



Head Velocity and Entrainment of Density Current in an Expansion Reach

H. Torabi Poudeh¹, M. Fathi Moghadam²,
M. Ghomeshi³ and M. Shafai-Bajestan⁴

Abstract

Velocity and Entrainment of density current in the expansion reach where a river enters into a dam reservoir, a lake, or open sea is of utmost importance. The present study investigates the head velocity and entrainment of density currents in an Expansion Reach. The effects of discharge and bed slope on the head velocity and entrainment of the density current were evaluated by a physical and 3D mathematical model. Experiments were conducted in a flume, 6.0 meters long, 0.72 meters wide, and 0.6 meters in height. Head velocity was measured for an expansion degree of 8 in slopes of 0.0009 and 0.0016 for various discharges. Important parameters were normalized and a two-dimensional laser Doppler was used to develop the flow body velocity profile. The measurements showed that mixing values were higher in a divergent cross-section compared to a fixed cross-section. During some experiments a hydraulic jump was also detected depending upon the levels of the density current and slope of the bed in the divergent cross-section, which was investigated and the results are presented accordingly.

Keywords: Density Current, Stratified Flow, Richardson Number, Sediment Transport

بررسی سرعت جبهه و شدت اختلاط جریان‌های غلیظ ورودی به یک مقطع واگرا

حسن ترابی پوده^۱، منوچهر فتحی مقدم^۲،
مهرداد قمی‌نشی^۳ و محمود شفاعی بجمستان^۴

چکیده

دانستن سرعت جبهه و شدت اختلاط جریان غلیظ در مخازن سدها و دریاها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از پارامترهای بسیار مؤثر در تغییر هیدرولیک جریان غلیظ، تغییرات مقطع عرضی رودخانه قبل از ورود به مخازن سدها است. لذا در مقاله حاضر تأثیر تغییرات میزان گذر جریان غلیظ و شیب بستر در میزان پخش و پراکندگی و سرعت جبهه جریان کدر و میزان اختلاط در یک مقطع واگرا توسط مدل فیزیکی و یک مدل ریاضی ۳ بعدی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. آزمایشات در یک فلوم با طول ۶ متر، عرض ۷۲/۵ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر در شیب‌ها و دبی‌های مختلف انجام و جهت تعیین پروفیل سرعت در بدنه جریان از دستگاه لیزر داپلر دو بعدی استفاده شد. ارتفاع و سرعت جبهه جریان، سرعت بدنه جریان اصلی و عدد ریچاردسون بصورت اعداد بی بعد تعیین و بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهدات بیانگر افزایش سرعت بی بعد جبهه موج در مقطع واگرا می‌باشد. همچنین اندازه گیریهای انجام شده نشان داد که میزان اختلاط در بدنه جریان غلیظ در مقطع واگرا نسبت به مقطع ثابت با شدت بیشتری انجام می‌گیرد. در بعضی از آزمایشات نیز بسته به میزان جریان ورودی غلیظ و شیب بستر در مقطع واگرا پخش هیدرولیکی مشاهده شد که این پدیده نیز بررسی و نتایج مربوطه ارائه گردید.

کلمات کلیدی: جریانهای چگالی، جریانهای ثقلی، عدد ریچاردسون، انتقال رسوب

1- Ph.D. Student, School of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran, University, Ahwaz, Iran
2- Assistant Professor, School of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran, University, Ahwaz, Iran
3- Assistant Professor, School of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran, University, Ahwaz, Iran
4- Professor, School of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran, University, Ahwaz, Iran

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز
۲، ۳ و ۴- به ترتیب استادیار، دانشیار و استاد گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۱- مقدمه

است و از طرفی تحقیقات آزمایشگاهی در فلوم‌های با مقطع ثابت انجام یافته و تاکنون خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ در یک مقطع واگرا مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا در این پژوهش جزئیات هیدرولیکی جریان غلیظ در یک مقطع واگرا مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان از اهمیت زیادی برخوردار است، بنابراین جهت اندازه‌گیری سرعت از یک دستگاه لیزر داپلر دو بعدی استفاده شد.

۲- پیشینه تحقیق

در این تحقیق سرعت موج جریان و همچنین شدت اختلاط در بدنه جریان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت جداگانه در دو مورد ارائه می‌گردد. اندازه‌گیری‌های قبلی توسط برخی از پژوهشگران حاکی از تطابق تقریبی سرعت جبهه موج با رابطه Keulegan (1957) است که بصورت زیر بیان می‌شود.

$$U_f = 0.75 \sqrt{g'h_f} \quad (4)$$

h_f : ضخامت جبهه جریان، (Turner (1973, 1979) رابطه دیگری مشابه رابطه فوق به شکل زیر ارائه نمود.

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

h : عمق جریان

Altinakar (1988) داده‌های فلوم آزمایشگاهی خود را با نتایج Turner (1973) و Middelton (1966) مقایسه نموده و یک ضریب سزی کوچکتر برابر ۰/۶۳ پیشنهاد نمود.

$$U_f = 0.63 \sqrt{g'h_f} \quad (6)$$

در پژوهش‌های بعدی توسط Altinakar et al. (1988) سرعت بی بعد جبهه جریان غلیظ تابعی از شیب بستر به صورت زیر بیان شد. مشاهدات آلتیناکار و همکاران و مقایسه آن با مشاهدات دیگر محققین و نتایج تحقیق حاضر در نمودار ۱ نشان داده شده است.

