

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری‌های مصنوعی بر مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ نمکی

پیمان ورجاوند<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>۳</sup> و داود فرسادی‌زاده<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تبریز [pvarjavand@yahoo.com](mailto:pvarjavand@yahoo.com)

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

۴- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۷

## چکیده

جریان‌های غلیظ معمولاً مهمترین فرآیند در انتقال رسوب و رسوبگذاری مخازن نازک و مرتفع می‌باشند. در تحقیق حاضر ۶۳ آزمایش به منظور بررسی آزمایشگاهی جریان غلیظ نمکی بر روی بستر زبر مصنوعی انجام شده است. دو شکل زبری استوانه‌ای و مخروطی با سه ارتفاع مورد بررسی قرار گرفتند. پروفیل‌های قائم سرعت در چهار مقطع و پروفیل‌های قائم غلظت در سه مقطع برداشت شدند. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع زبری مقدار سرعت کاهش یافته و ضخامت بدنه جریان غلیظ افزایش می‌یابد و همچنین مقدار ضریب اختلاط برای یک گرادیان ریچاردسون ثابت زیاد می‌گردد. در برخی از آزمایش‌ها یک پدیده خاص مشاهده گردید که پروفیل‌های سرعت را تحت تأثیر قرار داد. این پدیده "برخاستگی" نامگذاری گردید. برخاستگی در زبری‌های استوانه‌ای و مخروطی زمانی مشاهده گردید که در آنها عامل انسداد به ترتیب بیشتر از ۱۰ و ۱۴ درصد باشد.

**کلیدواژه‌ها:** پدیده برخاستگی، پروفیل غلظت، جریان غلیظ نمکی، زبری مصنوعی، ضریب اختلاط، عدد ریچاردسون.

## Experimental Study on the Effects of Artificial Bed Roughness on Hydraulic Parameters of Saline Density Currents

Peyman Varjavand<sup>1</sup>, Mehdi ghomeshi<sup>2</sup>, Ali Hosseinzadeh Dalir<sup>3</sup> and Davood Farsadizadeh<sup>4</sup>

- 1- PhD Candidate, Department of Water Engineering, Tabriz University
- 2- Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
- 3- Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz
- 4- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz

Received: 6 Feb. 2013

Accepted: 22 Oct. 2013

## Abstract

Turbidity currents are often the main process for the transport and deposition of the sediments in narrow, alpine reservoirs. In this research, 63 experiments were performed to investigate artificial bed roughness effects on the saline density currents. Conic and Cylindrical shapes roughness with three heights were used. Velocity and concentration profiles were measured in 4 and 3 cross-sections, respectively. The results show that as the roughness height increases the velocity decreased and the density current body thickness also increased. Furthermore for a constant Gradient Richardson number by increasing roughness height, the coefficient of entrainment was also increased. In the some experiments a special behavior was seen which effects on the velocity profiles. This behavior was named "Lifting phenomenon". This phenomenon was observed when blockage element is more than 10% and 14% for Cylindrical and Conic shapes, respectively.

**Keywords:** Lifting phenomenon, Concentration profile, Saline density current, Artificial roughness, Entrainment coefficient, Gradient Richardson number.

## مقدمه

جریان غلیظ در طبیعت و یا در سازه های دست بشرساز زمانی دیده می شود که دو سیال با چگالی های مختلف نسبت به یکدیگر حرکت نمایند. به طوری که اگر یک سیال غلیظ با چگالی بیشتر وارد یک مخزن که حاوی سیالی با چگالی کمتر است شود، جریان غلیظ به صورت زیر سطحی شکل می گیرد (سیمپسون، ۱۹۸۲). جریان غلیظ در علوم هواشناسی و اقیانوس شناسی بسیار پر اهمیت بوده و همچنین یک پدیده مهم در علم ژئوفیزیک می باشد (سیمپسون، ۱۹۹۷). رسوبگذاری مخازن یکی از مشکلات مهم در مدیریت منابع آب می باشد. استفاده پایدار از مخازن در امر مدیریت منابع آب مستلزم کنترل رسوبگذاری مخزن و حتی تخلیه رسوب مخزن می باشد (اوهی و همکاران، ۲۰۱۰). در حال حاضر متوسط سالانه کاهش حجم مفید مخازن در جهان به دلیل رسوبگذاری، بیشتر از تولید سالانه مخازن می باشد. در مخازن باریک با شیب بستر زیاد، جریان غلیظ معمولاً عامل انتقال و ته نشینی رسوبات است (اوهی، ۲۰۰۲). کرم زاده (۱۳۸۳) در یک فلوم آزمایشگاهی برای ۱۵ شیب بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۳ و دو غلظت ۳۰ و ۴۰ گرم در لیتر به بررسی تأثیر شیب و غلظت بر ضریب اختلاط جریان غلیظ نمکی پرداخت. نتایج وی نشان داد که با افزایش غلظت و شیب، سرعت بدنه جریان افزایش و عمق جریان کاهش می یابد همچنین رابطه زیر را برای ضریب اختلاط ارائه نمود:

$$E_w = \frac{0.001}{R_i^{1.035}} \quad (1)$$

که در آن  $E_w$ : ضریب اختلاط و  $R_i$ : عدد ریچاردسون می باشد. قمشی (۱۹۹۵) با انجام آزمایش های بر روی جریان غلیظ نمکی و رسوبی و بر روی شیب کف ثابت و برابر ۰/۰۶۳۵ رابطه زیر را برای ضریب اختلاط ارائه نمود:

$$E_w = \frac{0.0024}{R_i^{1.060}} \quad (2)$$

آلتینکار و همکاران (۱۹۹۶) جریان غلیظ رسوبی را با دو نوع رسوب به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها پروفیل های سرعت و غلظت را در سه مقطع مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توزیع بدون بعد سرعت نسبتاً به تغییرات غلظت غیرحساس می باشد. آنها معادله زیر را برای بخش دیواره پروفیل سرعت ارائه دادند:

$$\frac{u(z)}{u_m} = \left( \frac{z}{h_m} \right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \quad (3)$$

