



بررسی آزمایشگاهی و عددی دینامیک جریان‌های غلیظ نمکی در مخازن

روح الله کاظمی آرپناهی^۱، مهدی قمشی^{۲*}، جواد احدیان^۳ و مهدی کاهه^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز m.ghomeshi@yahoo.com
- ۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۷

چکیده

با توجه به اینکه خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ تحت تاثیر پارامترهای مختلفی قرار دارد، در این تحقیق اثر تغییرات دبی، شیب و غلظت جریان غلیظ بر سرعت پیشانی و پروفیل (توزیع) سرعت در بدنه جریان غلیظ توسط مدل فیزیکی و مدل ریاضی سه بعدی فلو تری دی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور آزمایش‌هایی به صورت جریان غلیظ نمکی در سه دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه و سه شیب ۰، ۱ و ۲/۲ درصد صورت پذیرفت. همچنین به منظور بررسی اثر تغییرات غلظت جریان ورودی بر مشخصات جریان غلیظ، از سه غلظت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر استفاده شد. در این تحقیق به منظور اندازه گیری سرعت پیشانی و توزیع سرعت در بدنه جریان و بررسی روند تغییرات آن در دبی، غلظت و شیب‌های مختلف از یک دوربین فیلمبرداری و یک سرعت سنج پروفایلر آتراسونیک استفاده شد. سپس سرعت پیشانی و توزیع سرعت در بدنه جریان با استفاده از شش مدل آشفتگی مختلف موجود در نرم افزار فلو تری دی استخراج شد. مقایسه نتایج مدل فیزیکی و ریاضی نشان داد که مدل آشفتگی اددی و حالت جریان آرام، از دقت بهتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی برخوردار است. لازم به ذکر است عدد رینالدز آزمایش‌های صورت گرفته در محدوده ۴۰۰۰-۲۰۰۰۰ می باشد.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ نمکی، مدل‌های آشفتگی، توزیع سرعت، نرم افزار فلو تری دی، مخازن سدها.

Laboratory and Numerical Study of Dynamics Salty Density Current in The Reservoirs

R. Kazemi Arpanahi¹, M. Ghomeshi^{2*}, J. Ahadyan³ and M. Kaheh⁴

- 1- M.Sc Student of Water Structures, 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.
3. Associate Professor Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
4. Ph.D. Graduate of Hydraulic Structure, Water Sciences Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz.

Received: 28 November 2015

Accepted: 30 April 2016

Abstract

Since the characteristics of density current is affected by different parameters, the effect of discharge rate changes, gradient and the concentration of density current on speed of the forehead and also the speed distribution in density current's body have been investigated by physical and three-dimensional mathematical model (Flow-3d) in this research. For these purposes, different

tests in the form of salty density current were done with three inflow discharge rates (0.7, 1 and 1.3 liters per second) and three different slopes (0, 1 and 2.2 percent). As well as to evaluate the effect of density changes on the flow characteristics, the concentration of 10, 15 and 20 grams per liter were used. In order to measure the speed of the forehead, velocity distribution in the body and its changes with flow, density and different slopes, video camera and ultrasound profiler speedometer were used in this study. Then, forehead speed and velocity distribution in the current's body were achieved using six different turbulence models which are available on the software of "Flow-3D". Comparing the results of physical and mathematical model showed that Eddy turbulence model and laminar flow mode have better accuracy in relation to other turbulent models. It should be noted that Reynolds number on experiments are at the range of 2000-4000.

Keywords: Salty density current, Turbulent models, Speed distribution, Flow-3D software, Dam reservoirs.

همچنین حرکت جریان غلیظ باعث کشش و حمل مایع تمیز پیرامون خود شده که توسط ضریب اختلاط E_w بیان می‌شود که خود تابعی از عدد ریچاردسون است:

$$E_w = f(Ri) \quad (4)$$

به‌طورکلی جریان غلیظ دارای دو بخش اصلی پیشانی و بدنه است (شکل ۱). برخلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه جریان غلیظ، بخش پیش رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) دارای جریان غیر دائمی بوده و باعث جابجایی سیال محیطی می‌شود. نیروی جلوبرنده و محرک در پیشانی جریان گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان پیشانی جریان و سیال محیطی است (فتیحی مقدم و همکاران، ۲۰۰۸). در زمینه پیشروی جریان غلیظ تحقیقات بسیاری صورت گرفته است.

پارامتر بسیار مهم در بررسی پیشانی جریان میزان سرعت پیشرفت و بخش آن در سیال محیطی است. ترنر (۱۹۷۳) برای بدست آوردن سرعت پیشانی رابطه (۵) را پیشنهاد داد:

$$U_f = \sqrt{2} \sqrt{g'h} \quad (5)$$

که در آن، h ضخامت بدنه جریان غلیظ و g' : همان شتاب ثقل کاهش یافته تحت تاثیر تغییر غلظت و جرم مخصوص سیال است. جریان غلیظ در بدنه معمولاً دائمی و تقریباً یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرک بدنه، نیروی ثقل مؤثر بر سیال سنگین تر است. بدنه جریان غلیظ به یک ترکیب جت-دیواره قابل تشبیه است و بر این اساس توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ نیز در دو ناحیه جت و دیواره قابل بررسی است (شکل ۲).

