

## شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و ژئومتری بر نقطه غوطه‌وری در جریان‌های غلیظ

حسن گلیج<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، جواد احدیان<sup>۳\*</sup> و حامد ارجمندی<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز ([ja\\_ahadiyan@yahoo.com](mailto:ja_ahadiyan@yahoo.com))

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۹/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲

### چکیده

در برخورد توده جریان غلیظ با توده سیال ساکن، جریان غلیظ به درون سیال ساکن نفوذ نموده و مکان غوطه‌وری ایجاد شده و عمق غوطه‌وری در بدو آن تشکیل می‌شود. با توجه به این‌که در محل غوطه‌وری مرز بین جریان غلیظ با سیال پیرامون مشخص می‌گردد، برآورد ارتفاع این نقطه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر سیال ساکن که بر نقطه غوطه‌وری تأثیر گذار است، بررسی شده است. برای نیل به اهداف این تحقیق ابتدا یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران ساخته شد و آزمایش‌های مختلف در آن انجام گردید. در تمامی آزمایش‌ها ارتفاع غوطه‌وری در دبی‌های مختلف از جریان غلیظ و تفاوت چگالی ۶، ۹، ۱۳ و ۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب برای سه شیب ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از مدل ریاضی Flow-3D ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شرایط آزمایشگاهی موجود شبیه‌سازی شد. بررسی مقایسه‌ای نشان داد که عمق غوطه‌وری برآورد شده با استفاده از Flow-3D نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر بوده به گونه‌ای که به طور متوسط برای شیب ۱۲ درصد مدل ریاضی حدود ۳۰ درصد نتایج را بیشتر پیش‌بینی نموده و این در حالی است که برای کلبه شیب‌ها به طور متوسط نتایج حاصل از مدل، ۲۷ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین بررسی‌های آماری انجام شده نشان داد که نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر پیش‌بینی شده به طور متوسط در حدود ۰/۸ می‌باشد.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ، نقطه غوطه‌وری، Flow-3D، مدل فیزیکی.

### Effect of Hydraulic and Geometric Parameters on Plunge Point in Density Current

H. Goleji<sup>1</sup>, M. Ghomeshi<sup>2</sup>, J. Ahadiyan<sup>3\*</sup>, H. Arjmandi<sup>4</sup>

1- M.Sc. Graduated Student, Department of Water Structures, Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures, Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

3\* - Corresponding author, Assistant Professor, Department of Water Structures, Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

4- M.Sc. Graduated Student Department of Water Structures, Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

Received: 21 Feb. 2012

Accepted: 12 Dec. 2012

### Abstract

When the dense flow mass intersect to stagnant fluid, dense flow penetrates into statically fluid and plunge depth occurs. In this research, hydraulic parameters of density current and bed slope have been investigated, which these have a considering effect on plunge point. To achieve on purposes of this research a physical model in hydraulic laboratory of Shahid Chamran University was built and various experiments were performed. At all of the experiment, plunge depth was measured in the various discharges of density current,

different of density 6, 9, 13 and 16 kg/m<sup>3</sup> at three slope 8, 12 and 16 percent. Then using Flow-3D depth of plunge point for these experimental conditions was simulated. Findings show that depth of plunge point derived with Flow-3D is more than measured values as in 12% slope, mathematical model overestimate about 30%. While, for all of the slope bed, simulated results 27 percent is more than corresponding measured values. Statistical evaluation shows that ratio of measured valued to results of Flow-3D is about 0.8.

**Keywords:** Density current, Plunge point, Flow-3D, Physical model

### مقدمه

(مخزن) و جریان غلیظ می‌باشد و بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ غوطه‌ور شده در مخزن نظیر سرعت بدنه و پیشانی، میزان شدت اختلاط و غیره به این نقطه وابسته است، دانستن ارتفاع نقطه غوطه‌وری ضروری می‌باشد. لذا محققین فرمول‌های مختلفی جهت محاسبه عمق جریان غلیظ (hp در شکل ۱) در محل غوطه‌وری ارائه نموده‌اند (۱، ۲، ۱۰ و ۱۵). سینگ و شاه<sup>۱۰</sup> با بررسی پدیده‌های فیزیکی، عوامل مؤثر در تشکیل نقطه غوطه‌وری را شناسایی و با انجام تحلیل ابعادی و مطالعات آزمایشگاهی رابطه‌ای برای عمق نقطه غوطه‌وری ارائه نمودند. بر اساس مطالعات این محققین در نهایت رابطه ارتفاع غوطه‌وری به صورت زیر استخراج گردید (۱۴).

$$hp = 1.85 + 1.3 \left( \frac{q^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