که در آن  $u$ : سرعت متوسط زمانی در فاصله  $z$ : از بستر،  $u_m$ : سرعت حداکثر،  $h_m$ : فاصله سرعت حداکثر از کف و  $\alpha_v$ : ضریب معادله می باشد. نلر و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی جریان غلیظ به صورت آزمایشگاهی پرداختند. جریان غلیظ در آزمایش ها آنها به صورت زیر بحرانی از طریق رهاشدن ناگهانی<sup>۱</sup> سیال غلیظ در سیال پیرامون ایجاد شده است. آنها به این نتیجه رسیدند که نسبت فاصله بین کف و سرعت حداکثر به ضخامت جریان حدود ۰/۲ می باشد. آنها بدنه جریان غلیظ را با توجه به شکل پروفیل سرعت به دو محدوده دیواره<sup>۲</sup> و اختلاط<sup>۳</sup> تقسیم نمودند که معادله بخش دیواره همان معادله (۳) می باشد و معادله بخش اختلاط آن به قرار زیر ارائه دادند:

$$\frac{u(z)}{u_m} = \exp \left[ -\beta_v \left( \frac{z - h_m}{h_i - h_m} \right)^{\gamma_v} \right] \quad (4)$$

که در آن  $h_i$ : ضخامت بدنه جریان با استفاده از رابطه تیلور (رابطه ۷)،  $\beta_v$  و  $\gamma_v$ : ضرایب معادله و  $u_m$ ،  $h_m$ ،  $z$  همان مفهوم در رابطه (۳) را دارند. سکیورس و همکاران (۲۰۱۰) نتایج ۷۴ آزمایش جریان غلیظ را بر روی بستر متحرک ارائه دادند. آنها در آزمایش ها خود از جریان غلیظ رسوبی، نمکی و ترکیب آنها بر روی بسترهای متحرک با چند نوع دانه بندی استفاده نمودند. آزمایش ها برای جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی انجام شده و با توجه به شرایط آزمایش ها تشکیل و یا عدم تشکیل فرم بستر مورد مطالعه قرار گرفت. برای بستر صاف، محل وقوع حداکثر سرعت در پروفیل سرعت جریان فوق بحرانی بالاتر از جریان زیر بحرانی بوده و پروفیل سرعت این جریان شیب بیشتری در بالای محل سرعت حداکثر نسبت به جریان زیر بحرانی دارد. پروفیل غلظت در جریان زیر بحرانی در نزدیکی بستر دارای تغییرات کمتر نسبت به جریان فوق بحرانی می باشد. نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) ساختار جریان غلیظ رها شده بر روی بستر شیب دار را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که اگر جریان غلیظ در یک کانال حرکت کند ممکن است که به دلیل پرش هیدرولیکی ضخامت آن افزایش یابد. این پدیده در حالت های خاص جریان ورودی اتفاق می افتد و بر روی ساختار جریان که شامل سرعت، ارتفاع جریان و تنش برشی بستر می باشد، تأثیر محسوس می گذارد. جریان ورودی با اعداد فرود چگال<sup>۴</sup> مختلف بر مبنای غلظت های ورودی مختلف، رفتار واضح تری نسبت به جریان ورودی با اعداد فرود مختلف بر مبنای ارتفاع های ورودی مختلف را