مقدمه

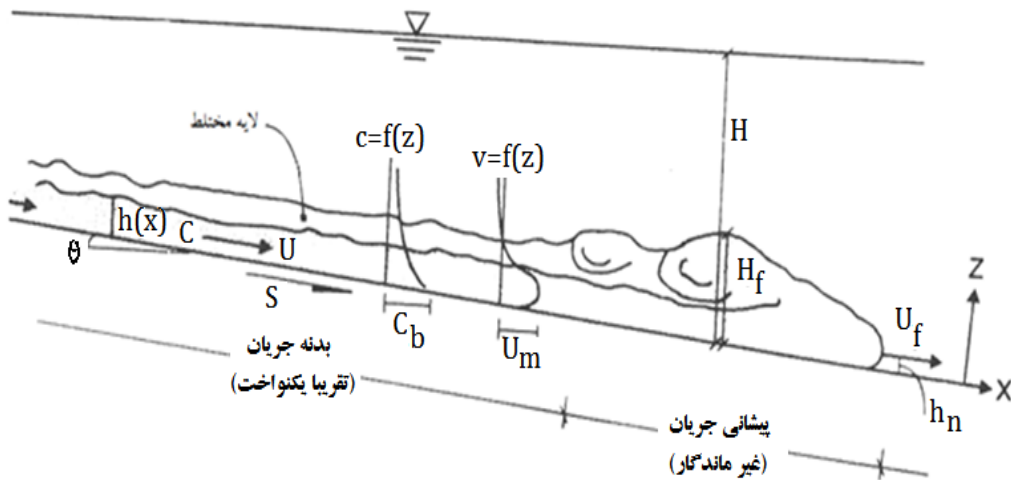
جریان های غلیظ در بسیاری از محیط‌های طبیعی و کاربردهای مهندسی هنگامی رخ می‌دهد که یک سیال با جرم مخصوص بالاتر در سیال سبک تری جریان یابد (ایونگ و همکاران، ۲۰۰۶). ورود جریان‌های غلیظ ناشی از پساب‌ها در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها، فعالیت‌های بیولوژیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. جریان غلیظ یکی از مهمترین پدیده‌ها در ایجاد فرآیندهای رسوبی در مخازن سدها است. از این‌رو شناخت پارامترهای مختلف در این نوع جریان‌ها امری ضروری است. جریان غلیظ یا جریان چگال عبارت است از جریانی که به دلیل نیروی ثقل ناشی از اختلاف چگالی بین دو سیال به وجود می‌آید. با توجه به اینکه جریان غلیظ نوعی جریان ثقلی است، شباهت‌هایی با جریان در مجاری روباز دارد، با این تفاوت که در جریان غلیظ سیال پیرامون تاثیر کاهنده قابل ملاحظه‌ای روی نیروی ثقل دارد، به‌طوری‌که عدد فرود در جریان غلیظ به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود و به آن عدد فرود دنسیومتریکی می‌گویند:

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (1)$$

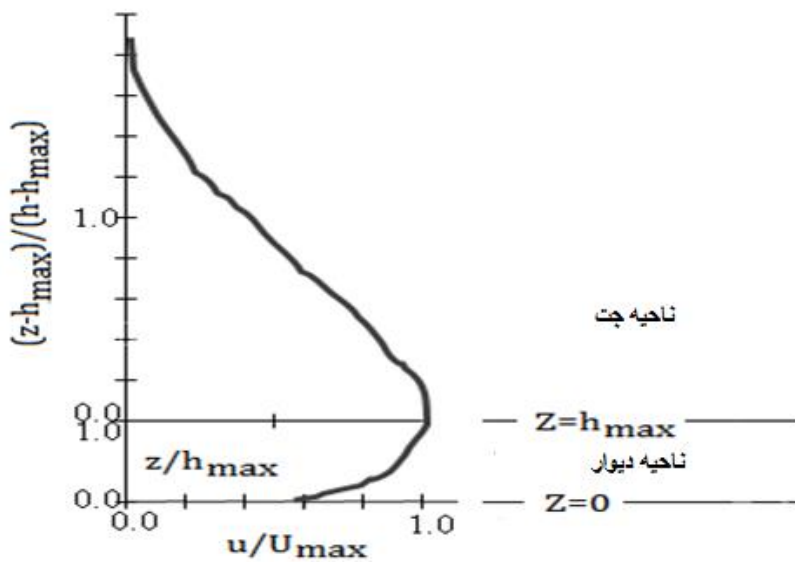
$$g' = g \left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (2)$$

که در آن، g و g' به ترتیب شتاب ثقل و شتاب ثقل کاهش یافته است و ρ_t و ρ_a به ترتیب جرم مخصوص سیال غلیظ و جرم مخصوص سیال محیطی است. فرمول متداول در برگیرنده نیروی ثقل و اینرسی به صورت رابطه زیر است که تحت عنوان عدد ریچاردسون بیان می‌شود:

$$Ri = \frac{1}{Fr_D^2} = \frac{g'h \cos \theta}{U^2} \quad (3)$$



شکل ۱- شمای کلی از پیشانی و بدنه جریان غلیظ (گراف و آلتیناکار، ۱۹۹۸)



شکل ۲- پروفیل بی بعد توزیع سرعت در جریان غلیظ (گراف و آلتیناکار، ۱۹۹۸)

نمودند:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 7/12 \exp \left[-0.5 \left(\frac{K_s}{h_1} \right)^{0.85} \right] F_{D1}^2} - 1 \right) \quad (9)$$