که در این رابطه q: دبی جریان غلیظ در واحد عرض، g': شتاب ثقل دنسیمیتریک (که برابر با تغییرات دانسیته در شتاب ثقل است) و hp: ارتفاع نقطه غوطه‌وری است. قمشی در بررسی آزمایشگاهی با شیب کف ثابت و با استفاده از جریان غلیظ رسوبی و جریان غلیظ آب نمک و نیز استفاده از نتایج دیگر محققین روابطی را برای سرعت رأس جریان غلیظ ارائه نموده است. همچنین در تحقیقات وی ارتفاع رأس جریان به عنوان تابعی از دبی جریان غلیظ و شتاب ثقل دنسیمیتریک در نظر گرفته شده است (۹). حقی‌آبی رابطه بین سرعت جبهه جریان غلیظ و شدت جریان مستغرق را برای شیب ثابت ارائه نمود (۱۱). بر اساس تحقیقات آکیما و استفان<sup>۱۱</sup> مشخص گردیده که در عدد فرود دنسیمیتریک ۰/۶۸ نقطه غوطه‌وری به وقوع می‌پیوندد (۳۲). همچنین ساویج و بریمبرگ<sup>۱۲</sup> پدیده غوطه‌وری را در عبارات معادلات حرکت برای یک جریان متغیر تدریجی دولایه‌ای بررسی نمودند (۱۵). در تحقیقات ایشان توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیک فرض گردیده و شدت اختلاط

با وارد شدن یک سیال به درون سیال ساکن با چگالی متفاوت، ممکن است سه حالت زیر جریان، میان جریان یا رو جریان اتفاق بیفتد که وقوع هر یک از این حالات به مقدار اختلاف چگالی بستگی دارد. این تفاوت چگالی‌ها ممکن است به وسیله درجه حرارت، مواد محلول و ماده معلق به وجود آید. اگر چگالی جریان غلیظ ورودی  $\rho_{in} = \rho_1$  کمتر از چگالی سیال ساکن  $\rho_2 = \rho$  باشد، جریان غلیظ به صورت روجریان حرکت خواهد کرد. این در حالی است که چنانچه چگالی جریان غلیظ ورودی از چگالی سیال ساکن بزرگتر باشد زیرجریان اتفاق خواهد افتاد و اگر چگالی سیال ساکن در لایه‌های مختلف، متفاوت باشد، جریان غلیظ با توجه به چگالی سیال پیرامون به حرکت خود ادامه خواهد داد و حالت میان جریان روی می‌دهد؛ در حین وقوع هر یک از حالات یاد شده جریان از یک مقطع کنترل عبور خواهد کرد که از آن به نقطه غوطه‌وری<sup>۱</sup> یاد می‌شود (۷). مادامی که اختلاف چگالی به وسیله ماده معلق ایجاد می‌شود جریان‌های غلیظ<sup>۲</sup> یا جریان‌های ثقیلی<sup>۳</sup> در حالت زیرجریان حرکت نموده، که جریان‌های کدر<sup>۴</sup> نیز نامیده می‌شوند. بر اساس مطالعات گراف<sup>۵</sup> (۸) مثال‌های کاربردی از جریان‌های غلیظ در ارتباط با محیط جو شامل جبهه‌های سرد<sup>۶</sup>، بهمن‌ها<sup>۷</sup>، فرورفتگی‌های ناگهانی در آب‌های دریا<sup>۸</sup> و جریان پر رسوب<sup>۹</sup> در تقاطع ورود رودخانه به دریا و اقیانوس می‌باشد. تشکیل جریان‌های غلیظ ابتدا در آغاز قرن بیستم در تعدادی از مخازن بزرگ دنیا مشاهده شد. بر این اساس در نقطه‌ای از جریان به نام نقطه غوطه‌وری، اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب ساکن به تعادل رسیده و جریان غلیظ زیرگذر پس از آن به زیر سطح آب ساکن رفته و در این راستا امتداد می‌یابد. به دلیل این که نقطه غوطه‌وری مرز جداکننده بین سیال پیرامون

- 1-Plunge Point
- 2-Density Currents
- 3-Gravity Currents
- 4-Turbidity Currents
- 5-Graf
- 6-Cold fronts
- 7-Avalanches
- 8-Sea-water Intrusions
- 9-Sediment-Laden

10-Singh and Shah  
11-Akiyama and Stefan  
12-Savage and Brimberg

و کنتورهای چگال جریان غلیظ تحتانی مدل شده و اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی ناحیه غوطه‌وری و گسترش جریان تحتانی در مخزن را ارزیابی نمودند (۱۰). پارکر و تونیلو<sup>۶</sup> به آنالیز غوطه‌وری جریان‌های چگال پرداختند و مشخص نمودند که نسبت ضخامت لایه جریان غلیظ تحتانی بلافاصله پس از غوطه‌وری (hd) به عمق جریان بلافاصله قبل از غوطه‌وری (hp) و اعداد فرود دنسیمتریک مرتبط، به عنوان توابعی از پارامتر بدون بعد  $\gamma$  (میزان اختلاط ابتدایی) تعیین می‌شوند و روابط تغییر یافته اصلاحی را برای غوطه‌وری ارائه نمودند (۱۳). روابط ارائه شده توسط این محققین در هر دو فرم صریح و ضمنی بررسی گردیده است.