$$\frac{U_f}{(g'q)^{1/3}} = f(S) \quad (7)$$

اگر سیالی با چگالی معلوم وارد یک سیال تقریباً ساکن با چگالی متفاوت گردد، ممکن است بصورت زیرجریان^۱، میان جریان^۲ یا روجریان^۳ درآید. وقوع هر کدام از این حالات بستگی به تفاوت چگالی سیال ورودی و سیال ساکن دارد. به این جریان‌ها، جریان‌های غلیظ^۴ یا جریان‌های ثقیلی^۵ اطلاق می‌شود اگر اختلاف چگالی بخاطر مواد معلق باشد به این جریانها^۶ اطلاق می‌گردد که در آنها عامل تعلیق ذرات، تلاطم جریان است. در دریاچه‌ها و مخازن، ورود جریان‌های غلیظ فعالیت‌های بیولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث رسوبگذاری در مخازن شده و ظرفیت ذخیره مفید آنها را کاهش می‌دهد. در اقیانوسها جریانهای غلیظ تأثیر بسزایی در توزیع رسوبات روی کف اقیانوس و شکل‌گیری توپوگرافی کف آنها دارند. در دریاها نیز ذرات با اندازه سیلت و رس بصورت بار معلق توسط رودخانه‌ها و به کمک جریانهای غلیظ به ناحیه زیرین دریاها منتقل می‌شود. در شکل ۱، حرکت جریان غلیظ یک بعدی با چگالی $\rho_1 = \rho_2$ با سرعت متوسط U در جهت x روی یک سطح شیب دار با زاویه θ در زیر یک توده سیال ساکن عمیق تر با چگالی $\rho_a = \rho_2$ نشان می‌دهد. جریان غلیظ گرچه دارای شباهتهایی با جریان در مجاری رو باز می‌باشد ولی با آن تفاوت اساسی دارد و این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که سیال اطراف تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل دارد و ضریب کاهش به صورت $\Delta\rho/\rho_2$ می‌باشد. در نتیجه شتاب ثقل مؤثر بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$g' = g(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2 = g\Delta\rho/\rho_2 \quad (1)$$

شتاب ثقل مانع از اختلاط جریان غلیظ با سیال ساکن شده و آنرا در امتداد شیب به جلو می‌راند. پارامتر دیگری که در مکانیزم جریان غلیظ مؤثر است عدد فرود می‌باشد. این عدد به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$Fr_D = U / \sqrt{g'h \cos \theta} \quad (2)$$

به این عدد، عدد فرود چگالی‌دار می‌گویند. از رابطه فوق عدد ریچاردسون به صورت زیر بیان می‌شود.

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

با توجه به اینکه خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ به ناهموازی‌های بستر و خصوصاً تغییر در مقطع عرضی مخزن وابسته

$$E_w = \frac{0.0023}{Ri^{1.0743}} \quad (11)$$

در خصوص هیدرودینامیک جریان غلیظ اخیراً نیز تحقیقاتی توسط Ross et al. (2002)، King and Woods (2003)، De Cesare et al. (2001,2002)، Horsch (2004) و Haghiabi (2004) انجام شده است.

۳- روش تحقیق و آزمایش

۳-۱- توسعه مدل به کمک آنالیز ابعادی

پارامتر وابسته در جریان غلیظ (شکل ۱) مورد بررسی در این تحقیق، سرعت جبهه جریان U_f می‌باشد. این پارامتر را می‌توان براساس معادله زیر به پارامترهای مستقل جریان ارتباط داد.

$$U_f = \Phi(g', q, H, S, \nu, \alpha) \quad (12)$$

α : زاویه واگرایی q : شدت جریان غلیظ ورودی S : شیب کف
 ν : لزجت سینماتیک H : عمق آب زلال + عمق جریان غلیظ
 g' : شتاب ثقل مؤثر

با استفاده از g' و q بصورت پارامترهای تکراری، پارامترهای بی بعد زیر از آنالیز بعدی حاصل شدند.

$$U_f / (g'q)^{1/3} = \Phi\left(q / \sqrt{g'H^3}, S, R_e, \alpha\right) \quad (13)$$

با توجه به رابطه شماره ۱۳، پارامتر سرعت بدون بعد پیشانی جریان $(U_f / (g'q)^{1/3})$ تابعی از شیب (S) ، زاویه واگرایی (α) ، عدد رینولدز (R_e) ، و دبی بی بعد $(q / \sqrt{g'H^3})$ می‌باشد. با توجه به تغییرات جزئی لزجت سینماتیک در جریان غلیظ ناشی از اختلاط آب زلال، از تأثیر عدد رینولدز در این تحقیق صرف نظر گردید. بنابراین برای یک مقطع با زاویه واگرایی ثابت سرعت بدون بعد پیشانی جریان $(U_f / (g'q)^{1/3})$ به صورت تابعی از شیب (S) و دبی بی بعد $(q / \sqrt{g'H^3})$ ارائه گردید. یعنی:

$$U_f / (g'q)^{1/3} = \Phi\left(q / \sqrt{g'H^3}, S\right) \quad (14)$$

همانطور که در نمودار شماره ۱ نشان داده شده است، داده‌ها دارای پراکندگی قابل ملاحظه‌ای می‌باشند که آلتیناکار و همکاران این پراکندگی را حاصل خطای آزمایشگاهی و ضرایب نیروی مقاوم متفاوت دانستند. (2004) Haghiabi نیز در تحقیق مشابهی به نتایج مشابه دست یافت و پراکندگی داده‌ها را ناشی از خطای آزمایشات دانست. اما بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که سرعت بی بعد تابعی از شیب و دبی بی بعد به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{U_f}{(g'q)^{1/3}} = f\left(S, \frac{q}{\sqrt{g'H^3}}\right) \quad (8)$$

(1980) Britter and Linden نیز بر روی سرعت پیشانی جریان مطالعاتی انجام دادند که نتایج این تحقیقات در نمودار شماره ۱ دیده می‌شود. (1995) Ghomeshi با انجام تحقیقات آزمایشگاهی معادله‌ای جهت برآورد سرعت پیشانی جریان ارائه نمود.

شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون که آن را با E_w نشان می‌دهیم ناشی از ناپایداریها در حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن می‌باشد و بصورت نسبت سرعت اختلاط W_h به سرعت متوسط جریان U تعریف می‌شود (Turner, 1973). محققان با انجام آزمایشهای گوناگون بر روی جریانهای غلیظ دریافتند ضریب شدت اختلاط (E_w) تابعی از عدد ریچاردسون می‌باشد. (1990) Chikita تحقیقاتی را در ژاپن انجام دادند. آنها رابطه زیر را برای میزان اختلاط بدست آوردند:

$$E_w = 0.0087 \exp\left(-0.106/Ri\right) \quad (8)$$

(1987) Parker et al. رابطه زیر را ارائه نمود.

$$E_w = 0.075(1 + 718Ri^{2.4})^{-0.5} \quad (9)$$

(1995) Ghomeshi نیز آزمایشهایی بر روی جریان غلیظ ناشی از مواد محلول (نمک) و یا مواد رسوبی انجام داد و رابطه زیر را برای شدت اختلاط ارائه کرد.

$$E_w = \frac{0.0024}{Ri^{1.06}} \quad (10)$$

(2004) Haghiabi آزمایشهایی که بر روی جریان غلیظ ناشی از مواد محلول (آب نمک) و بر روی شیبهای متغیر انجام داد و رابطه زیر را برای شدت اختلاط ارائه کرد.

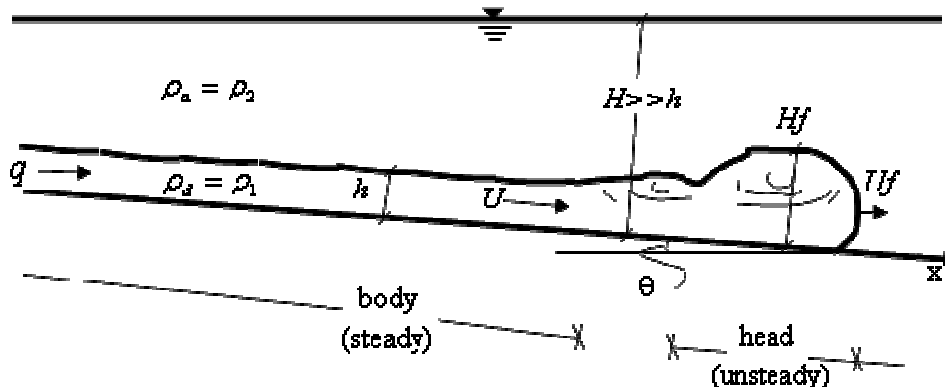
این تحقیق تلاش دارد روابط حاکم بین پارامتر وابسته بی بعد سرعت پیشانی جریان $U_f / (g'q)^{1/3}$ را با پارامترهای بی بعد مستقل $S, q / \sqrt{g'H^3}$ برای یک مقطع واگرا بررسی و تجزیه و تحلیل نماید.

۳-۲- مدل فیزیکی

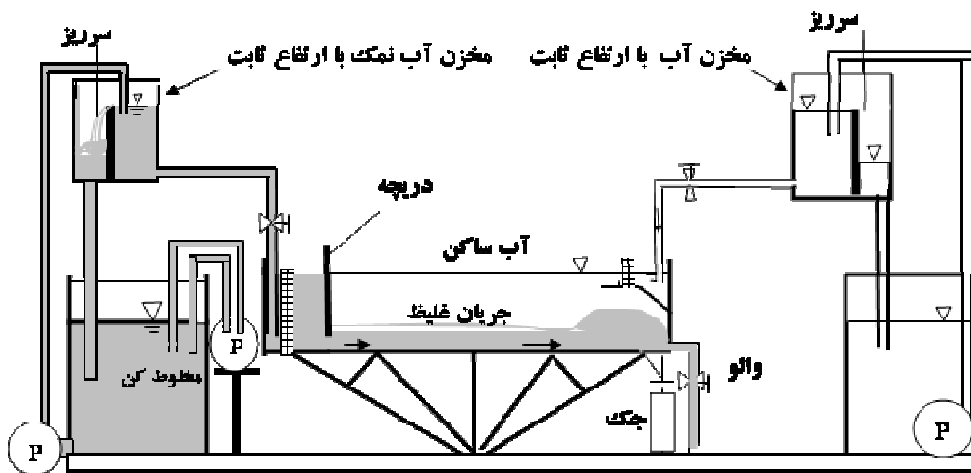
آزمایشات در یک فلوم با شیب کف قابل تغییر، عرض ۷۲/۵ سانتی متر، عمق ۶۰ سانتی متر و طول ۶ متر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شد. تجهیزات و تمهیدات دیگری نیز برای تهیه سیال غلیظ و کنترل حالت ماندگار آن در طول آزمایشات در نظر گرفته شده بود. فلوم و تجهیزات موجود در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. قبل از شروع آزمایشات، همه ابزارهای اندازه‌گیری به نحو مناسب آماده و فلوم از آب معمولی پر می‌شد. در مجاورت فلوم یک مخزن اختلاط مجهز به پمپ مخلوط کن، برای تهیه و ذخیره جریان غلیظ در نظر گرفته شده بود. برای تهیه سیال غلیظ، نمک (نمک طعام) با آب در مخزن اختلاط، مخلوط می‌شد. سیال غلیظ تولید شده از طریق خط لوله و با شدت ثابت از مخزن اختلاط به یک منبع با ارتفاع ثابت (هد تانک) پمپاژ می‌شد و سپس از تانک توسط یک سیستم لوله و شیر فلکه به داخل فلوم هدایت می‌گردید. دبی جریان غلیظ ورودی به فلوم با استفاده از یک شیر فلکه تنظیم می‌شد. انتهای بالادست فلوم با استفاده از یک صفحه مسدود شده بود. تمام طول فلوم به وسیله یک دریچه جداکننده کشویی به دو بخش با طول متفاوت تقسیم شد. بخش کوتاه‌تر در بالادست نقش تانک اصلی را برای سیال غلیظ مولد جریان غلیظ ایفا می‌کرد. بخش طویل‌تر در پایین دست نقش مخزن را داشت که جریان غلیظ از زیر آن حرکت می‌کرد و در واقع بازه مورد آزمایش بود. جهت کاهش مومنتم و تلاطم جریان، در بالادست دریچه جدا کننده یک سازه آرام کننده جریان تعبیه شد. دریچه ورودی یک عمق اولیه را برای جریان

