# Archive of SID



سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) ۵۶-۶۷



### Head Velocity and Entrainment of Density Current in an Expansion Reach

H. Torabi Poudeh<sup>1</sup>, M. Fathi Moghadam<sup>2</sup>,
 M. Ghomeshi<sup>3</sup> and M. Shafai-Bajestan<sup>4</sup>

#### 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 twodimensional laser Doupler was used to develop the flow body velocity profile. The measurements showed that mixing values were higher in a divergent crosssection 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 <sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم <sup>۲</sup>، مهدی قمیشی<sup>۳</sup> و محمود شفاعی بجستان <sup>۴</sup>

#### چکیدہ

دانستن سرعت جبهه و شدت اختلاط جريان غليظ در مخازن سدها و دریاها بسیار حائز اهمیت میباشد. یکی از پارامترهای بسیار مؤثر در تغییر هيدروليک جريان غليظ، تغييرات مقطع عرضي رودخانه قبل از ورود به مخازن سدها است. لذا در مقاله حاضر تأثير تغييرات ميزان گذر جريان 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 می گیرد. در بعضی از آزمایشات نیز بسته به میزان جریان ورودی غلیظ و شیب بستر در مقطع واگرا پرش هیدرولیکی مشاهده شد که این پدیده نیز بررسی و نتایج مربوطه ارائه گردید.

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

دانشجوی دکترای 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

Ph.D. Student, School of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran, University, Ahwaz, Iran
 Assistant Professor, School of Water Sciences and Engineering, Shahid

Chamran, University, Abwaz, Iran
 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 – مقدمه

اگر سیالی با چگالی معلوم وارد یک سیال تقریباً ساکن باچگالی متفاوت گردد، ممکن است بصورت زیرجریان'، میان جریان' یا روجریان ۲ درآید. وقوع هر کدام از این حالات بستگی به تفاوت چگالی سیال ورودی و سیال ساکن دارد. به این جریانها، جریانهای غلیظ یا جریانهای ثقلی<sup>۵</sup> اطلاق می شود اگر اختلاف چگالی بخاطر مواد معلق باشد به این جریانها کاطلاق می گردد 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 شکل گیری توپو گرافی کف آنها دارند. در دریاها نيز ذرات با اندازه سيلت و رس بصورت بار معلق توسط رودخانهها و به کمک جریانهای غلیظ به ناحیه زیرین دریاها منتقل می شود. در شکل ۱، حرکت جریان غلیظ یک بعدی با چگالی  $\rho_d = \rho_1$  با heta سرعت متوسط U در جهت x روی یک سطح شیب دار با زاویه hetaدر زير يک توده سيال ساکن عميق تر با چگالي  $\rho_a = \rho_2$  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 می شود که سیال اطراف تأثیر کاهندهای روی نیروی ثقل دارد و ضریب کاهش به صورت  $\Delta
ho/
ho_2$  میباشد. در نتیجه شتاب ثقل مؤثر بصورت زیر محاسبه می گردد :

$$g' = g(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2 = g\Delta\rho/\rho_2$$
 (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 موثر است عدد فرود میباشد. این عدد به صورت زیر بیان می گردد.

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

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

$$Ri = l/ Fr_D^2 = (g'h\cos\theta)/U^2$$
(٣)

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

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 اندازه گیری سرعت ازیک 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 (1957) Keulegan است که بصورت زیر بیان می شود.

$$U_f = 0.75 \sqrt{g' h_f} \tag{(f)}$$

رابطه دیگری Turner(1973,1979). نخامت جبهه جریان $h_f$  مشابه رابطه فوق به شکل زیر ارائه نمود.

$$U_f = \sqrt{2}\sqrt{g'h} \tag{(a)}$$

h : عمق جريان

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

$$U_f = 0.63 \sqrt{g' h_f} \tag{(5)}$$

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.

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

تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 54 ان €

www.SID.ir

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.

$$\frac{U_f}{(g'q)^{\frac{l}{3}}} = f(S, \frac{q}{\sqrt{g'H^3}})$$
(A)

Britter and Linden (1980) نیز بر روی سرعت پیشانی جریان مطالعاتی انجام دادند که نتایج این تحقیقات در نمودار شماره ۱ دیده می شود. (1995) Ghomeshi با انجام تحقیقات آزمایشگاهی معادله ای جهت بر آورد سرعت پیشانی جریان ارئه 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 می می می شد و بصورت نسبت سرعت اختلاط  $W_h$  به سرعت متوسط جریان U تعریف می شود (Turner, 1973). محققان با انجام آزمایشهای گوناگون بر روی جریانهای غلیظ دریافتند ضریب شدت داختلاط ( $E_w$ ) تابعی ازعدد ریچاردسون می باشد. (1990) Chikita (تحقیقاتی را در ژاپن انجام دادند. آنها رابطه زیر را برای میزان اختلاط بدست آوردند :

$$E_w = 0.0087 \exp\left(-\frac{0.106}{Ri}\right) \tag{A}$$

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

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

$$E_w = \frac{0.0024}{Ri^{1.06}}$$
(1.)