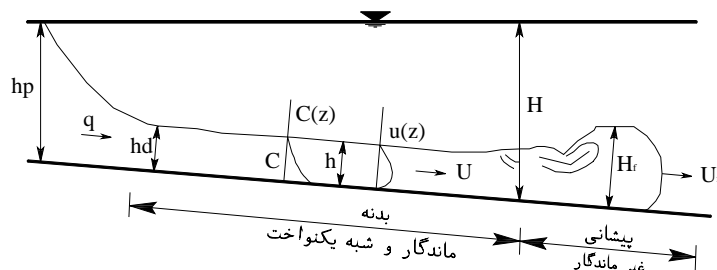
در این تحقیق به طور کلی هدف شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و ژئومتری بر نقطه غوطه‌وری در جریان‌های غلیظ زیرگذر می‌باشد که بر این اساس از مدل ریاضی Flow-3D جهت شبیه‌سازی استفاده گردیده است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این تحقیق برای ارتفاع غوطه‌وری با نتایج حاصل از مدل فیزیکی مقایسه شده است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق شبیه‌سازی ریاضی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر ارتفاع غوطه‌وری بررسی شده است. به طور کلی مطالعات و آزمایش‌های تجربی به عمل آمده بر روی پدیده غوطه‌وری نشان می‌دهد که عمق جریان غلیظ در نقطه غوطه‌وری (hp) تابع متغیرهایی نظیر شتاب ثقل، شیب کف مجرا حرکت جریان غلیظ، دبی جریان غلیظ و چگالی جریان پیرامون می‌باشد (۹). در شکل (۱) چگونگی حرکت جریان غلیظ در توده آب ساکن (سیال پیرامون) نشان داده شده است. در شکل (۱)  $q$ : دبی جریان غلیظ و  $hp$ : ارتفاع غوطه‌وری،  $U$ : سرعت بدنه،  $H_f$  و  $U_f$ : ارتفاع و سرعت پیشانی جریان غلیظ،  $C$ : تغییرات غلظت در بدنه جریان غلیظ و  $Hd$ : ارتفاع جریان بلافاصله پس از نقطه غوطه‌وری می‌باشد. در این تحقیق، در مجموع ۳۶ آزمایش انجام شده مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز موجود بود که با توجه به برنامه‌ریزی‌های آزمایشی تغییرات لازم بر روی آن انجام و برپا شد. این فلوم دارای طول کل ۹/۲۵ متر و عرض ۰/۵ متر با ارتفاع ۰/۸ متر بود. جنس اسکلت فلوم از فلز بوده و بدنه و کف آن از پلکسی گلاس با ضخامت ۲ سانتی‌متر ساخته شد. بخش‌های مختلف این مدل فیزیکی شامل حوضچه‌های آرامش ابتدایی و انتهایی فلوم، مخازن مورد نیاز (مخزن آب زلال، جریان غلیظ و مخازن بار ثابت) و پمپ‌های مورد نیاز (پمپ تامین آب زلال، اختلاط و تامین جریان غلیظ هر آزمایش) می‌باشد.