1- Sudden-Exchange

2- Wall region

3- Entrainment region

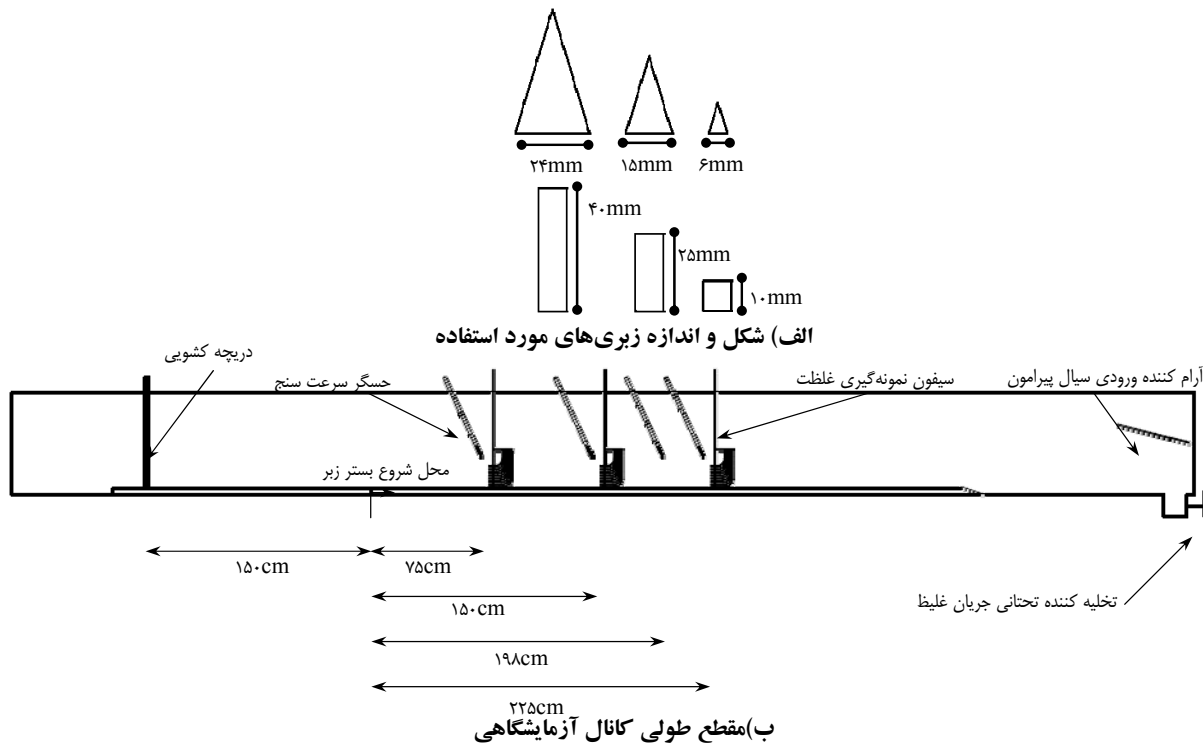
4- Densimetric Froude number

سیفون با لوله‌هایی به قطر ۴ و به فاصله ۱۵ میلی متر در جهت قائم در سه مقطع به فواصل ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ سانتی متر از ابتدای بستر زبر انجام شد. بازشدگی دریاچه ابتدای فلوم با توجه به شرایط آزمایشگاه به منظور دسترسی هرچه بهتر به جریان یکنواخت ۵۰ میلی متر و فاصله شروع بستر زبر از دریاچه ۱۵۰ سانتی متر شود. به منظور ایجاد جریان غلیظ نمکی، از نمک پودری با چگالی ۱۸۲۵/۳۶ گرم درلیتر استفاده گردید. به منظور حصول اطمینان از عدم تأثیر دما در نتایج، دمای سیال غلیظ کنترل شده به طوری که حداکثر اختلاف دمای آن با سیال پیرامون  $\pm 0.5$  درجه سانتیگراد بوده است. زبری‌ها دارای دو شکل استوانه‌ای و مخروطی با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر می باشد. فاصله طولی زبری‌ها ۷۵ میلی متر و فاصله عرضی آنها ۳۰ میلی متر در نظر گرفته شد. طول بستر زبر ۴ متر و آرایش زبری‌ها ثابت و به صورت زیگزاگ می باشد. شکل (۱) زبری‌های مورد استفاده و مقطع طولی کانال آزمایشگاهی در تحقیق حاضر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر به قرار شکل (۲) می باشند:

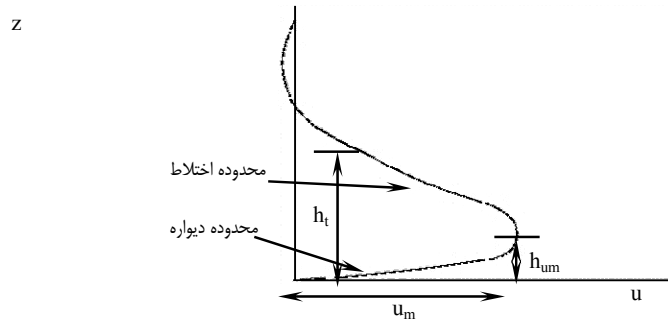
دارا می باشد. طبق بررسی‌های انجام شده، تاکنون رفتار جریان غلیظ نمکی بر روی بسترهای زبر مصنوعی مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا هدف در تحقیق حاضر بررسی جریان غلیظ نمکی بر روی بسترهای زبر با دو شکل و سه ارتفاع زبری می باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده‌اند. فلوم مورد استفاده با عرض ۳۵ و عمق ۷۰ سانتی متر به طول ۸ متر بوده به طوری که این فلوم امکان ایجاد جریان غلیظ به صورت رهاشدن ناگهانی را دارا می باشد. اندازه گیری پروفیل سرعت با استفاده از دستگاه *DOP2000* انجام شده است، این دستگاه با استفاده از تغییر فاز در موج فراصوت پروفیل سرعت را برداشت می‌کند. اندازه‌گیری پروفیل سرعت در چهار مقطع به فواصل ۷۵، ۱۵۰، ۱۹۸ و ۲۲۵ سانتی متر از ابتدای بستر زبر انجام گردید. دبی جریان غلیظ با استفاده از یک دبی سنج الکترومغناطیس با دقت  $\pm 0.05$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نمونه برداری پروفیل غلظت از بدنه جریان غلیظ به وسیله یک



شکل ۱- زبری‌های مورد استفاده



شکل ۲- پارامترهای پروفیل سرعت در جریان غلیظ



ب) زبری استوانه‌ای به ارتفاع ۴۰ میلی متر



الف) زبری مخروطی به ارتفاع ۲۵ میلی متر

شکل ۳- زبری های مورد استفاده در این تحقیق

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\delta \rho / \delta z}{(\delta u / \delta z)^2} \quad (۸)$$

$$E_w = \frac{1}{U} \frac{\delta U h}{\delta x} \quad (۹)$$

$$g' = g \frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \quad (۱۰)$$

که در روابط فوق،  $\bar{U}$ : سرعت متوسط عمقی،  $\bar{C}$ : غلظت متوسط عمقی،  $R_i$ : عدد ریچاردسون،  $\rho$ : چگالی سیال غلیظ،  $g$ : شتاب ثقل،  $E_w$ : ضریب اختلاط،  $g'$ : نیروی ثقل کاهش یافته،  $\bar{\rho}$ : چگالی متوسط مقطع و  $\rho_a$ : چگالی سیال پیرامون می باشد. به منظور محاسبه لزجت دینامیک سیال غلیظ برای استخراج عدد رینولدز جریان از رابطه زیر استفاده شده است (روسکوئی، ۱۹۵۲):

$$\mu = \mu_w (1 - 1.35 C_{S_w})^{-2.5} \quad (۱۱)$$

که در آن  $\mu$ : لزجت دینامیک سیال غلیظ،  $\mu_w$ : لزجت دینامیک سیال پیرامون و  $C_{S_w}$ : غلظت وزنی سیال غلیظ می باشد.

پارامترهای فوق عبارتند از  $u$ : سرعت متوسط زمانی در فاصله  $z$  از کف،  $u_m$ : سرعت حداکثر و  $h_{um}$ : فاصله آن تا کف و  $h_t$ : ضخامت بدنه جریان یا استفاده از رابطه ترنر (رابطه ۷). روابط زیر به ترتیب برای محاسبه سرعت متوسط، غلظت متوسط، ضخامت جریان به روش ترنر، عدد ریچاردسون، ضریب اختلاط<sup>۲</sup> و نیروی ثقل کاهش یافته استفاده شده اند (ترنر، ۱۹۷۳):