که در آن h_2/h_1 : نسبت اعماق مزدوج، K_s/h_1 : زبری نسبی در مقطع بالادست پرش و F_{D1} : عدد فرود دنیومتری یک مقطع بالادست پرش جریان غلیظ می باشد. خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ تحت تاثیر زبری و شیب بستر قرار دارد و هریک از این پارامترها تاثیر عکسی نسبت به یکدیگر روی سرعت پیشروی دارند. آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) با استفاده از آزمایشهای مختلف رابطه (۱۰) را برای تعیین سرعت پیشروی ارائه نمودند:

$$U_f = 0.63 \sqrt{g'H_f} \quad (10)$$

طبق نظر بریتر و لیندن^۲ (۱۹۸۰) مقدار سرعت جریان در طی مسیر ثابت بوده و مستقل از فاصله‌ای است که توسط جریان غلیظ پوشش می‌دهد. قمشی (۱۹۹۵) در بررسی آزمایشگاهی با شیب کف ثابت و برابر 0.0635 و استفاده از جریان غلیظ رسوبی و جریان غلیظ نمکی و نیز با استفاده از داده‌های سایر محققین، برای سرعت پیشانی جریان رابطه (۱۱) را به دست آورد:

$$U_f = 0.72 \sqrt{g'H_f} \quad (11)$$

که در آن H_f ضخامت جبهه جریان است. لاروکا و همکاران^۳ (۲۰۰۸) با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی دینامیک یک جریان غلیظ سه بعدی را بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که مقدار کاهش سرعت پیشروی جریان در زبری‌های مختلف یکواخت نبوده و کمترین مقدار آن در زبری نسبی $0.01 < \frac{\epsilon}{H} < 0.005$ بوده و در $\frac{\epsilon}{H} > 0.01$ مقدار کاهش سرعت پیشروی ثابت است. یو و همکاران^۴ (۲۰۰۰) در یک بررسی آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت در جریانهای شبه‌همگن، رسوب گذار و بدون رسوب گذاری را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان می‌دهد که نیروی ثقل مؤثر، نیروی محرک اصلی برای سرعت در یک جریان غلیظ لایه‌ای می‌باشد و توزیع سرعت بسیار وابسته به پروفیل‌های غلظت می‌باشد. براساس نظرات بوکی و همکاران^۵ (۲۰۰۱) در جریان‌های غلیظ رسوبی، لایه‌بندی در زیر تراز ماکزیمم سرعت عموماً پایدار است.

این دو ناحیه با ارتفاعی از جریان که سرعت در آن ماکزیمم است h_{max} قابل جدا شدن می‌باشد. در ناحیه جت آشفستگی به دلیل تنش برشی حاصل از ورود سیال محیطی به بدنه جریان بوجود می‌آید. تاثیر جریان جت و دیواره باعث شکل‌گیری توزیع سرعت و غلظت در بدنه کانال می‌شود. توزیع سرعت در ناحیه جت با استفاده از یک توزیع گوسی به صورت زیر قابل برازش است (کاهه و همکاران، ۱۳۹۱):

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

در ناحیه دیوار ($Z < h_{max}$)، آشفستگی در دیواره به دلیل زبری بستر و ورود مواد رسوبی به بدنه جریان، تشکیل می‌شود. توزیع سرعت در ناحیه دیوار با استفاده از یک معادله نمایی به صورت زیر قابل برازش است (کاهه و همکاران، ۱۳۹۱):

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}} \right)^n \quad (7)$$

در زمینه سرعت پیشروی و تغییرات سرعت در بدنه جریان غلیظ تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. به طور کلی سرعت پیشروی جریان غلیظ روی بسترهای زبر، به میزان قابل ملاحظه ای کمتر از بسترهای صاف می‌باشد، همچنین با افزایش زبری ضخامت بدنه جریان غلیظ افزایش می‌یابد (کاهه و همکاران، ۱۳۹۱). حقی‌آبی (۱۳۸۳) رابطه بین سرعت جبهه جریان و شدت جریان مستغرق را برای شیب ثابت یک درصد به صورت زیر ارائه کرد:

$$U_f = 1.013 (g'q_0)^{0.324} \quad (8)$$

اسکوپروس و همکاران^۱ (۲۰۱۰) با یک سری آزمایشهای جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک شکل‌گیری بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و شکل بستر ایجاد شده روی پروفیل‌های سرعت و مقدار افزایش غلظت از طریق بستر متحرک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که شکل‌گیری فرم بستر در رژیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز بر روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر (بخش دیواره از پروفیل سرعت) و فاصله عمودی محل قرارگیری سرعت حداکثر دارد. برهمند و شمسانی (۲۰۱۰) با استفاده از تئوری پرش هیدرولیکی در مجاری رو باز و اصلاح آن برای جریان‌های غلیظ و با استفاده از یک سری آزمایشهای جریان غلیظ رابطه (۹) را برای نسبت عمق مزدوج در پرش جریان‌های غلیظ روی سطوح زبر ارائه

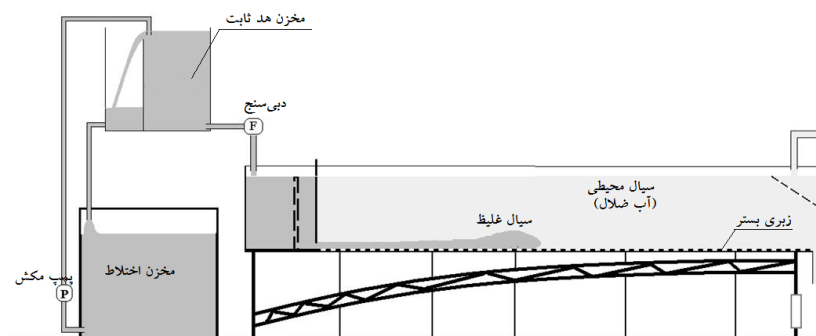
2- britten and Linden

3- La Rocca et al.