در نظر گرفته نشده است. بر اساس تحقیقات باسون<sup>۱</sup> مشخص شد که برای شیب‌های تند ( $S_0 > 2\%$ ) و شرایط تعادل مومنتوم در نقطه غوطه‌وری، باید عدد فرود دنسیمتریک حداکثر ۰/۶۷ باشد (۴). لی و یو<sup>۲</sup> به مطالعه آزمایشگاهی بر روی جریان غلیظ در مخزن پرداختند. این محققین خصوصیات هیدرولیکی جریان گل آلود در مخزن را بررسی نمودند و با بیان کردن این مطلب که نقطه غوطه‌وری در آغاز ناپایدار است و بعد از طی مسافتی به موقعیت پایدار می‌رسد ناحیه غوطه‌وری را تعریف و بیان نمودند که ناحیه غوطه‌وری پایدار زمانی به وجود می‌آید که اختلاط جریان پیرامون با جریان غلیظ به حد ثابتی برسد. در آزمایش‌های ایشان عدد فرود دنسیمتریک در نقاط غوطه‌وری در حالت اولیه و پایدار به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۶۱ بود و همچنین طول ناحیه غوطه‌وری ۱۵ برابر عمق آب در نقطه غوطه‌وری پایدار محاسبه گردید. همچنین این محققین نشان دادند که مقدار جریان حجمی در فرآیند غوطه‌وری ۱۷ درصد افزایش می‌یابد و حدود ۷۰ درصد دبی جریان پیرامون و ۸۰ درصد دبی رسوب به لایه با دانسیته بیشتر (لایه نزدیک به بستر کانال با غلظت تقریباً ثابت) محدود می‌شود و این در حالی است که غلظت و سرعت در طول مسیر کاهش می‌یابد (۱۲). بارت و همکاران<sup>۳</sup> به مطالعه عددی غوطه‌وری جریان غلیظ پرداختند. این محققین برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از مدل آشفتگی  $K - \epsilon$  اصلاح شده با اثرات شناوری استفاده نمودند که خصوصیات جریان غلیظ موثر از غوطه‌وری و کشش را در نظر می‌گیرد. بر اساس یافته‌های ایشان رابطه بین عمق نقطه غوطه‌وری در کانال با عرض ثابت و کانال واگرا برآورد شد. آن‌ها نشان دادند که میزان پخشیدگی لایه چگال در کانال واگرا تابعی از میزان کشش آب به درون جریان چگال و عرض کانال بوده و موقعیت خط غوطه‌وری قابل پیش بینی است (۵). دالی مور و همکاران<sup>۴</sup> مدل سازی زیرجریان را بررسی نمودند. این محققین از یک مدل هیبرید جریان غلیظ تحتانی دو بعدی و هیدرودینامیک سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان‌های ورودی غوطه‌ور در مخزن استفاده نمودند؛ همچنین برای محدود کردن ضخامت لایه جریان غلیظ دو بعدی به وسیله مدل سه بعدی از ارتفاع سطح آزاد در تحقیقات ایشان استفاده شد. در شبیه‌سازی‌های ایشان جریان غوطه‌ور در کانال‌هایی با شیب و عرض ثابت انجام شد و بر اساس نتایج این محققین عمق‌های غوطه‌وری با مدل‌های تجربی قبلی سازگار بود (۶). در تحقیقات ایشان مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده صحرايي هیبرت و همکاران<sup>۵</sup> در مخزن ولینگتن (استرالیا) برای شبیه‌سازی استفاده شد

- 1-Basson
- 2-Lee and Yu
- 3-Bourent et al.
- 4 -Dallimore et al.
- 5-Hebbert at al.



شکل ۱- پدیده غوطه‌وری در هنگام ورود جریان غلیظ به دریاچه

جدول ۱- محدوده تغییرات متغیرهای شبیه‌سازی شده با استفاده از Flow-3D

شیب کف مجرا (m/m)	دانسیتته جریان غلیظ (Kg/m <sup>3</sup> )	دبی جریان غلیظ (L/s)
۰/۱۶ و ۰/۱۲، ۰/۰۸	۱۰۱۶ و ۱۰۱۳، ۱۰۰۹، ۱۰۰۶	محدوده ۰/۵ تا ۲

شکل‌گیری جریان غلیظ و پدیدار شدن نقطه غوطه‌وری، این عمق اندازه‌گیری می‌گردید.

جدول (۱) سناریوهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل Flow-3D را نمایش می‌دهد. همچنین در این جدول محدوده تغییرات متغیرهای به کار گرفته شده در شبیه‌سازی ریاضی آمده است.

#### مدل ریاضی Flow-3D

برای شبیه‌سازی جریان و محاسبه نقطه غوطه‌وری پس از انجام آزمایش‌های این تحقیق از مدل Flow-3D استفاده شد. این مدل چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی است. روش حل معادله‌ها در این مدل بر اساس روش حجم محدود بوده که معادله‌های جریان شامل معادله پیوستگی و مومنتم و دیگر معادله‌ها مانند معادله پخشیدگی را حل عددی می‌نماید. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. فرم کلی این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود (۵):

$$v_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2)$$

که در آن  $V_f$ : کسری از حجم باز جریان در راستای x است،  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$ : بطور مشابه کسر سطح باز جریان در راستاهای y، x و z می‌باشند. در این معادله R و ضریب  $\xi$  اپراتور سیستم مختصاتی است. در حالتی که سیستم مختصاتی کارترین باشد، R برابر با یک