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} \quad (۵)$$

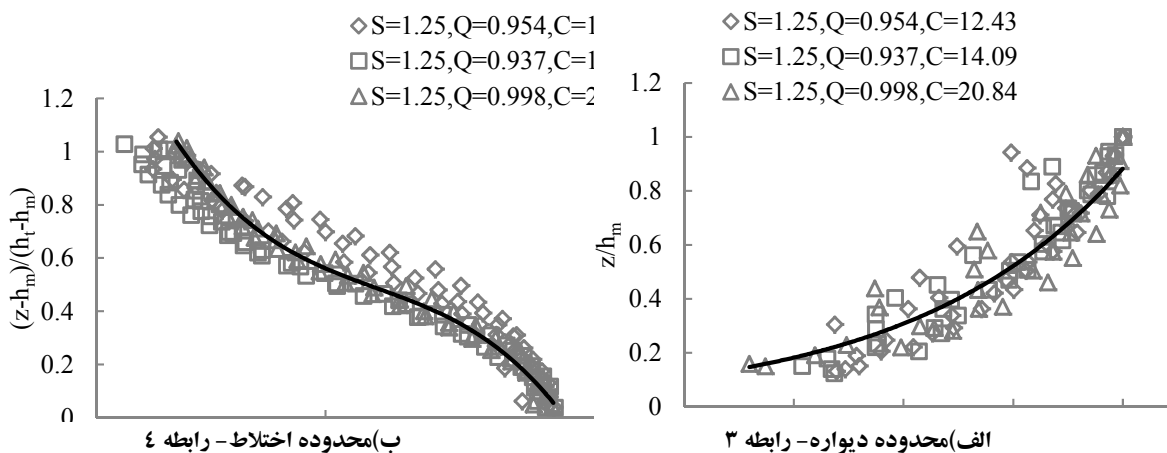
$$\bar{C} = \frac{\int_0^\infty c u dz}{\int_0^\infty u dz} \quad (۶)$$

$$h_t = \frac{\left( \int_0^\infty u dz \right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} \quad (۷)$$

1- Richardson gradient number  
2- Entrainment Coefficient

جدول ۱- خلاصه مشخصات آزمایش‌های انجام شده

تعداد آزمایش	ارتفاع زبری (میلی متر)	شکل زبری	عدد رینولدز $\times 10^3$	عدد فرود چگال	شیب (%)	غلظت پشت دریاچه (گرم در لیتر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	سری آزمایش
۹	-----	-----	۲/۲-۵/۲	۰/۶۴-۱/۹۴	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۰/۶۷-۲۰/۸۴	-۱/۰۰۲	۱
۹	۱۰	مخروطی	۲/۹-۵/۳	۰/۵۵-۱/۲۶	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۰/۲۶-۲۱/۸۰	-۱/۱۰۸	۲
۹	۲۵	مخروطی	۳/۳-۴/۸	۰/۵۹-۰/۹۹	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۰/۴۱-۲۰/۶۸	-۱/۰۱۰	۳
۹	۴۰	مخروطی	۳/۳-۵/۲	۰/۴۲-۰/۸۰	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۰/۷۲-۲۰/۴۱	-۱/۰۳۷	۴
۹	۱۰	استوانه‌ای	۳/۱-۵/۶	۰/۵۲-۱/۳۴	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۰/۰۴-۲۰/۵۱	-۱/۰۱۲	۵
۹	۲۵	استوانه‌ای	۳/۲-۵/۲	۰/۴۶-۱/۰۴	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۱/۰۹-۲۱/۴۲	-۱/۰۶۶	۶
۹	۴۰	استوانه‌ای	۳/۶-۴/۵	۰/۴۰-۰/۸۴	-۱/۲۵-۲/۰۰	۱۱/۲۵-۲۰/۸۴	-۱/۰۴۶	۷



شکل ۴- سرعت بدون بعد برای بستر صاف

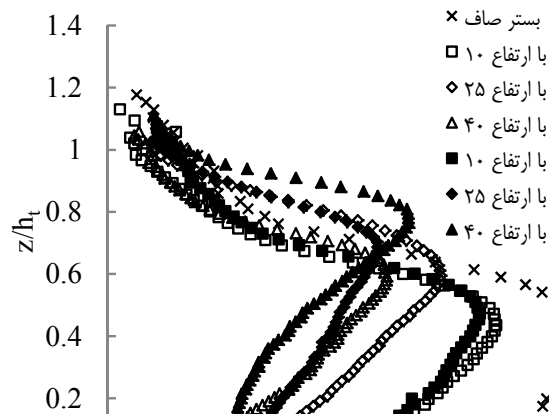
مشاهده می‌گردد که ضرایب روابط (۳) و (۴) برای بستر صاف در تحقیق حاضر نزدیک به تحقیقات دیگر هستند و اختلاف مشاهده شده بیشتر ناشی از نوع جریان غلیظ است که در تحقیق حاضر به صورت نمکی بوده ولی در تحقیقات دیگر رسوبی می باشد. با افزایش ارتفاع زبری، ضخامت جریان زیاد شده و فاصله سرعت حداکثر از کف بیشتر می‌گردد که ضرایب نیز این روند را تایید می‌کنند. تغییرات ضریب  $\alpha_1$  در بستر زبر نسبت به بستر صاف که مربوط به ناحیه دیوار پروفیل سرعت است بیشتر از ضرایب دیگر می باشد و در عین حال با افزایش ارتفاع زبری محل سرعت حداکثر در پروفیل سرعت از کف فاصله گرفته به سیال پیرامون نزدیک می‌گردد. شکل (۵) مقادیر بدون بعد سرعت را برای دو شکل زبری استوانه‌ای و مخروطی در مقطع به فاصله ۱۵۰ سانتی متر را نشان می‌دهد. مقادیر سرعت در این شکل با استفاده از سرعت زبر دریاچه ورودی ( $U_g$ ) بدون بعد شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌گردد تأثیر زبری استوانه‌ای نسبت به مخروطی در شرایطی که پدیده بر خاستگی اتفاق افتاده است (ارتفاع زبری ۲۵ و ۴۰ میلی متر) در ارتفاع‌های یکسان بیشتر است می‌گردد به طوری

در تحقیق حاضر در کل هفت سری آزمایش به تعداد ۶۳ آزمایش برای سه شیب، سه غلظت و بسترهای زبر استوانه‌ای و مخروطی و بستر صاف انجام گردید که جدول (۱) خلاصه مشخصات آزمایش‌های انجام شده را بیان می‌دارد. شکل (۳) نشان‌دهنده زبری‌های مخروطی ۲۵ میلی متر و استوانه‌ای ۴۰ میلی متر می‌باشند.