ایجاد می‌نمود. سپس با بالا کشیدن دریچه ورودی، جریان غلیظ وارد مخزن آب می‌شد و به در زیر توده آب ساکن به سمت پایین دست حرکت می‌کرد و در پایین با استفاده از سیستم زهکش جریان غلیظ به خارج از آزمایشگاه تخلیه می‌شد. در طول آزمایش آب معمولی به آزمایش اضافه می‌شد تا جایگزین آب تخلیه شده توسط جریان غلیظ گردد و رقوم آب را ثابت نگه دارد. آب اضافه شده به فلوم ابتدا وارد یک تانک با ارتفاع ثابت می‌شد. در نظر گرفتن تانک با سطح آب ثابت برای آب معمولی به منظور کنترل بهتر جریان و حذف نوسانات دبی آب بود. آب معمولی پس از تانک با سطح آب ثابت وارد حوضچه آرامش در انتهای فلوم می‌شد تا باعث ایجاد تلاطم در آب ساکن نشود. در انتهای پایین دست فلوم یک شیر فلکه رقوم آب در فلوم را کنترل می‌نمود.

سرعت جبهه جریان با توجه به طی کردن مسافت مشخص بین ایستگاه‌های مختلف در زمان‌های مشخصی محاسبه می‌شد. در آزمایشات با اضافه کردن ماده رنگی حرکت جریان غلیظ در زیر توده ساکن سیال بطور مشخص قابل رویت می‌شد. آزمایشات اندازه‌گیری سرعت جریان در مقطع ثابت ۲۰ سانتی متری، مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتی متری و یک مقطع واگرا انجام شد. در مقطع واگرا عرض مقطع از ۲۰ سانتی متر به ۷۲/۵ سانتی متر تغییر می‌نمود. زاویه تغییر در این مقطع ۸ درجه منظور شد، علت انتخاب این زاویه محدودیت‌های مدل جهت اتخاذ زوایای بزرگتر بود زیرا در زاویه‌های بزرگتر نیاز به فلوم با عرض بزرگتر بود تا به تبع آن طول واگرایی مناسب جهت اندازه‌گیری سرعت پیشانی جریان غلیظ فراهم گردد. در آزمایشات مقطع واگرا، جریان غلیظ پس از خارج شدن از زیر دریچه ابتدا وارد مقطع با عرض ۲۰ سانتیمتر و طول ۱۵۰ سانتی‌متر می‌شد و پس از طی این مسیر وارد مقطع واگرا می‌گردید.



شکل ۱- نمای شماتیک یک جریان غلیظ



شکل ۲- نمای شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۳- نمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۳- مدل ریاضی

u ، v و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در مختصات کارترین (x, y, z) و یا مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) می‌باشد.

شبهه سازی جزئیات جریان با کاربرد نرم افزار Flow 3D انجام یافته است. Flow 3D یک نرم افزار متداول با تواناییهای وسیع برای شبهه سازی جریانهای ۳ بعدی است. معادلات مورد استفاده این مدل جهت این پژوهش شامل اصل بقا جرم و مومنتم به شرح زیر است.

A_x ، A_y ، A_z به ترتیب مساحت‌های المان در جهت عمود بر مؤلفه‌های x ، y و z می‌باشد. ضریب R و ξ مربوط به نوع سیستم مختصات بوده و در مختصات کارترین $R=1$ و $\xi=0$ می‌باشد. ترم اول (RDIF) در سمت راست معادله (۱۵) ترم پخشیدگی ناشی از آشفتگی جریان بوده و عبارتست از:

الف: معادله عمومی بقا جرم

(۱۵)

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

که در آن V_F : حجم سیال، ρ : چگالی سیال، $RSOR$: ترم چشمه جرم می‌باشد.

$$(۱۶) \quad RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\partial \rho v_\rho A_x}{\partial x}$$

ب : معادلات مقدار حرکت
 معادلات حرکت سیال در ۳ بعد شامل معادلات ناویر استوکس با پاره‌های ترمهای اضافه تر بشرح زیر می‌باشند.

ضریب ν_p برابر است با $\frac{C_p \mu}{\rho}$ که μ ضریب ویسکوزیته و C_p عدد اشمیت تلاطم می‌باشد. RDIF پخشیدگی ناشی از آشفتگی جریان در داخل سیال با چگالی متفاوت می‌باشد. ترم دوم RSOR در سمت راست معادله (۱۵) چشمه جرم بوده که مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{I}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{I}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (17)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{I}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v u}{x V_F} = -\frac{I}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad (18)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{I}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{I}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad (19)$$

مدل فیزیکی برای دامنه وسیعتری از دبی اجرا که نتایج آن در ادامه تشریح می‌گردد.

که در آن G_x, G_y, G_z : شتابهای جرمی در جهات x, y, z و f_x, f_y, f_z : شتابهای گرانی در جهات x, y, z می‌باشد. جهت مدل نمودن جریان متلاطم در این تحقیق از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است.

