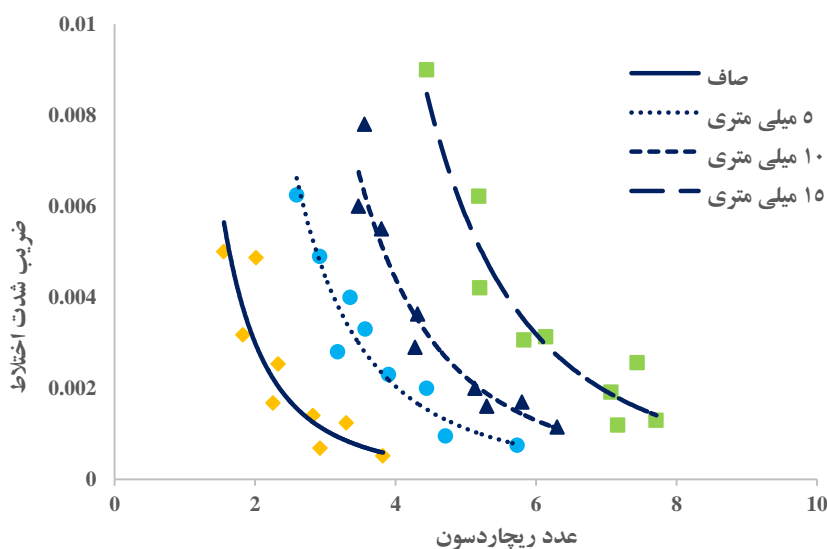
$$E_w = \left[\frac{-0.009 + 0.036 \frac{q_0}{Uh} + 0.046 \frac{k_s}{h}}{R_i^{1.88}} \right] \quad (26)$$

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.

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 0.0333 یا 42% 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

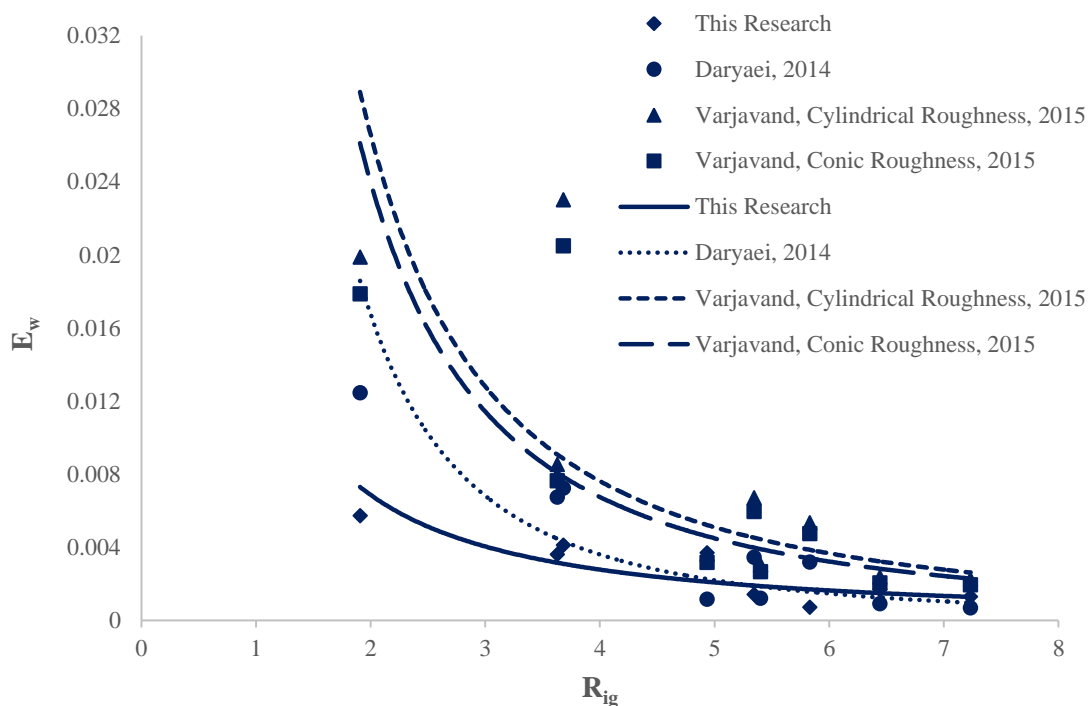
افزایش عمق جریان در مسیر حرکت به واسطه‌ی اختلاط سیال پیرامون اتفاق می‌افتد. با توجه با این که در جریان غلیظ شتاب ثقل کاهش می‌یابد، وجود زبری و افزایش دبی جریان غلیظ به نوعی عامل افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌شود. لذا منطقی است که ضریب شدت اختلاط علاوه بر عدد ریچاردسون، تابعی از زبری نسبی و دبی جریان غلیظ نیز باشد. برای استخراج رابطه ضریب