### نتایج و بحث

#### پروفیل سرعت

همان طور که ذکر شد، معادله های (۳) و (۴) برای بخش‌های دیواره و اختلاط پروفیل سرعت ارائه شده‌اند. شکل (۴) مقادیر سرعت بدون بعد را با توجه به این معادله ها برای آزمایش‌های با بستر صاف و شیب ۱/۲۵ درصد نشان می‌دهد (C بیانگر غلظت پشت دریاچه می باشد). جدول (۲) مقادیر ضرایب روابط (۳) و (۴) را برای تحقیق حاضر و محققین دیگر بیان می‌دارد. با توجه به جدول مذکور



شکل ۵- سرعت بدون بعد برای بستر صاف (نقاط توپر مربوط به زبری استوانه‌ای شکل)

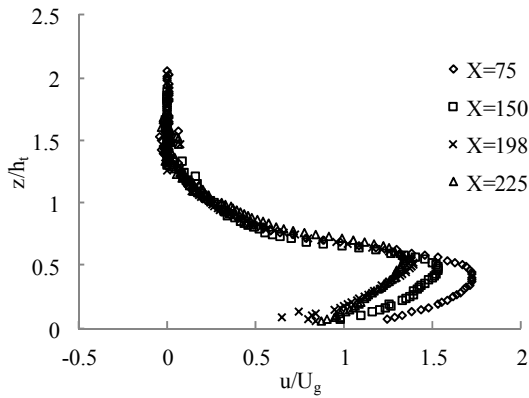
جدول ۲- مقادیر ضرایب روابط ۳ و ۴

$\gamma_v$	$\beta_v$	$\alpha_v$	نوع بستر	
۲/۰۰	۱/۴۰	۶/۰۰	بستر صاف	آلتینکار و همکاران (۱۹۹۶)
۲/۷۰	۰/۶۰	۵/۸۰	بستر صاف	نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱)
۲/۰۴	۲/۰۰	۵/۹۳	بستر صاف	
۱/۵۹	۱/۷۹	۳/۸۳	زبری مخروطی (۱۰ میلی متر)	
۱/۸۰	۱/۶۹	۳/۰۱	زبری مخروطی (۲۵ میلی متر)	
۱/۷۲	۱/۷۳	۱/۹۹	زبری مخروطی (۴۰ میلی متر)	تحقیق حاضر
۱/۴۴	۲/۰۱	۴/۶۴	استوانه‌ای (۱۰ میلی متر)	
۲/۰۵	۱/۳۲	۲/۶۸	استوانه‌ای (۲۵ میلی متر)	
۲/۱۸	۱/۳۲	۲/۰۴	استوانه‌ای (۴۰ میلی متر)	

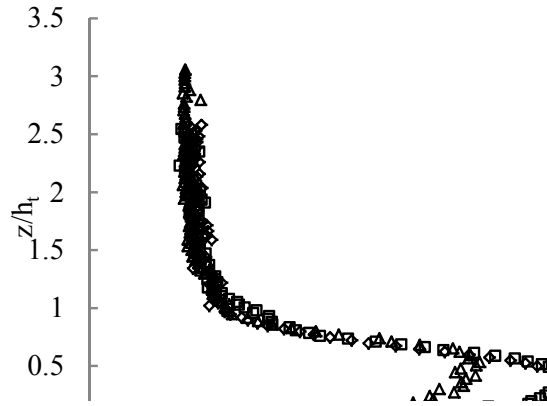
سانتی متر) ولی پس از اختلاط سیال پیرامون در طول مسیر در جریان و در نتیجه آن کاهش  $g'$  (مقدار  $0.811 m/s^2$ ) در فاصله ۱۵۰ سانتی متر) سرعت حداکثر شروع به افزایش می‌کند که این مسئله ناشی از شناوری زیاد و کم بودن مقدار  $g'$  با مواجهه جریان، بدنه جریان از روی زبری‌ها عبور می‌نماید و به دلیل اینکه کف کاذب در طول جریان ایجاد شده است عمق جریان کاهش یافته و سرعت آن افزایش می‌یابد، طبق بررسی منابع انجام شده این رفتار برای اولین بار در تحقیق حاضر مشاهده شده است که نام پدیده برخاستگی برای آن انتخاب شده است. این رفتار در مورد ارتفاع زبری ۴۰ میلی متر (شکل ۶ د) در فاصله بین مقاطع ۷۵ تا ۱۵۰ سانتی متر جریان مشاهده شده است که ناشی از افزایش ارتفاع زبری می باشد (در صورتی که برای زبری به ارتفاع ۲۵ میلی متر این رفتار در فاصله بین مقاطع ۱۵۰ تا ۱۹۸ سانتی متر مشاهده شده است). در هر دو ارتفاع زبری که در آنها برخاستگی اتفاق افتاده است مشاهده می‌گردد پس از وقوع این پدیده به دلیل اختلاط و تأثیر زبری دوباره در طول جریان سرعت حداکثر کاهش یافته است و نسبت به ارتفاع‌های کوچکتر زبری و یا بستر صاف سرعت کاهش یافته است.

که سرعت برای زبری ۲۵ میلی متر در زبری مخروطی بیشتر از زبری ۴۰ میلی متر می باشد زیرا در این شکل زبری در فاصله ۱۵۰ سانتی متر از شروع بستر زبر هنوز پدیده برخاستگی رخ نداده است، ولی در مورد زبری استوانه‌ای این روند برعکس شده که دلیل آن تشدید در اتفاق افتادن پدیده برخاستگی است که نتیجه آن شتاب گرفتن بخش عمده سیال برای عبور از روی زبری‌ها و کاهش مقطع عبوری جریان و افزایش سرعت حداکثر می باشد. در بخش‌های بعدی به پدیده برخاستگی پرداخته شده است.