۴- نتایج و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج و بحث پیرامون سرعت پیشانی جریان

سرعت پیشانی جریان غلیظ به عوامل زیادی بستگی داشته که امکان دخالت تمام آنها جهت دستیابی به یک معادله عمومی امکان پذیر نیست. در نتیجه در این تحقیق سعی گردید تا از عواملی که نقش کمتری در سرعت پیشانی جریان غلیظ دارند از آنها صرف نظر شود. ضمناً روابط برای دو شیب به طور جداگانه استخراج و بدون بعد ارائه گردد. با توجه به رابطه ۱۴، پارامتر سرعت بدون بعد پیشانی جریان $(U_f / (g'q)^{1/3})$ تابعی از شیب (S) و دبی بی بعد $(q / \sqrt{g'H^3})$ فرض شد و رابطه موجود بین سرعت بی بعد با شیب و دبی بی بعد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققان در خصوص سرعت جبهه جریان در فلوم با مقطع ثابت انجام شده است، لذا در تحقیق حاضر ابتدا داده‌های سرعت جبهه جریان در مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتی متر و مقایسه این داده‌ها با داده‌های دیگر محققان مد نظر قرار گرفت. در نمودار شماره ۱ کلیه داده‌های سرعت بی بعد پیشانی جریان در مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتی متر و در ۳ شیب ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۲ برای این تحقیق و دیگر محققان بصورت تابعی از شیب ترسیم گردید. همانطور که در نمودار دیده می‌شود، داده‌های این تحقیق و داده‌های دیگر محققان دارای پراکندگی زیاد می‌باشند. آلتیناکار و همکاران این پراکندگی را حاصل خطای آزمایشگاهی و ضرایب دراگ متفاوت دانستند. حقی یابی (۲۰۰۴) نیز در تحقیق مشابهی به

مدل سازی زبری سطوح جامد

در سطوح جامد می‌توان با تعریف زبری تنش‌های برشی دیوار را اصلاح نمود. زبری دارای دیمانسیون طول بوده و با اضافه کردن آن به ویسکوزیته مولکولی در محاسبه تنش برشی مدل می‌گردد. بنابراین تنش برشی دیوار در جریان لایه ای برابر است با

$$\rho(\nu + ku) \frac{u}{\delta y} \quad (20)$$

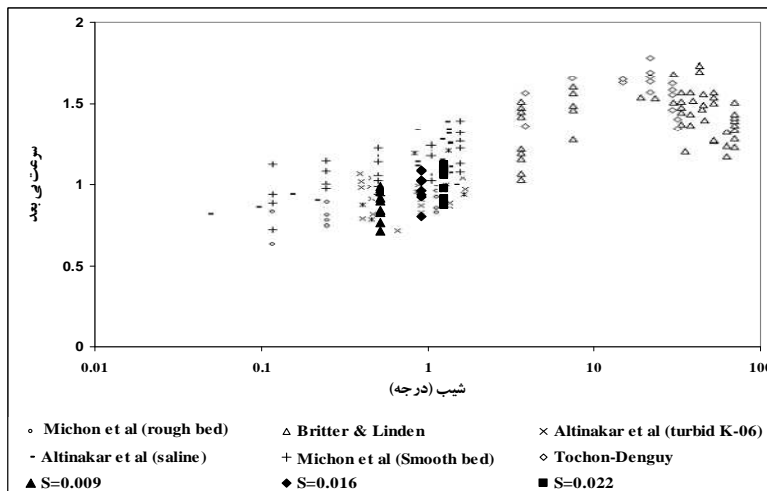
k : زبری، برای جریانهای متلاطم روابط قانون دیوار همانند سطوح صاف باقی مانده و فقط ویسکوزیته از ν به $\nu + ku$ تغییر می‌یابد. در هر بار مدل سازی ابتدا ژئومتری مدل در نرم افزار اتوکد ایجاد و به مدل وارد می‌گردید. سپس توسط مدل و با رعایت محدودیت‌های آن شبکه‌بندی می‌گردد. پس از آن شرایط اولیه، شرایط مرزی، خصوصیات سیال‌های جریان غلیظ و سیال پیرامون (آب زلال) به مدل معرفی گردیده و مدل اجرا می‌شود. پس از اجرای مدل نتایج آن با نتایج مدل فیزیکی مقایسه و در صورت عدم تطابق با تغییر زبری در هر شیب برای یک دبی، مدل اجرا شده و بدینوسیله مدل ریاضی کالیبره می‌شود. بعد از کالیبراسیون مدل برای شیب مورد نظر، نتایج مدل با تغییر دبی در مدل فیزیکی برای همان شیب صحت سنجی می‌شود. در ادامه مدل ریاضی با حفظ شرایط موجود در

در نمودار شماره ۳ نیز سرعت بی بعد پیشانی جریان در مقطع واگرایی ۸ درجه و در ۳ شیب ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۲ بصورت تابعی از دبی بعد و شیب ارائه گردیده است.

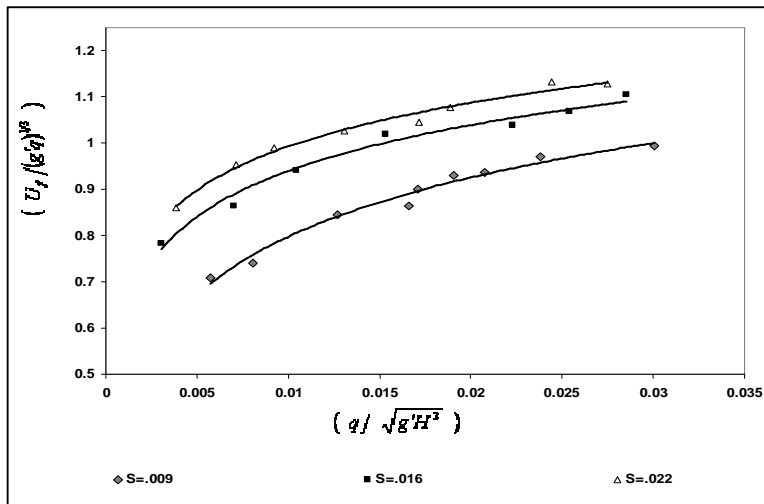
در مقطع واگرا عرض مقطع از ۲۰ سانتی متر با زوایای ۸ درجه به ۷۲/۵ سانتی متر می رسد. بنابراین جهت مقایسه سرعت پیشانی جریان غلیظ در مقطع واگرای ۸ درجه با مقاطع ثابت آزمایشات در دو مقطع ثابت با عرض ۲۰ و ۷۲/۵ سانتی متر نیز انجام شد که نتایج آن در نمودار شماره ۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود سرعت بی بعد پیشانی جریان در مقطع واگرا از دو مقطع ثابت ۲۰ و ۷۲/۵ سانتی متر بیشتر است. به نظر می رسد که این افزایش سرعت ناشی از اختلاف هد ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در ابتدای مقطع واگرا (مقطع با عرض ۲۰ سانتیمتر) و انتهای مقطع واگرا (مقطع با عرض ۷۲/۵ سانتیمتر) باشد. همچنین سرعت پیشانی جریان در مقطع ثابت ۲۰ سانتی متر از مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتی متر کمتر است که این کاهش سرعت ناشی از اثر دیواره جریان می باشد. همچنین با توجه به نمودارهای ۲، ۳ و ۴ می توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات سرعت پیشانی به گذر حجمی جریان روند نزولی داشته و از یک منحنی درجه ۲ با ضریب همبستگی (R^2) بیشتر از ۹۸ درصد تبعیت می نماید.