همچنین برای اندازه‌گیری دبی ورودی جریان غلیظ به درون فلوم از روش حجمی استفاده شد. برای جلوگیری از نوسان دبی ورودی در اثر ریزش جریان غلیظ به درون فلوم از یک حوضچه آرام‌کننده در ابتدای فلوم استفاده شد. همچنین در انتهای فلوم، برای جلوگیری از تأثیر آب زلال ورودی بر روی جریان غلیظ و انعکاس آن به سمت بالادست از یک حوضچه آرامش استفاده گردید. با توجه به امکانات موجود آزمایشگاهی برای ثابت نگه داشتن ارتفاع بار جریان غلیظ و آب زلال ورودی به فلوم و به منظور جلوگیری از نوسانات، از یک مخزن با بار ثابت موجود استفاده شد. این مخزن توسط یک تیغه فولادی به دو مخزن مجزا تفکیک شده (تفکیک آب زلال و سیال غلیظ) است. همچنین هر یک از این دو مخزن نیز با استفاده از تیغه فولادی به ارتفاع مشخص به دو قسمت مجزا تقسیم شده (جهت سر ریز آب زلال و سیال غلیظ) است. در آزمایش‌های مدل فیزیکی از دو پمپ استفاده شده که یکی از پمپ‌ها وظیفه انتقال آب به داخل فلوم آزمایشگاهی و مخزن آب با بار ثابت را بر عهده دارد و دیگری وظیفه اختلاط جریان غلیظ و انتقال آن به داخل مخزن آب نمک با ارتفاع ثابت را انجام می‌دهد. روش کار بدین صورت بود که ابتدا سیال غلیظ نمکی در یک سطل جداگانه حل می‌گردید و سپس به مخزن ذخیره جریان غلیظ منتقل می‌شد که توسط یک پمپ اختلاط به طور دائمی این سیال همگن می‌گردید. در ادامه آب زلال و سیال غلیظ به درون مخازن جداگانه با هد ثابت و از آن جا به درون فلوم منتقل می‌شد. هنگامی که سطح جریان غلیظ پشت دریچه با سطح آب زلال درون فلوم برابر می‌گردید، دریچه ورودی فلوم به طور کامل باز می‌شد تا جریان غلیظ وارد آب زلال ساکن درون فلوم شود. با توجه به شرایط ایجاد جریان غلیظ، این سیال به درون آب ساکن نفوذ می‌نمود. در حین

شیب شبیه‌سازی گردید. در نهایت نتایج شبیه‌سازی شده با مدل ریاضی با مقادیر ارتفاع غوطه‌وری (hp) اندازه‌گیری شده مقایسه گردید.

### نتایج و بحث

در این تحقیق برای بررسی نتایج شبیه‌سازی، داده‌های به دست آمده با استفاده از Flow-3D با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مقایسه و نتایج در سه شیب به طور جداگانه ترسیم شد. مقایسه نتایج بصورت بدون بعد به شکل معادله زیر در نظر گرفته شد:

$$\frac{hp_e}{y} = f\left(\frac{hp_m}{y}\right) \quad (7)$$

که در این رابطه  $hp_e$ : مقدار ارتفاع غوطه‌وری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و  $hp_m$ : ارتفاع غوطه‌وری پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ریاضی می‌باشد. همچنین مقدار  $y$  در رابطه فوق مربوط به عمق جریان غلیظ پس از دریچه کنترل آن می‌باشد که مقدار آن در تحقیق حاضر برابر با ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و آزمایش‌های جریان غلیظ بر این اساس انجام گردید. لازم به توضیح است که در تحقیق حاضر صرفاً تغییرات عمق غوطه‌وری در حالت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مدنظر بوده و به همین دلیل تنها برای ارائه نمایه‌ای از حالت بدون بعد، این مقادیر بر پارامتر ثابت  $y$  تقسیم شده است. در جدول (۲) کلیه نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای عمق غوطه‌وری ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، نتایج عمق غوطه‌وری برای هر سه شیب ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد، برای کلیه غلظت‌های چهارگانه ۶، ۹، ۱۳ و ۱۶ گرم بر لیتر و در دبی‌های مختلف آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص است که مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد؛ به گونه‌ای که، مقدار تفاوت بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع و مقایسه بهتر نتایج، مقادیر ارائه شده در جدول (۲) به صورت نموداری ترسیم گردید. شکل‌های (۲) الی (۴) نتایج مربوط به شیب‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد را نشان می‌دهد.

شده و این در حالی است که  $\xi$  برابر با صفر می‌شود. عبارت اول سمت راست معادله (۳) ترم پخشیدگی تلاطمی بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۵):

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} (v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (v_p A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \xi \frac{\rho v_p A_x}{x} \quad (3)$$

در این رابطه ضریب  $V_p$  برابر با  $c_\rho \mu / \rho$  بوده که  $\mu$  ضریب پخشیدگی مومنتم می‌باشد و  $c_\rho$  ضریبی است که به عدد اشمیت تلاطم وابسته است. این عبارت پخشیدگی جرم مربوط به سنخش مراحل اختلاط تلاطم بوده و تنها برای حالتی که دانسیته سیال کاربردی غیر یکنواخت باشد به کار می‌رود. عبارت آخر در رابطه (۳) مربوط به ورود آلاینده بوده و در شرایط سیال دو فازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. معادله‌های حرکت ناویر استوکس در سیالی با مولفه‌های سرعت (u, v, w) در مختصات سه بعدی، از دیگر معادله‌ها در حل جریان بوده که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (4)$$