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

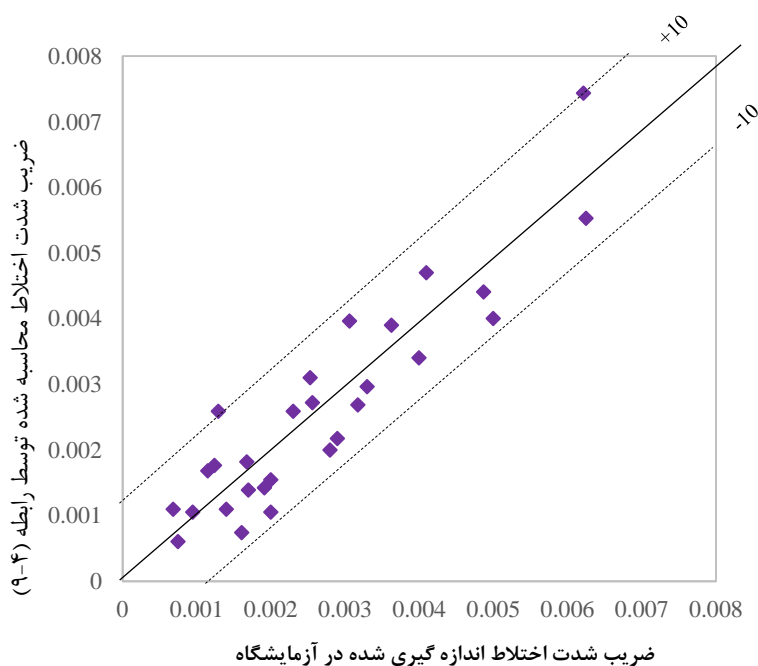
میزان تغییرات ضریب شدت اختلاط	ارتفاع زبری (میلی‌متر)
0.00448	بستر صاف
0.0055	۵
0.00665	۱۰
0.00781	۱۵



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

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل و بررسی آماری رابطه (۲۲)

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



شکل ۹- بررسی دقت رابطه (۴)-(۹) در بازه $\pm 10\%$

قرار گرفته است، به صورتی 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 $3/4$ درصد، میزان ضریب شدت اختلاط تقریباً 36 درصد افزایش یافته است.

- با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، ضریب شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد. به طور میانگین با افزایش دبی ورودی از $0/6$ به $1/2$ لیتر در ثانیه، در تمامی شیب‌ها و بسترها، ضریب شدت اختلاط حدوداً 51 درصد افزایش یافته است.

- افزایش ارتفاع زبری، باعث افزایش ضریب شدت اختلاط می‌شود. به عنوان مثال ضریب شدت اختلاط در بستر با زبری 15 میلی‌متری نسبت به بستر صاف حدود $0/00333$ یا $0/42\%$ 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.

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 می‌باشند که به صورت روابط (۲۷) تا (۲۹) تعریف می‌شوند (Moradi et al, 2015).

$$\% E = \frac{\sum |E_{w(m)} - E_{w(p)}|}{\sum E_{w(m)}} * 100 \quad (27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (E_{w(m)} - E_{w(p)})^2}{n}} \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{E_{w(m)}}{E_{w(p)}} \quad (29)$$

که در این روابط $E_{w(m)}$ ، $E_{w(p)}$ به ترتیب شدت اختلاط به دست آمده توسط روابط و شدت اختلاط اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و n تعداد داده‌های آماری می‌باشند.

با توجه به جدول (۴) به نظر می‌رسد رابطه (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

منابع

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