نتایج مشابه دست یافت و پراکندگی داده ها را ناشی از خطای آزمایشات دانست. در این تحقیق با انجام آنالیز ابعادی پارامتر دیگری بنام دبی بی بعد موثر تشخیص داده شد و سرعت بی بعد پیشانی جریان در مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتی متر و در ۳ شیب ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۲ (داده های نمودار شماره ۱) بصورت تابعی از دبی بعد و شیب در نمودار شماره ۲ ترسیم گردید. با توجه به یکسان بودن داده ها در نمودارهای ۱ و ۲ می توان چنین نتیجه گیری نمود که عدم در نظر گرفتن دبی بی بعد جریان در نمودار شماره ۱ باعث ایجاد چنین پراکندگی ها شده است. از آنجائی که مقدار g' و H در آزمایشات ثابت در نظر گرفته شد، بنابراین تغییرات پارامتر دبی بی بعد در این تحقیق تنها ناشی از تغییرات دبی جریان بوده و در نتیجه این تغییرات باعث ایجاد پراکندگی در شکل شماره ۱ شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان چنین اظهار نمود که پارامتر دبی بی بعد یک پارامتر مهم و تأثیرگذار در رابطه سرعت پیشانی جریان غلیظ بوده و سرعت بی بعد پیشانی جریان غلیظ در یک مقطع مشخص (مقطع ثابت یا واگرا) تابعی از دبی بی بعد و شیب کف می باشد، یعنی:

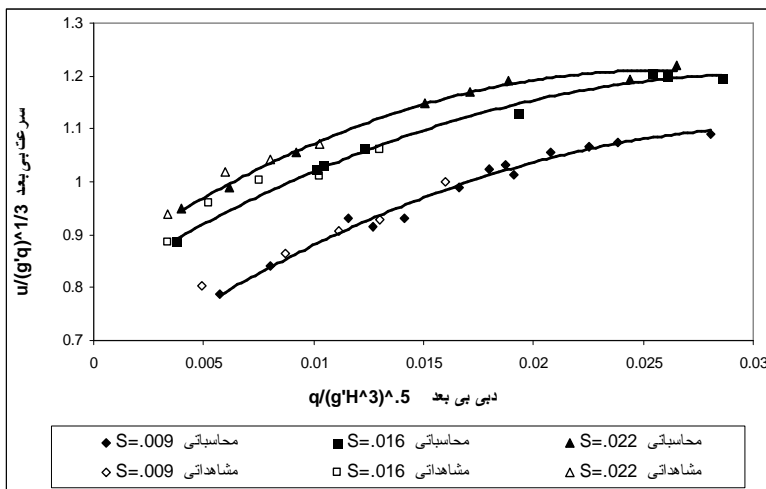
$$U_f / (g'q)^{1/3} = f(S, q / \sqrt{g'H^3}) \quad (10)$$



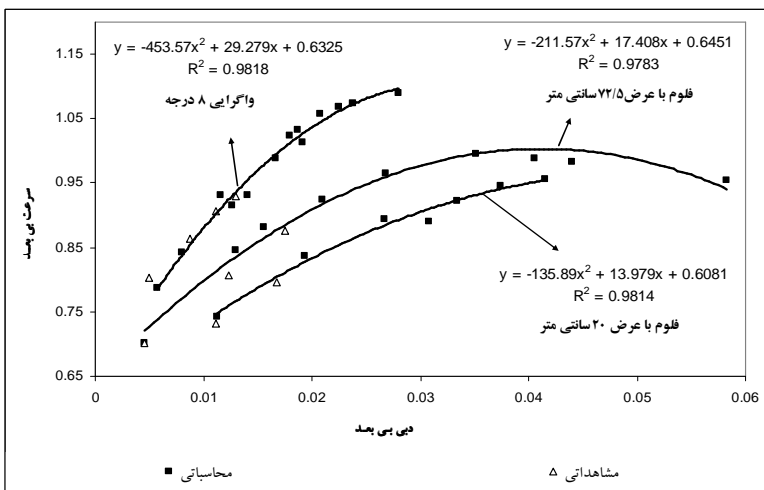
نمودار ۱- سرعت بی بعد بصورت تابعی از شیب در مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتیمتر و مقایسه آن با داده های دیگر محققان



نمودار ۲- سرعت بی بعد بصورت تابعی از دبی بی بعد و شیب در مقطع ثابت ۷۲/۵ سانتیمتر



نمودار ۳- سرعت بی بعد بصورت تابعی از دبی بی بعد و شیب در مقطع واگرایی ۸ درجه



نمودار ۴- رابطه بین سرعت بی بعد و دبی بی بعد در شیب ۰/۰۹+/ و مقاطع ثابت ۲۰ و ۷۲/۵ سانتیمتر و واگرایی ۸ درجه