(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.

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

در خصوص هيدروديناميک جريان غليظ اخيراً نيز تحقيقاتي توسط King and Woods (2003) (Ross et al. (2002)، Horsch (2004) ، De Cesare et al. (2001,2002) 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<sub>f</sub> میباشد. این پارامتر را میتوان براساس معادله زیر به پارامترهای مستقل جریان ارتباط داد .

$$U_f = \Phi(g', q, H, S, \nu, \alpha) \tag{17}$$

زاويه واگرايى q: شدت جريان غليظ ورودى S: شيب كف  $\kappa$  : ازجت سينماتيک H: عمق آب زلال + عمق جريان غليظ  $\nu$  : شتاب ثقل مؤثر g'

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

$$U_f / (g'q)^{l/3} = \Phi\left(q / \sqrt{g'H^3}, S, R_e, \alpha\right) \tag{17}$$

با توجه به رابطه شماره ۱۳ ، پارامتر سرعت بدون بعد پیشانی جریان ( $\alpha$ ) ، با توجه به رابطه شماره ۱۳ ، پارامتر سرعت بدون بعد پیشانی جریان ( $\alpha$ ) ،  $\left(\frac{g'q}{g'q}\right)^{l/3}$  ) میباشد. عدد رینولدز ( $R_e$ ) ، و دبی بی بعد ( $R_e$ ) ، راویه واگرایی غلیظ ناشی از 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 ( $U_f/(g'q)^{l/3}$ ) به صورت تابعی از شیب عدد پیشانی جریان ( $N_f$ ) ، به صورت تابعی از شیب ( $R_e$ ) و دبی بی بعد ( $R_e$ ) ، رائه گردید. یعنی ( $R_e$ ) ، رائه ( $R_e$  ،  $R_e$  ، رائه ( $R_e$ ) ، رائه ( $R_e$ ) ، ( $R_e$  ، ( $R_e$ ) ، ( $R_e$ ) ، ( $R_$ 

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

تحقيقات منابع آب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 53 ان م

این تحقیق تلاش دارد روابط حاکم بین پارامتر وابسته بی بعد سرعت پیشانی جریان  $U_f / (g'q)^{l/3}$  را با پارامترهای بیبعد مستقل  $S,q / \sqrt{g'H^3}$  برای یک مقطع واگرا بررسیوتجزیه وتحلیل 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 ازمایشات، همه ابزارهای اندازهگیری به نحو مناسب آماده و فلوم از آب معمولی پر می شد . 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 می شد. سیال غلیظ تولید شده از طریق خط لوله و با شدت ثابت از مخزن اختلاط به یک منبع با ارتفاع ثابت (هد تانک) پمپاژ می شد و سپس از تانک توسط یک سیستم لوله و شیر فلکه به داخل فلوم هدایت می گردید. دبی جریان غلیظ ورودی به فلوم با استفاده از یک شیر فلکه تنظیم می شد. 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 می کرد. بخش طویل تر در پایین دست نقش مخزن را داشت که جریان غلیظ از زیر آن حرکت می کرد 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 می نمود . سپس با بالا کشیدن دریچه ورودی ، جریان غلیظ وارد مخزن آب می شد و به در زیر توده آب ساکن به سمت پایین دست حرکت می کرد و در پایین با استفاده از سیستم زهکش جریان غلیظ به خارج از آزمایشگاه تخلیه می شد. در طول آزمایش آب معمولی به آزمایش اضافه می شد 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 می شد . در نظر گرفتن تانک باسطح آب ثابت برای آب معمولی به منظور کنترل بهتر جریان و خذف نوسانات دبی آب بود. آب معمولی پس از تانک باسطح آب ثابت وارد حوضچه آرامش در انتهای فلوم می شد تا باعث ایجاد تلاطم در آب ساکن نشود. در انتهای پایین دست فلوم یک شیر فلکه رقوم آب در فلوم را کنترل می نمود .

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 اندازه گیری سرعت جریان در مقطع ثابت ۲۰ سانتی متری ، مقطع ثابت ۲۲/۵ سانتی متری و یک مقطع واگرا انجام شد. در مقطع واگرا عرض مقطع از ۲۰ سانتی متر به ۲۲/۵ سانتی متر تغییر می مود. 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 اندازه گیری سرعت پیشانی جریان غلیظ فراهم گردد. در آزمایشات مقطع واگرا، جریان غلیظ پس از خارج شدن از زیر مریچه ابتدا وارد مقطع با عرض ۲۰ سانتیمتر و طول ۱۵۰ سانتی متر میشد و پس از طی این مسیر وارد مقطع واگرا می گردید.



# Archive of SID



شکل ۲- نمای شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۳- نمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی

## ۳-۳- مدل ریاضی

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

# الف: معادله عمومي بقا جرم

(۱۵)  $V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v A_z) + \frac{\sigma u A_x}{x} = RDIF + RSOR$ که در آن  $V_F$  : حجم سیال،  $\rho$ : چگالی سیال RSOR: ترم چشمه جرم میباشد.

v، u و w به ترتیب مؤلفه های سرعت در مختصات کارتزین v, u (x,y,z) و یا مختصات استوانه ای (r, ,z)  $\theta$  می باشد.