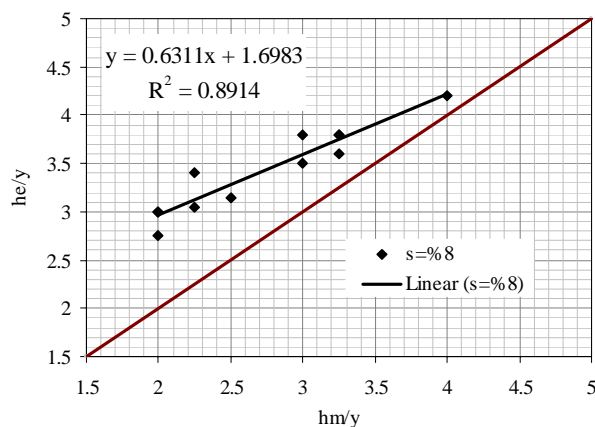
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (6)$$

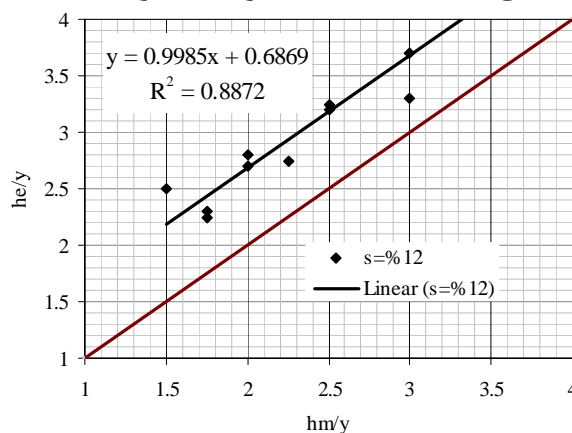
در این معادله‌ها ( $G_x, G_y, G_z$ )، شتاب‌های جرم و ( $f_x, f_y, f_z$ ) شتاب‌های لزجت می‌باشند (۵). لذا در این تحقیق برای هر یک از سناریوهای آزمایشی، مدل ریاضی اجرا شد و جریان غلیظ بر روی

جدول ۲- نتایج عمق غوطه وری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

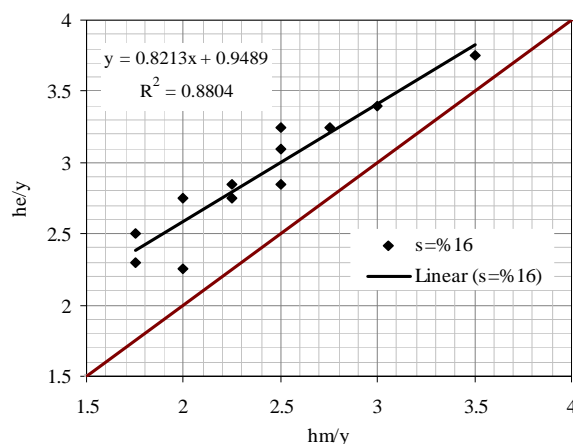
شیب ۸ درصد				شیب ۱۲ درصد				شیب ۱۶ درصد			
Q (L/S)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	hp <sub>e</sub> (cm)	hp <sub>m</sub> (cm)	Q (L/S)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	hp <sub>e</sub> (cm)	hp <sub>m</sub> (cm)	Q (L/S)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	hp <sub>e</sub> (cm)	hp <sub>m</sub> (cm)
۰/۸۳	۱۰۰۶	۶	۶/۸	۱/۵۲	۱۰۰۶	۷/۵۰	۸/۴۰	۱/۸۹	۱۰۰۶	۱۰/۵	۷/۳۰
۰/۷۸	۱۰۰۶	۴/۵	۶/۳	۱/۱۰	۱۰۰۶	۵	۶/۵۰	۱/۴۸	۱۰۰۶	۸/۵۰	۵/۷۰
۰/۷۴	۱۰۰۶	۴	۶/۱	۰/۷۰	۱۰۰۶	۴	۵/۶۰	۰/۹۱	۱۰۰۶	۵	۵/۵۰
۰/۷۱	۱۰۰۹	۴	۶	۱/۴۰	۱۰۰۹	۶	۷/۴۰	۱/۴۰	۱۰۰۹	۶/۵۰	۵/۲۰
۱/۲۶	۱۰۰۹	۵/۵	۷/۲	۰/۶۵	۱۰۰۹	۳	۵	۰/۹۲	۱۰۰۹	۴	۴/۸۰
۱/۳۶	۱۰۰۹	۶	۷/۶	۱/۰۵	۱۰۰۹	۴	۵/۴۰	۰/۷۰	۱۰۰۹	۳	۵/۷۰
۰/۷۷	۱۰۱۳	۴	۵/۲	۰/۹۶	۱۰۱۳	۳/۵۰	۴/۶۰	۱/۰۱	۱۰۱۳	۴/۵۰	۵/۳۰
۱/۴۰	۱۰۱۳	۵/۵	۷/۶	۱/۴۵	۱۰۱۳	۵	۶/۴۰	۱/۴۵	۱۰۱۳	۵/۵۰	۵/۷۰
۱/۹۰	۱۰۱۳	۷/۵	۸/۴	۱/۹۰	۱۰۱۳	۸	۹/۵۰	۱/۹۴	۱۰۱۳	۷/۵۰	۶/۲۰
۰/۶۱	۱۰۱۶	۲/۵	۶	۱/۴۵	۱۰۱۶	۴/۵۰	۵/۵۰	۱/۵۲	۱۰۱۶	۴/۵۰	۵/۷۰
۰/۸۶	۱۰۱۶	۳/۵	۶/۸	۱/۱۰	۱۰۱۶	۳/۵۰	۴/۵۰	۱/۹۰	۱۰۱۶	۵/۵۰	۶/۸۰
۱/۶۹	۱۰۱۶	۵	۷/۶	۱/۹۰	۱۰۱۶	۶	۶/۶۰	۰/۹۷	۱۰۱۶	۳	۴/۶۰