۴-۲- نتایج و بحث پیرامون سرعت بدنه جریان

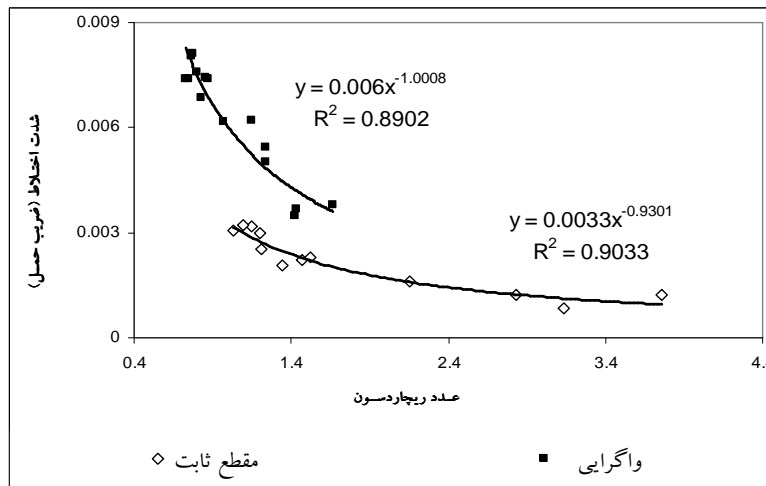
اندازه گیری سرعت در بدنه جریان غلیظ توسط دستگاه لیزر داپلر انجام شد شکل شماره (۴) . با توجه به اینکه این دستگاه جهت اندازه گیری سرعت از سیستم لیزر استفاده نموده و سنسور آن وارد جریان نمی گردد، بنابراین به علت عدم ایجاد اختلاط در بدنه جریان نتایج اندازه گیری ها دقیق تر می باشد. ابتدا ۱۵ آزمایش جهت محاسبه شدت اختلاط در مقطع با عرض ثابت ۲۰ سانتی متر (عرض ابتدای واگرایی) انجام شد. سپس ۱۵ آزمایش دیگر در مقطع واگرا با زاویه ۲۲ درجه انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. در تمام آزمایشات شدت اختلاط با متوسط عدد ریچاردسون مرتبط گردید. نتایج در نمودار شماره ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در نمودار شماره ۵ روابط زیر برای اختلاط آب با جریان غلیظ بدست آمد.

$$R^2 = 0.89 \quad E_w = 0.0033 / R_i^{0.9301}$$

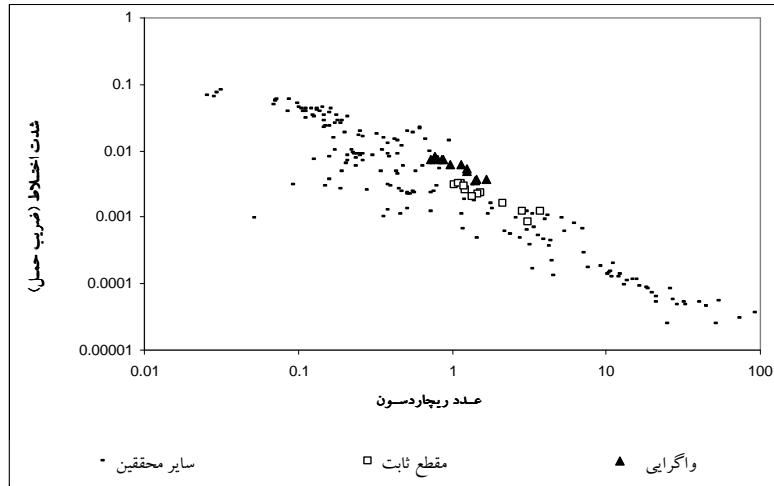
$$R^2 = 0.90 \quad E_w = 0.006 / R_i^{1.0008}$$

با توجه به یکسان بودن شرایط جریان در مقطع ثابت و مقطع واگرا و توجه به نمودار شماره ۵ می توان چنین استنباط نمود که عدد ریچاردسون در مقطع واگرا نسبت به مقطع ثابت دارای مقادیر کمتری می باشد. همچنین شدت اختلاط در مقطع واگرا نسبت به مقطع ثابت در اعداد ریچاردسون یکسان دارای مقادیر بیشتری می باشد و این موضوع را می توان ناشی از تلاطم ایجاد شده در مقطع واگرا دانست . به منظور مقایسه مشاهدات با نتایج دیگر محققین

نتایج در نمودار شماره ۶ نشان داده شده است. در بعضی از آزمایشات انجام شده در مقطع واگرایی پدیده پرش هیدرولیکی در مقطع جریان مشاهده گردید که این پدیده در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. جهت بررسی این پدیده پروفیل سرعت جریان در خط مرکزی واگرایی و در فواصل ۱۰ سانتی متری برداشت و پس از آن عدد ریچاردسون محاسبه گردید. تغییرات عدد ریچاردسون نسبت به ابتدای واگرایی در نمودار شماره ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود عدد ریچاردسون ابتدا کاهش یافته و از ۱ کمتر می گردد و لذا جریان فوق بحرانی می شود. پس از آن عدد ریچاردسون شروع به افزایش نموده به طوریکه از ۱ بیشتر شده و جریان زیر بحرانی می شود و لذا تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی با یک پرش هیدرولیکی همراه خواهد بود. علت افزایش سرعت در مقاطع اولیه واگرایی اختلاف حد عمق جریان در مقطع باریک و زیاد برای یک دبی ثابت است. حال در بعضی از آزمایشات جریان هم در مقطع باریک و هم مقطع با عرض زیاد فوق بحرانی بود و لذا در جریان پرش هیدرولیکی مشاهده نشد. همچنین در بعضی از آزمایشات عدد ریچاردسون در ابتدای واگرایی آنقدر زیاد بود که اختلاف هد عمق جریان در مقطع باریک و زیاد برای یک دبی ثابت قادر به تغییر رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی نبود و لذا جریان در همه مقاطع زیر بحرانی باقی می ماند و بنابراین پدیده پرش هیدرولیکی اتفاق نمی افتد . در هر صورت این پدیده نیاز به بررسی بیشتر دارد.