 $A_{z} A_{y} A_{y} A_{z} A_{$ 

 $RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\rho} A_{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\rho} A_{y} R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{\rho} A_{z} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_{\rho} A_{x}}{x}$ 

تحقيقات منابع أب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۲۸۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 51 ان الح

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

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

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{I}{V_F} \left[ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{I}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \tag{19}$$

x,y,z و مدل فیزیکی برای دامنه وسیعتری از دبی اجرا که نتایج آن در ادامه شد. جهت تشریح می گردد.

## ۴- نتایج و تحلیل نتایج

## ۱-۴ 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 ( $U_f / (g'q)^{l/3}$ ) تابعی از شیب (S) و دبی بی بعد با فرض شد و رابطه موجود بین سرعت بی بعد با  $\left( \begin{array}{c} q/\sqrt{g'H^3} \end{array} \right)$ شيب و دبي بي بعد مورد بررسي قرار گرفت. با توجه به اينكه 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 ، ۱۶/۰ و ۰/۰۲۲ برای این تحقیق و دیگر محققان بصورت تابعی از شیب ترسیم گردید. همانطور که در نمودار دیده می شود، 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

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

## 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 می گردد. بنابراین تنش برشی دیوار در جریان لایه ای برابر است با

$$\rho(v+ku)\frac{u}{\delta v} \tag{(7.)}$$

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

تحقيقات منابع أب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 50 ان المعار نتایج مشابه دست یافت و پراکندگی دادهها 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 سانتیمتر و در ۳ شیب ۰/۰۰۰۹ ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۲(دادههای نمودار شماره ۱) بصورت تابعی از دبی بعد و شیب در نمودار شماره ۲ ترسیم گردید . با توجه به یکسان بودن دادهها 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 یراکندگیها شده است. از آنجائی که مقدار g' و H در آزمایشات ثابت در نظر گرفته شد، بنابراین تغییرات پارامتر دبی بی بعد در این تحقيق تنها ناشي از تغييرات دبي جريان بوده و در نتيجه اين 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 میباشد ، يعنى :

در مقطع واگرا عرض مقطع از ۲۰ سانتی متر با زوایای ۸ درجه به ۷۲/۵ سانتی متر می رسید. 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 ۲۰سانتیمتر) و انتهای مقطع واگرا (مقطع با عرض ٧٢/٥ سانتيمتر) باشد. همچنين سرعت پيشاني جریان در مقطع ثابت ۲۰سانتی 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.

$$U_{f} / (g'q)^{l/3} = f(S, q / \sqrt{g'H^{3}})$$
 (1.)



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

تحقيقات منابع أب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 49 الأنهي Archive of SID



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 ۰۹+/۰ و مقاطع ثابت ۲۰ و ۷۲/۵ سانتیمتر و واگریی ۸ درجه

تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 48 ان م

۲-۴- 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.

 $E_w = .0033/ R_i^{.9301}$   $R^2 = .89$  مقطع ثابت  $E_w = .006/ R_i^{1.0008}$   $R^2 = .90$  مقطع واگرای ۲۲ درجه  $R^2 = .90$ 

با توجه به یکسان بودن شرایط جریان در مقطع ثابت و مقطع واگرا و توجه به نمودار شماره ۵ میتوان چنین استنباط نمود که عدد ریچاردسون در مقطع واگرا نسبت به مقطع ثابت دارای مقادیر کمتری میباشد. همچنین شدت اختلاط در مقطع واگرا نسبت به مقطع ثابت در اعداد ریچاردسون یکسان دارای مقادیر بیشتری میباشد و این موضوع را میتوان 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 نمیافتد . 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 هیدرولیکی در بدنه جریان غلیظ، واگرایی ۲۲ درجه ، شیب ۱۶ در

تحقيقات منابع آب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۲۰ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 46 ان م



نمودار ۷- تغییرات عدد ریچاردسون در واگرایی ۲۲ درجه و شیب کف ۱۶./. و دبی ۱ لیتر بر ثانیه

۷- مراجع

- 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.

# ۵- نتايج

۱- همانطور که مشاهده شد هم در مقطع واگرایی ۸ درجه و هم در مقاطع ثابت سرعت متوسط بی بعد پیشانی جریان تابعی از شیب کف و دبی بی بعد جریان می باشد.

۲- با افزایش دبی جریان در مقطع واگرایی ۸ درجه و مقاطع 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 می باشد.

۴- شدت اختلاط در بدنه جریان غلیظ در واگرایی ۲۲ درجه نسبت به مقطع ثابت دارای مقادیر بیشتری می باشد

۵- در بعضی از آزمایشات و در شرایط خاصی پدیده پرش هیدرولیکی مشاهده شد که این پدیده نیاز به بررسی بیشتر دارد.

8- 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 می گردد.

پینوشتھا

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

تحقيقات منابع أب ايران، سال سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶ Volume 3, No. 1, Spring 2007 (IR-WRR) 45 الأح

- 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