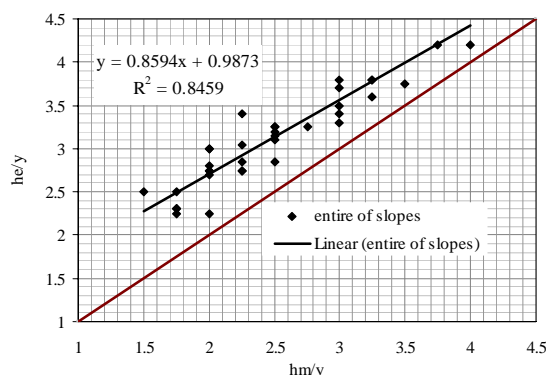
شکل ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۸ درصد



شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۱۲ درصد



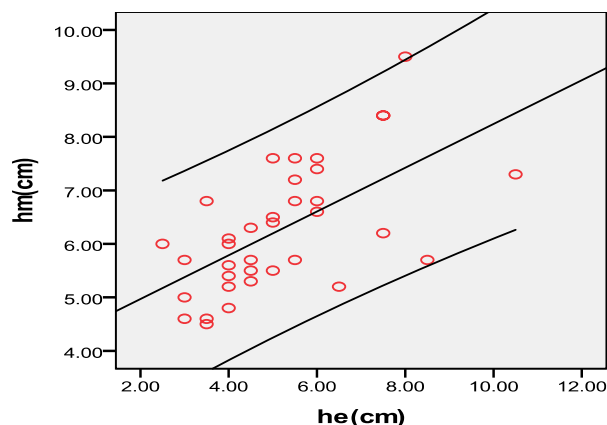
شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۱۶ درصد



شکل ۵- مقایسه داده‌های حاصل از مدل ریاضی با نتایج اندازه‌گیری شده در کلیه شیب‌ها

غوطه‌وری است. لذا اثر متقابل نیروی ثقل و شناوری چگونگی حرکت جریان غلیظ را تحت الشعاع قرار می‌دهد. با این توصیف با افزایش نیروی ثقل میزان اختلاف فشار در جریان دوفازی افزایش یافته که باعث بهتر شدن نتایج مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  می‌گردد. به لحاظ کمی برای شیب ۱۶ درصد به طور کلی کمترین اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود و همان‌گونه که ذکر شد دلیل آن در اختلاف فشار بیشتر و به تبع نتایج بهتر  $K-\epsilon$  می‌باشد. شکل (۵) برای کلیه شیب‌ها نتایج برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی Flow-3D را در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۵) مشخص است که داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از Flow-3D مقادیر عمق غوطه‌وری را بیشتر پیش‌بینی می‌نماید؛ ولی، به طور کلی همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش‌بینی شده با اعمال ضریب تصحیح در مقادیر برآورد شده با