نمودار ۵- رابطه بین عدد ریچاردسون و شدت اختلاط در بدنه جریان غلیظ



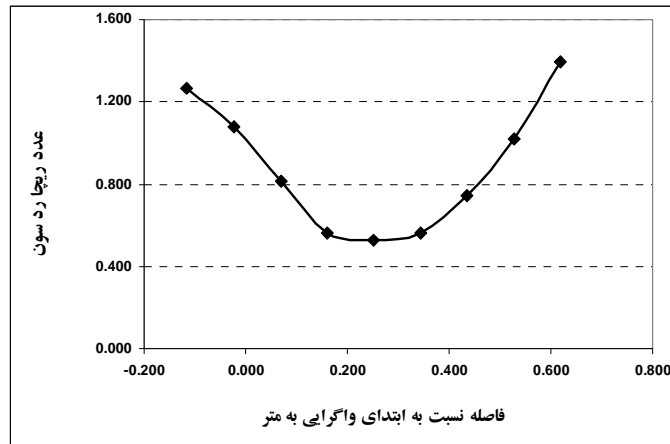
نمودار ۶- رابطه بین عدد ریچاردسون و شدت اختلاط در بدنه جریان غلیظ انجام شده توسط سایر محققین و تحقیق حاضر



شکل ۴- اندازه گیری سرعت بدنه جریان غلیظ توسط دستگاه لیزر داپلر



شکل ۵- وقوع پرش هیدروویلیکی در بدنه جریان غلیظ، واگرایی ۲۲ درجه، شیب ۱۶ در ۱۰۰۰



نمودار ۷- تغییرات عدد ریچاردسون در واگرایی ۲۲ درجه و شیب کف ۰.۱۶٪ و دبی ۱ لیتر بر ثانیه

۵- نتایج

- ۱- همانطور که مشاهده شد هم در مقطع واگرایی ۸ درجه و هم در مقطع ثابت سرعت متوسط بی بعد پیشانی جریان تابعی از شیب کف و دبی بی بعد جریان می‌باشد.
- ۲- با افزایش دبی جریان در مقطع واگرایی ۸ درجه و مقطع ثابت مذکور میزان افزایش سرعت جریان پیشانی از یک منحنی درجه ۲ با مشتق مرتبه دوم منفی تبعیت می‌نماید.
- ۳- مدل Flow 3D سرعت پیشانی جریان غلیظ را با دقت بالا برآورد نموده و بنابراین مدل مناسبی جهت مدل نمودن سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد.
- ۴- شدت اختلاط در بدنه جریان غلیظ در واگرایی ۲۲ درجه نسبت به مقطع ثابت دارای مقادیر بیشتری می‌باشد.
- ۵- در بعضی از آزمایشات و در شرایط خاصی پدیده پرش هیدرولیکی مشاهده شد که این پدیده نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۶- تشکر

این تحقیق با حمایت‌های مالی دفتر تحقیقات معاونت توسعه سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام شده که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Underflow
- 2- Interflow
- 3- Overflow
- 4- Density Currents
- 5- Gravity Currents
- 6- Turbidity Currents

۷- مراجع

- قمشی، مهدی؛ بررسی آزمایشگاهی حرکت جریانهای غلیظ، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، صص ۲۶۰-۲۴۹، ۱۳۷۶.
- Altinakar, M.S., Graf, W.H. and Hopfinger, E.J. (1990), Weakly depositing turbidity current on a small slope, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No.1.
- Altinakar, M. S. (1988), Weakly depositing turbidity current on a small slope, Thesis No 738, *Sciences Techniques*, EPF Lausanne.
- Britter, R.E., and Linden, P. (1980), The motion of the front of a gravity current traveling down an incline, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 99, No.3, pp. 531-543.
- Chikita, K. (1990), Sedimentation by river - induced Turbidity currents; field measurements and interpretation, *Sedimentology*, vol. 37, pp. 891-905.
- De Cesare, G., Schleiss A. and Hermann, F. (2001), Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 1.
- De Cesare, G., Schleiss, A. and Hermann, F. (2002), Closure to: impact of turbidity currents on reservoir sedimentation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 6, pp.645-646.
- Ghomeshi, M. (1995), "Reservoir sedimentation modeling", Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia.
- Haghiabi, A. H. (2004), "The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents", Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

- Middleton, G.V. (1966), Experiments on density and turbidity currents, motion of the head, Canadian *Journal of Earth Science*, No. 3, pp. 523-546.
- Parker, G., Garcia M. and Fukushima, Y. (1987), Experiments on turbidity currents over an erodible bed, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1.
- Ross, A.N., Linden, P.F. and Dalziel, S.B. (2002), A study of three-dimensional gravity currents on a uniform slope, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 453, No.1, pp.239 – 261.
- Turner, J.S. (1973), "*Buoyancy effects in fluids*", Cambridge University Press, London, England.
- Turner, J.S. (1979), "*Buoyancy effects in fluids*", Cambridge University Press, London, England.
- Horsch, G. M. (2004), "*The Structure of Two-Dimensional, Steady*", Miscible Laminar Density Currents Flowing Down an Incline, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 2.
- Keulegan, G.H. (1957), "*The motion of saline fronts in still water, Twelfth Progress Report on model laws for density currents*", U.S. Natl. Bur. Standards Rept.
- King, S.E., Woods, A.W. (2003), Dipole solutions for viscous gravity currents: theory and experiments, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 483, No.1, pp. 91– 109.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۷ تیر ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۲۵ فروردین ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹ تیر ۱۳۸۶