4- Yu et al.

5- Buckee et al.

1 - Sequeiros et al.



شکل ۳- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات آزمایشات انجام شده در این تحقیق

شیب (درصد)	دبی جریان غلیظ (لیتر بر ثانیه)	غلظت (گرم بر لیتر)
۲/۲، ۱، ۰	۱/۳ و ۱، ۰/۷	۲۰ و ۱۵، ۱۰

مختلف به صورت مفصل مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا در تحقیق حاضر جریان غلیظ نمکی با سه شیب، سه دبی و سه غلظت متفاوت تحت مدل های آشفتگی مختلف بصورت فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

تجهیزات آزمایشگاهی: به منظور بررسی اثر دبی، شیب و غلظت روی سرعت پیشانی و توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ از یک فلوم آزمایشگاهی (با عرض ۳۵ سانتیمتر و طولی معادل ۹ متر) با شیب قابل تغییر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. آزمایش‌ها به صورت جریان غلیظ نمکی در سه دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه و در سه شیب ۱، ۰/۲ و ۲/۲ درصد صورت پذیرفت. همچنین به منظور بررسی اثر تغییرات غلظت جریان ورودی بر مشخصات جریان غلیظ، از سه غلظت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر استفاده شد. جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

پیشروی جریان غلیظ (که با استفاده از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم از سیال محیطی متمایز شده بود) در طول فلوم آزمایشگاهی به صورت لحظه‌ای تصویر برداری شد و در نهایت متوسط سرعت پیشروی جریان در میانه کانال تعیین گردید. پس از رسیدن رأس جریان به انتهای فلوم و شکل‌گیری بدنه یکنواخت جریان غلیظ در بخش میانی از طول کانال، ضخامت بدنه و پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ضخامت بدنه با استفاده از اشل‌های نصب شده روی فلوم آزمایشگاهی صورت گرفت (شکل ۴). در این تحقیق سرعت پیشانی با استفاده از ضبط فیلم آزمایش انجام شده و پروفیل سرعت بدنه با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج آلتراسونیک UDVP (مدل DOP 2000) اندازه‌گیری شد. این سیستم توانایی ثبت مقادیر سرعت در جهت جریان به صورت پروفیل عمقی را دارا می‌باشد.

مک‌کافری و همکاران^۱ (۲۰۰۳) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی جریان غلیظ رسوبی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که ارتفاع حداکثر سرعت هم در بدنه و هم در پیشانی جریان تقریباً در یک سوم ارتفاع از کف قرار داشته و این ارتفاع با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. کوکس و همکاران^۲ (۲۰۰۵) نشان دادند که ارتفاع حداکثر سرعت مستقل از غلظت ورودی بوده و محل آن مشابه نتایج قبلی در یک سوم ارتفاع از کف اتفاق می‌افتد. باس و همکاران^۳ (۲۰۰۵) نشان دادند که توزیع ذرات معلق بسیار ناپایدار است و توسط نسبت سرعت سقوط ذره به مولفه‌های رو به بالا از سرعت تلاطم محلی کنترل می‌شود. کشتکار و همکاران (۱۳۸۹) در یک بررسی آزمایشگاهی در جریان غلیظ رسوبی نشان دادند که نسبت ضخامت واقعی جریان به ضخامت متوسط جریان برابر با ۱/۴ بوده و ارتفاع نظیر غلظت متوسط جریان در ارتفاعی معادل ۰/۳۵ تا ۰/۵ برابر ضخامت متوسط جریان اتفاق می‌افتد. حقی‌آبی (۱۳۸۳) آزمایش‌هایی بر روی جریان غلیظ ناشی از مواد محلول (آب نمک) و بر روی شیب‌های متغیر انجام داد و رابطه‌ی زیر را برای شدت اختلاط ارائه کرد:

$$E_w = \frac{0.0023}{Ri^{1.0743}} \quad (12)$$

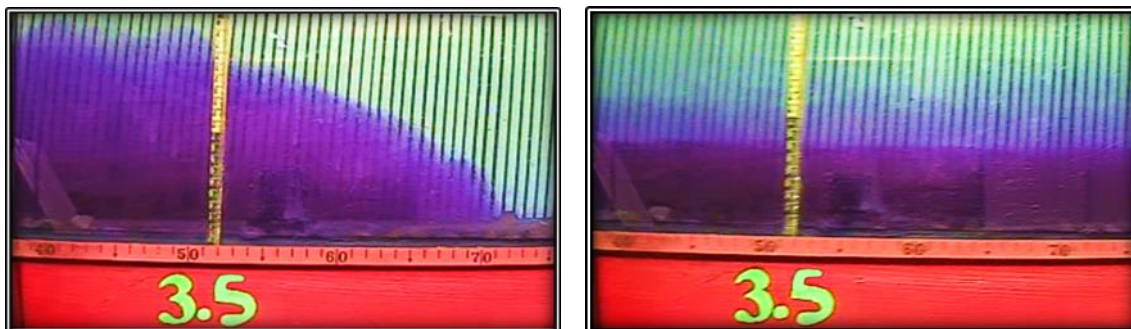
کوتی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی جریان‌های غلیظ به صورت آزمایشگاهی نشان دادند ارتفاع سرعت حداکثر و ضخامت بدنه جریان (h , h_{max}) با افزایش دبی و کشش سیال پیرامون افزایش و با افزایش غلظت و شیب کاهش می‌یابد. همچنین سرعت حداکثر و سرعت متوسط (U , u_{max}) با افزایش هر یک از متغیرها افزایش می‌یابد.