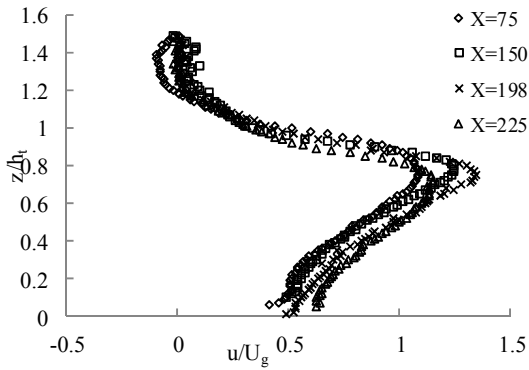
شکل ۶ پروفیل‌های سرعت را برای بسترهای صاف، و زبر استوانه‌ای (با ارتفاع زبری  $t$ ) برای شیب ۱/۲۵ درصد در فواصل طولی ( $x$ ) از ابتدای بستر زبر نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با حرکت در طول بستر صاف و زبر به ارتفاع ۱۰ میلی متر (شکل ۶ الف و ب) سرعت حداکثر کاهش یافته و جریان به توسعه یافتگی نزدیک می‌شود. در مورد بستر با ارتفاع زبری ۲۵ میلی متر در این شکل مشاهده می‌گردد (شکل ۶ ج) که به دلیل بیشتر بودن مقدار  $g'$  (مقدار  $0.811 m/s^2$ ) در فاصله ۷۵ سانتی متر) در ابتدا و کوتاه بودن زبری‌ها نسبت به زبری به ارتفاع ۴۰ میلی متر، ابتدا سرعت حداکثر به شدت کاهش می‌یابد (مقطع ۱۵۰ نسبت به ۷۵



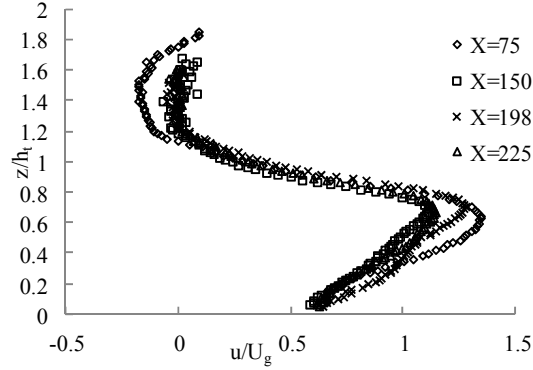
ب)  $S=1/25, Q=1/0.12, C=16/23, t=10$



الف)  $S=1/25, Q=0/937, C=16/09, t=0$

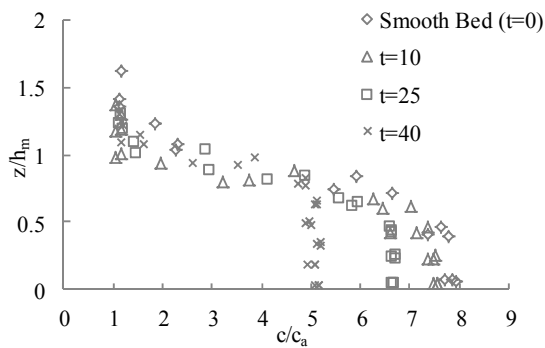


د)  $S=1/25, Q=0/999, C=17/20, t=40$



ج)  $S=1/25, Q=0/960, C=16/55, t=25$

شکل ۶- سرعت بدون بعد بر روی بستر صاف و زیر استوانه‌ای

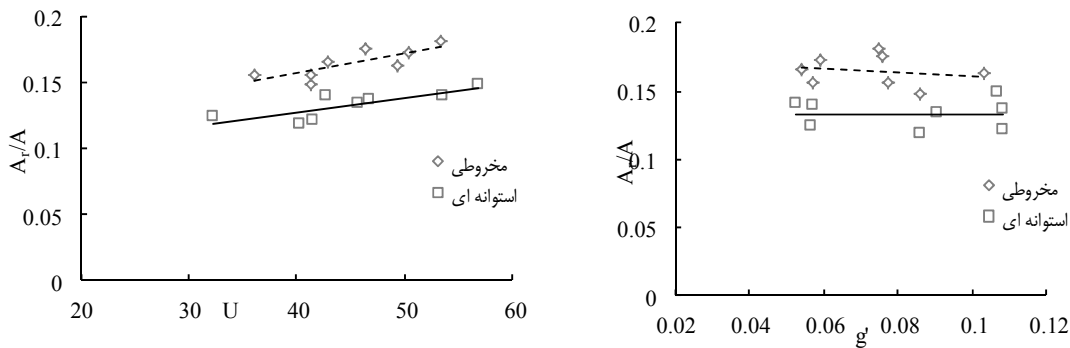


شکل ۷- پروفیل غلظت (در فاصله ۱۵۰ سانتی متر از شروع بستر زیر)

افزایش ارتفاع زبری ضخامت پروفیل غلظت نیز افزایش یافته و از غلظت جریان نیز کاسته شده است و همچنین با وجود اتفاق افتادن پدیده برخاستگی برای زبری ۴۰ میلی متر، تغییر محسوسی در پروفیل غلظت آن دیده نمی‌شود.

### پروفیل غلظت

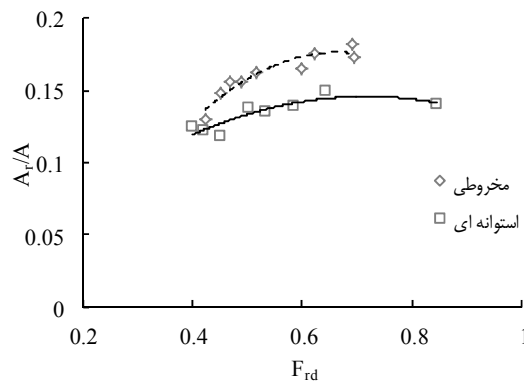
شکل (۷) پروفیل‌های غلظت بدون بعد را نسبت به غلظت سیال پیرامون ( $c_a$ ) نشان می‌دهد. این پروفیل‌ها غلظت بدون بدنه جریان غلیظ را برای بستر صاف و سه بستر زبر مخروطی با شیب ۱/۲۵ درصد نشان داده شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌گردد با



ب) تغییرات  $\bar{U}$  در مقابل عامل انسداد

الف) تغییرات  $g'$  در مقابل عامل انسداد

شکل ۸- مقایسه عوامل مؤثر در پدیده برخاستگی



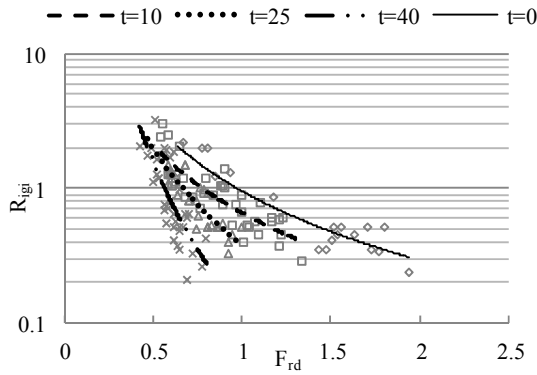
شکل ۹- تغییرات عدد فرود چگال در مقابل عامل انسداد