طبق بررسی‌های انجام شده تا کنون رفتار دینامیکی جریان‌های غلیظ نمکی بصورت عددی با استفاده از مدل‌های آشفتگی

1- McCaffrey et al.

2- Choux et al.

3 - Bass et al.



شکل ۴- نمونه از جریان غلیظ ایجاد شده در آزمایشگاه (پیشانی و بدنه جریان غلیظ)

حرکت سیال در سه بعد شامل معادلات ناوراستوکس با پارهای بخش‌های اضافه‌تر به شرح زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v u}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad (17)$$

که در آن G_x, G_y, G_z : شتابهای جرمی در جهات X, Y, Z و f_x, f_y, f_z : شتاب‌های گرانشی در جهات X, Y, Z می‌باشند.

نتایج و بحث

در این تحقیق تغییرات سرعت پیشروی جریان غلیظ در مقابل تغییرات شیب کف کانال، دبی و غلظت جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت مشاهده شد با افزایش شیب کف کانال، غلظت و دبی جریان غلیظ، سرعت پیشروی جریان غلیظ افزایش می‌یابد. شکل (۵) تغییرات سرعت پیشروی جریان غلیظ در مقابل تغییرات غلظت جریان غلیظ را نشان می‌دهد. خطای متوسط مدل‌های آشفتگی مختلف در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش‌های جریان غلیظ انجام شده در محدوده اعداد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ قرار دارند. در شکل (۶) سرعت بدون بعد مشاهداتی (حاصل از مدل فیزیکی) و سرعت بدون بعد محاسباتی (حاصل از مدل عددی) در مقابل هم ترسیم شد. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) و جدول (۲) مشاهده

مدل ریاضی: شبیه‌سازی جزئیات جریان با کاربرد نرم افزار Flow-3D انجام یافته است. Flow-3D یک نرم افزار متداول با توانایی‌های وسیع برای شبیه‌سازی جریان‌های سه بعدی است. مهمترین بخش این نرم افزار تعریف شبکه مش بندی و شرایط مرزی است. در این تحقیق از یک شبکه مش بندی مکعبی شکل با سلول‌هایی به ابعاد یک سانتی متر استفاده شد و شرایط مرزی با توجه به شرایط آزمایش‌ها و راهنمای نرم افزار، ورودی، خروجی، قسمت فوقانی و سایر وجوه شبکه مش بندی تعریف شد. معادلات مورد استفاده مدل فلو تری دی برای این پژوهش شامل اصل بقای جرم و مومنتم است. الف: معادله عمومی بقا جرم.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR \quad (13)$$

که در آن V_F : حجم سیال، ρ : جرم مخصوص سیال و $RSOR$: بخش چشمه‌ی جرم می‌باشد. u, v, w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در مختصات کارتزین (X, Y, Z) و یا مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) می‌باشد. A_x, A_y, A_z به ترتیب مساحت‌های المان در جهت عمود بر مؤلفه‌های X, Y, Z می‌باشد. ضریب ξ و $R=1$ مربوط به نوع سیستم مختصات بوده و در مختصات کارتزین $R=1$ و $\xi=0$ می‌باشد. ترم اول (RDIF) در سمت راست معادله (۱۳) ترم دیفیوژن تلاطم بوده و عبارتست از:

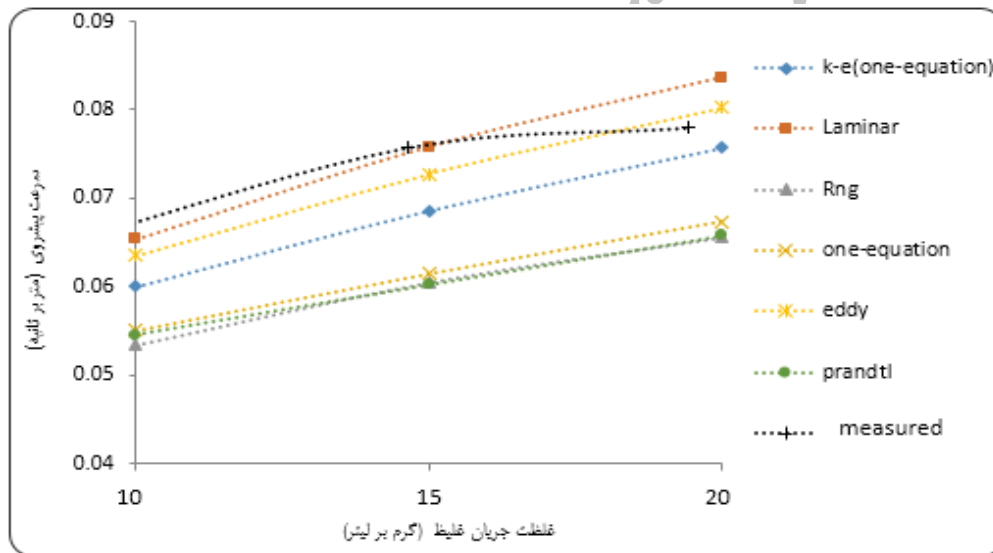
$$RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho \nu \rho A_x}{x} \quad (14)$$