### پدیده برخاستگی

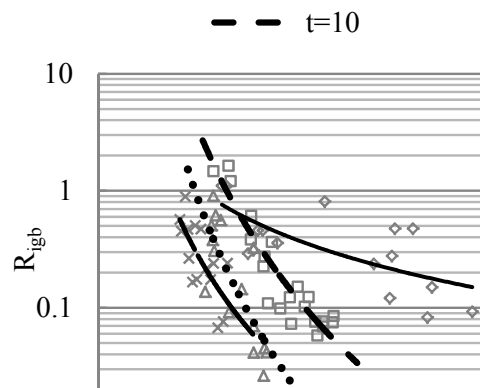
همان طور که اشاره گردید در نقطه برخاستگی بخش عمده بدنه جریان غلیظ از کف جدا شده و از روی زبری ها عبور می نماید، به طوری که در طول جریان بر روی بستر زبر، برخلاف انتظار، به از ضخامت بدنه جریان غلیظ کاسته شده و سرعت حداکثر آن افزایش می یابد (شکل ۶ ج و د)، در صورتی که در مورد جریان غلیظ بر روی بستر زبر که در آنها پدیده برخاستگی رخ نداده است، در طول جریان از سرعت حداکثر کاسته شده و عمق افزایش می یابد (شکل ۶ ب). روش تشخیص برخاستگی به وسیله مقایسه پروفیل های سرعت بدنه در جهت طول جریان می باشد که با پیشروی در طول بستر زبر، برعکس آنچه انتظار می رود مقدار سرعت حداکثر افزایش می یابد. عوامل مؤثر در این پدیده را می توان  $\bar{U}$  (سرعت متوسط) به عنوان مومنتوم ورودی،  $g'$  (شتاب ثقل کاهش یافته) به عنوان عامل نیروی قائم به المان سیال بطرف کف و  $\frac{A_r}{A}$  (نسبت سطح مقطع زبری به سطح مقطع کل بدنه جریان غلیظ) به عنوان عامل انسداد در مقابل جریان در نظر

گرفت. شکل (الف) نشان دهنده تغییرات  $g'$  در مقابل عامل انسداد در آزمایش هایی است که برخاستگی در آنها اتفاق افتاده است، همان طور که مشخص است برای مقادیر مختلف  $g'$  عامل انسداد تقریباً ثابت می باشد ولی برای دو شکل مختلف زبری این مقادیر متفاوت هستند. در شکل (ب) تغییرات عامل انسداد در مقابل سرعت متوسط نشان داده شده است که بیانگر افزایش عامل انسداد در مقابل افزایش مقدار سرعت متوسط است. با توجه به مطالب بیان شده انتظار می رود که پارامتر مومنتوم ورودی در مقایسه با نیروی قائم بطرف کف دارای اهمیت بیشتری باشد. به منظور بررسی بهتر تأثیر هر سه عامل ذکر شده، از عامل بدون بعد عدد فرود چگال استفاده گردید که شکل (۹) تغییرات عدد فرود چگال را در مقابل عامل انسداد برای هر دو شکل زبری و در آزمایش هایی که این پدیده رخ داده است نشان می دهد. با توجه به شکل می توان بیان داشت که با افزایش عدد فرود چگال عامل انسداد بیشتری نیاز است تا برخاستگی رخ دهد و این روند تا جایی ادامه می یابد که با افزایش عدد فرود چگال تغییرات



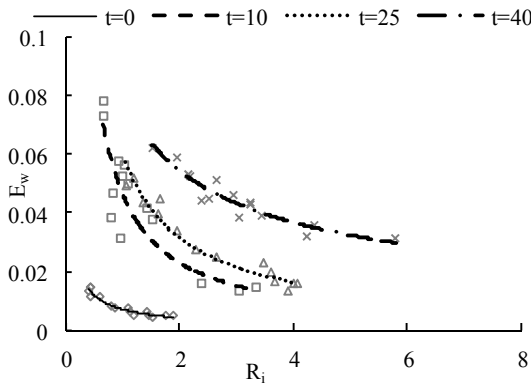


ب) عدد ریچاردسون در ناحیه اختلاط

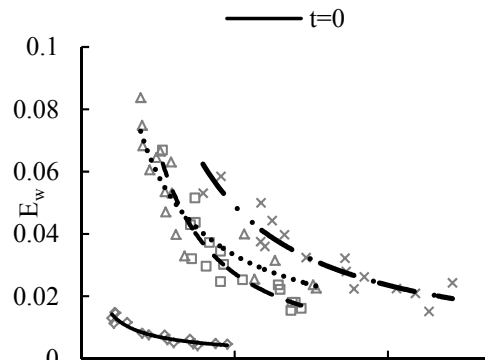


الف) عدد ریچاردسون در ناحیه دیوار

شکل ۱۰- عدد ریچاردسون در مقابل فرود چگال



ب) زبری استوانه‌ای



الف) زبری مخروطی

شکل ۱۱- مقادیر ضریب اختلاط در مقابل عدد ریچاردسون

شدت مقدار عدد ریچاردسون کاهش یافته که نشان دهنده ناپایداری بیشتر لایه‌بندی می‌باشد. در ناحیه دیواره (شکل ۱۰ الف)، با حضور زبری‌های ۱۰ میلی متر به شدت مقدار گرادیان ریچاردسون کم می‌شود که با افزایش ارتفاع زبری‌ها این روند ادامه دارد ولی با افزایش ارتفاع زبری به ۴۰ میلی متر، شتاب کاهش این پارامتر کمتر می‌گردد که در نتیجه پدیده برخاستگی و ایجاد لایه سیال نسبتاً ساکن می‌باشد.

#### ضریب اختلاط

به منظور بررسی مقدار ورود سیال پیرامون به بدنه جریان غلیظ از پارامتر ضریب اختلاط استفاده می‌گردد. محققین مختلفی به ارائه رابطه برای این پارامتر و استخراج ضرایب آن پرداخته‌اند که به نمونه‌هایی از آن اشاره گردید. فرم کلی رابطه ارائه شده در مورد ضریب اختلاط به قرار زیر می‌باشد:

$$E_w = \frac{\alpha_E}{R_i^{\beta_E}} \quad (11)$$

محسوسی در عامل انسداد مشاهده نمی‌گردد به طوری که به ثابت بودن مقدار انسداد برای هر عدد فرود چگال جریان برخاستگی اتفاق خواهد افتاد.

#### عدد ریچاردسون

به منظور بررسی پایداری لایه‌های سیال در جریان‌های لایه‌بندی شده از پارامتر بدون بعد عدد ریچاردسون استفاده می‌گردد. در تحقیق حاضر برای بررسی بهتر تأثیر زبری کف بر روی پایداری لایه‌های سیال غلیظ، پروفیل عدد ریچاردسون به دو بخش دیواره ( $R_{igb}$ ) و اختلاط ( $R_{igi}$ ) تقسیم شده است. شکل (۱۰) تغییرات این مقادیر را در مقابل عدد فرود چگال بیان می‌دارد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع زبری برای یک عدد فرود چگال ثابت مقدار گرادیان ریچاردسون در هر دو منطقه کاهش می‌یابد. از آنجایی که زبری‌های کوچک تأثیر چندانی بر روی پایداری لایه‌بندی در ناحیه اختلاط ندارند، در شکل (۱۰ ب) مشاهده می‌گردد در ارتفاع زبری ۴۰ میلی متر به

## جدول ۳- مقادیر ضرایب رابطه ۱۱

$\beta_E$	$\alpha_E$	نوع بستر
۰/۷۶۲	۰/۰۰۷	بستر صاف
۱/۳۰۷	۰/۰۶۸	زبری مخروطی (۱۰ میلی متر)
۰/۸۲۸	۰/۰۵۹	زبری مخروطی (۲۵ میلی متر)
۱/۰۵۵	۰/۱۰۲	زبری مخروطی (۴۰ میلی متر)
۱/۰۱۵	۰/۰۴۶	زبری استوانه‌ای (۱۰ میلی متر)
۰/۹۴۵	۰/۰۶۱	زبری استوانه‌ای (۲۵ میلی متر)
۰/۵۶۵	۰/۰۸۰	زبری استوانه‌ای (۴۰ میلی متر)

سرعت حاصل بستر صاف همخوانی خوبی با تحقیقات دیگر محققان دارد (آلتینکار و همکاران، ۱۹۹۶ و نورمحمدی و همکاران، ۲۰۱۱). با حضور زبری، مقادیر سرعت کاهش یافته و ضخامت جریان افزایش می‌یابد. برای زبری‌های به ارتفاع ۴۰ میلی متر پدیده برخاستگی مشاهده گردید، این پدیده برای آزمایش‌هایی رخ داده است که در آنها برای زبری استوانه‌ای  $A_p/A \geq 10\%$  و برای زبری مخروطی  $A_p/A \geq 14\%$  باشد، که در این معیارها پارامتر  $A_p/A$  عامل انسداد نامیده شده است. این پدیده بر روی پارامترهای دیگر مانند عدد ریچاردسون بویژه در ناحیه دیوار و همچنین ضریب اختلاط تأثیر گذاشته است. حضور زبری باعث کاهش عدد ریچاردسون در ناحیه دیواره و اختلاط می‌گردد و همچنین افزایش چشمگیری در ضریب اختلاط را باعث می‌شود.

که در آن  $\alpha_E$  و  $\beta_E$ : بیانگر ضرایب معادله هستند. شکل (۱۱) مقادیر ضریب اختلاط را در مقابل عدد ریچاردسون نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که حضور زبری به شدت مقدار ضریب اختلاط را بالا برده و با افزایش ارتفاع زبری به ۲۵ میلی متر این ضریب نیز افزایش می‌یابد، مقدار افزایش ضریب اختلاط برای زبری استوانه‌ای در این ارتفاع کمتر از زبری مخروطی می‌باشد ولی با افزایش ارتفاع زبری به ۴۰ میلی متر این ضریب در زبری‌های مخروطی دارای یک کاهش ناچیز نسبت به زبری‌های استوانه‌ای می‌باشد که این رفتار در نتیجه تشدید پدیده برخاستگی در زبری‌های مخروطی نسبت به زبری‌های استوانه‌ای است. جدول (۳) مقادیر ضرایب رابطه (۱۱) را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر زبری‌های مصنوعی استوانه‌ای و مخروطی در سه ارتفاع بر روی سه شیب بستر و سه غلظت مختلف پرداخته شد. ضرایب معادله های پروفیل‌های

## منابع

- ۱- کرم زاده، ش. ۱۳۸۳. بررسی آزمایشگاهی کشش آب ساکن در جریان های غلیظ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی.
- 2- Altinakar, M. S., Graf, W. H. and E. J., Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity current. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 34(5): 713-718.
- 3- Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentation modeling. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia.
- 4- Kneller, B. C., Bennett, S. J. and W. D., McCaffrey. 1999. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. Journal of Geophysics Research, 104(C3): 5381-5391.
- 5- Nourmohammadi, Z., Afshin, H. and B., Firoozabadi. 2011. Experimental observation of the flow structure of turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 40(2): 168-177.
- 6- Ohey, C. D. 2002. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Communication 15, A.J. Schleiss, ed., Laboratory of Hydraulic Constructions, Ecole Polytechnique Fe' de'rale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

- 7- Ohey, C. D., Cesar, G. D. and A. J, Schleiss. 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 48(1): 81-90.
- 8- Roscoe, R. 1952. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *British Journal of Applied Physics*, 3(8): 267-269.
- 9- Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun, Tao., Garcia, MH. And G, Parker. 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 136(7): 413-433.
- 10- Simpson, J. E. 1982. Gravity currents in the laboratory, atmosphere and ocean. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14: 213-234.
- 11- Simpson, J. E. 1997. Gravity currents: in the environmental and laboratory. Cambridge University Press. U.K.
- 12- Turner, J. S. 1973. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press. U.K.