ضریب ν برابر است با $C_p \mu / \rho$ که μ : ضریب ویسکوزیته و C_p : عدد اشمیت تلاطم می‌باشد. این نوع دیفیوژن جرم مربوط به فرآیندهای اختلاط تلاطم در سیالات با جرم مخصوص غیر یکنواخت می‌باشد. ب: معادله مقدار حرکت: معادلات

و مدل آشفتگی اددی مطابقت بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارند. شایان ذکر است مدل جریان آرام سرعت حداکثر را مقداری بیشتر از داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. ولی مدل‌های آشفتگی Rng، One_equation، Prandtl و K-E نسبت به داده‌های مشاهداتی اختلاف زیادی دارند. جهت بررسی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ، برای هر یک از نواحی جت و دیواره، توزیع بی بعد سرعت حاصل از مدل فیزیکی و مدل آشفتگی اددی و حالت جریان آرام با روابط (۷) و (۶) برآزش داده شد. شکل (۸) نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت بی بعد محاسبه شده در ناحیه جت و دیواره را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در فرایند بی بعد سازی، ارتفاع پروفیل سرعت ناحیه جت نسبت به ارتفاع شامل سرعت ماگزیمم (h_m) و ارتفاع متوسط بدنه جریان غلیظ (h) بی بعد شد. و ارتفاع پروفیل سرعت در ناحیه دیواره با h_m بی بعد شد. بی بعد سازی سرعت در هر دو ناحیه نسبت به سرعت ماگزیمم (U_m) صورت پذیرفت.

می‌شود حالت لامینار و مدل آشفتگی اددی بیشترین هماهنگی را با داده‌های آزمایشگاهی دارند. با توجه به رینولدز جریان که کمتر از ۴۰۰۰ است، انتظار می‌رود که حالت عددی جریان آرام دقت قابل قبولی داشته باشد. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که حالت جریان آرام در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر انحراف بیشتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، دلیل آن را می‌توان ظهور آشفتگی با افزایش غلظت دانست.

یکی از مشخصه‌های مهم جریان غلیظ که تحت تاثیر دبی، شیب و غلظت جریان غلیظ قرار دارد، توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ است. به منظور بررسی توزیع سرعت، متوسط مقادیر ثبت شده پروفیل‌های سرعت در طی زمان به عنوان توزیع سرعت در شرایط مختلف از شیب، دبی جریان ورودی و اختلاف غلظت در نظر گرفته شد. شکل (۷) نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت حاصل از مدل فیزیکی و مدل‌های آشفتگی مختلف موجود در نرم افزار فلو تری دی را نشان می‌دهد. از مقایسه پروفیل‌های ترسیم شده، مشاهده شد که پروفیل‌های سرعت بدنه در حالت جریان لایه ای

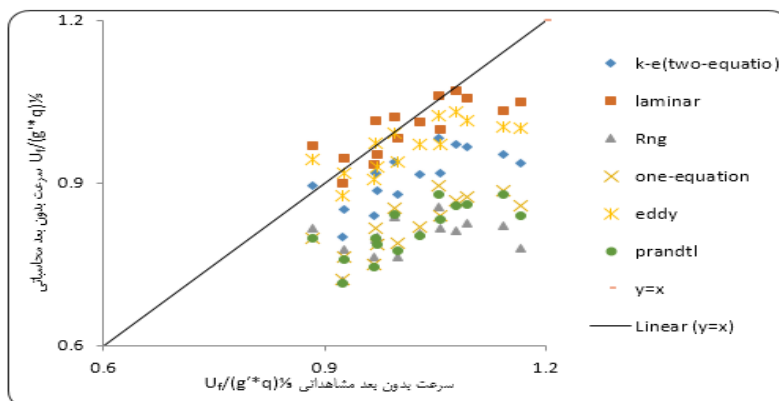


شکل ۵- سرعت پیشروی جریان غلیظ در مقابل تغییرات غلظت جریان غلیظ برای مدل‌های مختلف ۱۰۰* داده‌های آزمایشگاهی/ (داده‌های مدل عددی- داده‌های آزمایشگاهی) = (درصد) خطا

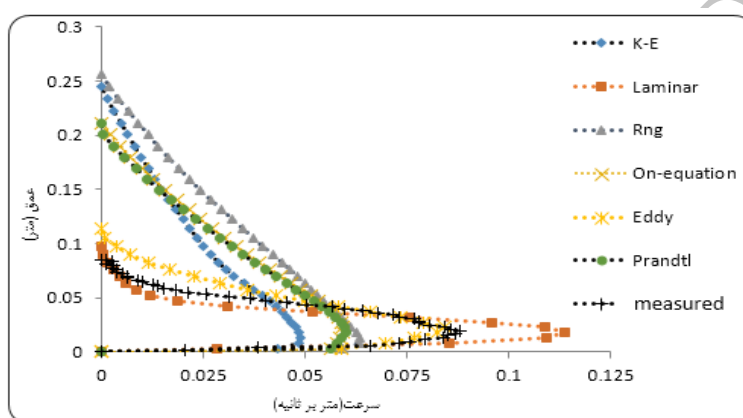
جدول ۲- خطای متوسط مدل‌های آشفتگی مختلف در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی

مدل	K-e	Laminar	Rng	One-equation	Eddy	Prandtl
خطا (درصد)	۶/۴	۲/۶۷	۱۵/۵۰	۱۷/۳۷	۸	۱۸/۵۰

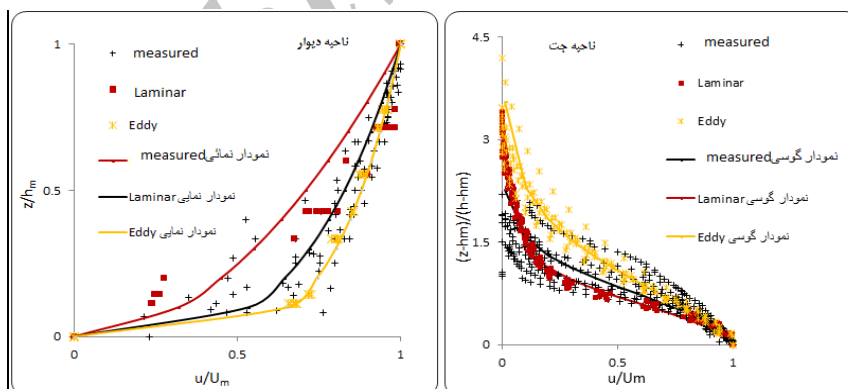
کازمی آرپناهی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی و عددی دینامیک جریان‌های...



شکل ۶- تغییرات سرعت بی بعد مشاهداتی و محاسباتی برای مدل‌های مختلف



شکل ۷- نمونه ای از پروفیل‌های سرعت (دبی ۱ لیتر بر ثانیه)، غلظت جریان غلیظ ۱۰۱۵ (گرم بر لیتر) و شیب ۲/۲ در صد



شکل ۸- پروفیل‌های سرعت بی بعد حاصل از مدل‌های فیزیکی و عددی در ناحیه جت و دیواره

در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. جدول (۵) خطای مدل عددی در محاسبه توزیع سرعت ناحیه جت و دیواره نسبت به مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

در شکل (۹) نتایج به دست آمده برای شدت اختلاط در برابر عدد ریچاردسون برای داده‌های آزمایشگاهی و دو مدل جریان آرام و اددی همراه با نتایج حاصل از محققین دیگر ارائه شده است. که بیانگر تطابق خوب نتایج این تحقیق با نتایج محققین دیگر می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر در نظر گرفتن نوع مدل آشفتگی جریان، بر روی روند تغییرات توزیع سرعت در ناحیه جت و دیواره، کلیه پروفیل‌های بی‌بعد شده برای مدل فیزیکی و دو حالت عددی (جریان آرام و اددی) در ناحیه جت و دیواره بترتیب با استفاده از توزیع نیمه گوسی (رابطه ۶) و نمایی (رابطه ۷) به روش حداقل کردن میانگین مربعات خطا برازش داده شد. منحنی‌های گوسی و نمایی برازش شده برای مدل‌های فیزیکی و عددی روی شکل (۸) با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده است. نتایج حاصل از این بررسی

جدول ۳- ضرائب برازش شده از توزیع نیمه گوسی برای سرعت بی بعد در ناحیه جت جریان

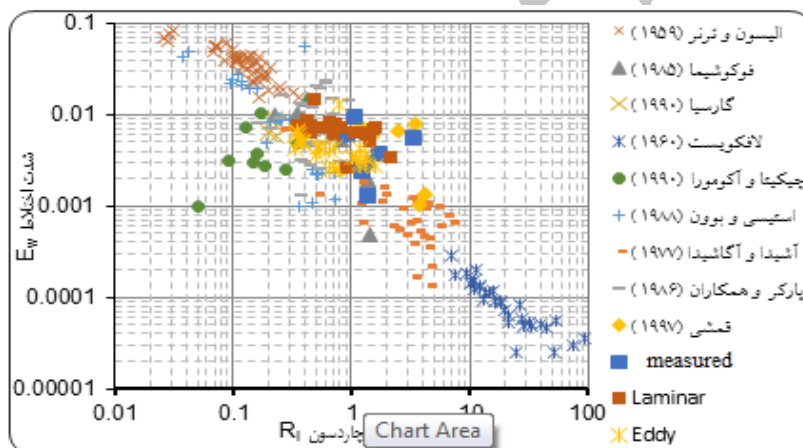
نام پروفیل	مدل آشفتگی ادی	حالت لامینار	داده‌های آزمایشگاهی
ضرائب α	۰/۶۱۸	۱/۳۱۲	۰/۹۶۲
معادلات گوسی β	۱/۵۸۳	۱/۷۹	۱/۹۲۴
ضرائب رگرسیون	۰/۹۸۶	۰/۹۸۵	۰/۹۳

جدول ۴- ضرائب برازش شده از توزیع توانی برای سرعت بی بعد در ناحیه دیواره جریان

نام پروفیل	مدل آشفتگی ادی	حالت لامینار	داده‌های آزمایشگاهی
توان معادله توزیع سرعت	۰/۱۸۵	۰/۴۹۷	۰/۲۷۳
ضرائب تعیین	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۲

جدول ۵- خطای حالت لامینار و مدل آشفتگی ادی در برآورد پروفیل سرعت ناحیه های جت و دیواره

مدل	اددی	جریان آرام (لامینار)
خطای ناحیه جت (درصد)	۲۶/۱۶	۱۵/۲۷
خطای ناحیه دیواره (درصد)	۶/۷	۱۳/۸



شکل ۹- مقادیر شدت اختلاط در برابر عدد ریچاردسون و مقایسه آن با نتایج محققین دیگر

پروفیل های سرعت ناحیه جت حاصل از مدل عددی از تابع گوسی تبعیت کرده و در این ناحیه حالت جریان آرام ۱۵/۲۷ درصد و مدل آشفتگی ادی ۲۶/۱۶ درصد خطا دارد. براساس تحلیل انجام شده روی کلیه پروفیل های سرعت بدست آمده حاصل از آزمایشگاه، به طور کلی می توان توزیع سرعت در ناحیه دیواره را به صورت رابطه نمایی زیر برازش داد:

$$\frac{u(z)}{U_{\max}} = \left(\frac{z}{h_{\max}} \right)^n$$

پروفیل های سرعت ناحیه جت حاصل از مدل عددی از تابع نمایی تبعیت کرده و در این ناحیه حالت جریان آرام ۱۳/۸ درصد و مدل آشفتگی ادی ۶/۷ درصد خطا دارد.

نتیجه گیری

با افزایش شیب کف کانال، غلظت و دبی ورودی جریان غلیظ سرعت پیشروی (پیشانی جریان غلیظ) افزایش می یابد. حالت جریان آرام (لامینار) و مدل آشفتگی ادی سرعت پیشروی جریان غلیظ را با دقت بالایی نسبت به سایر مدل های آشفتگی محاسبه می کنند. در ضمن حالت جریان آرام دقت بهتری دارد. براساس تحلیل انجام شده روی کلیه پروفیل های سرعت بدست آمده حاصل از آزمایشگاه، به طور کلی می توان توزیع سرعت در ناحیه جت را به صورت رابطه گوسی زیر برازش داد:

$$\frac{u(z)}{U_{\max}} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{z - h_{\max}}{h - h_{\max}} \right)^\beta \right]$$

منابع

- ۱- حقی آبی، ا. ۱۳۸۳. بررسی اثر شیب کف بر پروفیل سرعت جریان غلیظ رساله دکتری رشته سازه های آبی ، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- کاهه، م. قمشی، م. و س، ح، موسوی جهرمی، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر. علوم و مهندسی آبیاری، ۱۱۰-۱۰۱: (۱)۳۵
- ۳- کشتکار، ش. ایوب زاده، س. ع. و ب، فیروزآبادی، ۱۳۸۹ . بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان گل آلود با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۸۷(۲): ۳۶-۴۳.
- ۴- کوتی، ف. کاشفی پور، س، م. و م قمشی، ۱۳۹۱. تجزیه و تحلیل پروفیل های سرعت در جریان غلیظ. مجله ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۹: ۲۹-۱۵.
- 5- Altinakar, M.S., Graf, W.H. and E.J, Hopfinger. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*. 28(1): 55-80.
- 6- Baas, J.H. McCaffrey, W.D. Haughton P.D.W. and C, Choux. 2005. Coupling between suspended sediment distribution and turbulence structure in a laboratory turbidity current. *Journal of Geophysics Research*, 110: 20-32.
- 7- Barahmand, N. and A, Shamsai. 2010. Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds". *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 15(4): 285-307.
- 8- Britter, R.E. and P, Linden. 1980. The motion of the front of a gravity current traveling down an incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 99(3): 531- 543.
- 9- Buckee, C. Kneller, B. and J, Peakall. 2001. Turbulence structure in steady solute-driven gravity currents *Blackwell Oxford pp*, 173-188.
- 10- Choux, C.M.A. Baas, J.H. McCaffrey, W.D. and P.D.W, Haughton. 2005. Comparison of spatio-temporal evolution of experimental particulate gravity flows at two different initial concentrations based on velocity grain size and density data. *Sedimentary Geology*, 179: 49-69.
- 11- FathiMoghadam, M. TorabiPoudeh, H. Ghomshi, M. and M, Shafaei. 2008. The density current head velocity in expansion reaches. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 13(1): 63-68.
- 12- Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentation modeling. Ph.D. Thesis. University of Wollongong. Australia.
13. Graf, W.H. and M, S, Altinakar. 1998. *Fluvial Hydraulics, Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*. John Wiley and Sons, Ltd, England.
- 14- Jeong, K, K. Mok, K.M. and H, Yeh. 2006. Fluctuation of the front propagation speed of developed gravity current. *Journal of Hydrodynamics*, 18(3): 351-355.
- 15- LaRocca, M. Adduce, C. Sciortino, G. And A, B, Pinzon. 2008. Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. *Physics of Fluids*, 20, 106603.
- 16- McCaffrey, W, D. Choux, C, M. Baas, J, H. And P, D, W, Haughton. 2003. Spatio-temporal evolution of velocity structure concentration and grain size stratification within experimental particulate gravity currents. *Marine and Petroleum Geology*. 20: 851-860.
- 17- Sequeiros, O, E. Spinewine, B. Beaubouef, R, T. Sun, T. Garcia, H. M., 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*, 136(7): 167-180.
- 18- Turner, J, S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press London, U.K, pp. 178-181.
- 19- Yu, W, S. Lee, H, Y. And M, S, Hsu. 2000. Experiments on deposition behavior of fine in a reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(12): 912-920.