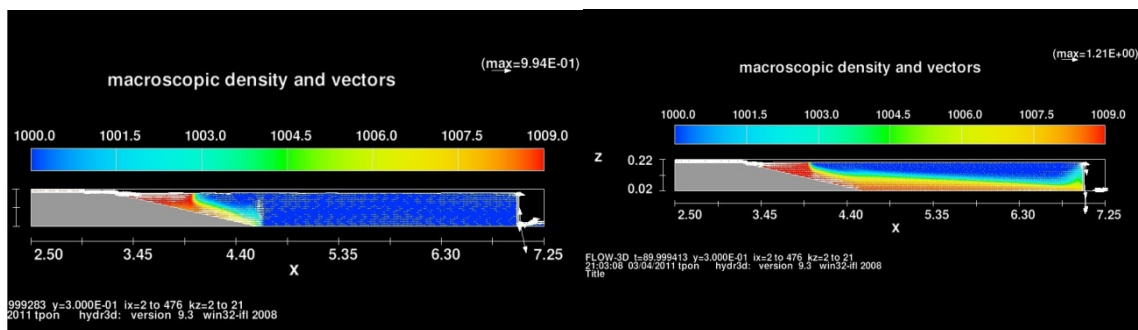
همان‌طور که در شکل‌های (۲) الی (۴) مشاهده می‌شود، داده‌های شبیه‌سازی شده در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده ترسیم شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، در کلیه شیب‌ها مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی نسبت به نتایج اندازه‌گیری شده بیشتر بوده به گونه‌ای که در شیب ۸ درصد مقدار اختلاف ۲۸ درصد، در شیب ۱۲ درصد مقدار اختلاف ۳۰ درصد و برای شیب ۱۶ درصد مقدار اختلاف شبیه‌سازی با نتایج واقعی ۲۳ درصد می‌باشد. علت این امر را می‌توان در مدل تلاطمی مورد استفاده که مدل  $K-\epsilon$  می‌باشد، بررسی نمود. به طور کلی در این مدل آشفتگی که در تحلیل‌های سه بعدی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، اگر اختلاف فشار در جریان دوفازی آشفته بیشتر گردد نتایج بهتری حاصل می‌شود. از طرفی اثر زبری نیز یکی از عوامل مربوط به ایجاد اختلاف می‌باشد. همچنین لازم به توضیح است که در جریان غلیظ اختلاف دانسیته باعث حرکت جریان غلیظ شده و در شیب بیشتر نیروی ثقل نیز باعث گسترش آن می‌گردد. از طرفی نیروی شناوری در اثر اختلاف چگالی به وجود می‌آید و از عوامل تأثیر گذار بر نقطه



شکل ۶- بررسی آماری و پراکنش داده‌های حاصل از Flow-3D در سطح اطمینان ۹۵ درصد

جدول ۳- ضرایب تصحیح برای نتایج پیش بینی شده با استفاده از Flow-3D

ضریب مدل	۸ درصد	۱۲ درصد	۱۶ درصد
شیب	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۷۸



شکل ۷- نمونه‌ای از نتایج خروجی و اجرای مدل ریاضی Flow-3D

در شیب‌های مختلف مقدار ضریب اصلاحی در نتایج برآورد شده با استفاده از Flow-3D در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول (۳) مشخص است که مدل داده‌های آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی مقادیر اندازه‌گیری شده را برآورد می‌نماید. به طور کلی برای کلیه شیب‌ها مقدار ضریب اصلاحی نتایج Flow-3D ۰/۸ می‌باشد. همچنین با توجه به نزدیک بودن ضرایب تصحیح برای مدل در شیب‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شیب تأثیر چندانی بر روی نقطه غوطه‌وری نگذاشته است. این نتیجه از داده‌های آزمایشگاهی نیز به دست آمده است.

Flow-3D مناسب است. مقدار ضریب رگرسیون در شکل (۵) برابر با ۸۵ درصد بوده که ضریب نسبتاً بالایی می‌باشد. از طرفی داده‌های حاصل از مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS19 ترسیم شد. شکل (۶) این موضوع را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۶) مشخص است که داده‌های کمی خارج از محدوده خطوط ۹۵ درصد قرار دارند که این نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد داده‌ها است. شکل (۷) نمونه‌ای نتایج خروجی مدل ریاضی را نمایش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس آنچه که در این تحقیق گذشت نتایج حاصل را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:



## منابع

- ۱- خانجانی م. ج.، بارانی، غ. و ع. شفیعی. ۱۳۷۷. کاربرد تحلیل ابعادی و مدل فیزیکی در بررسی عمق جریان چگال در محل فروروی دریاچه‌ها. نشریه دانشکده فنی، دانشگاه کرمان، جلد ۳۳(۳): ۵۲-۳۳.
- 2- Akiyama, J. and H.G. Stefan 1984. Plunging flow into a reservoir: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 110(4): 484-499.
- 3- Akiyama J. and Stefan H.G. 1985. Turbidity current with erosion and deposition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12): 1473-1495.
- 4- Basson, G. 1998. Prediction of sediment induced density current formation in reservoirs, University of Pretoria, Department of Civil Engineering.
- 5- Bournet, P., Datus, D., Tassin, B. and B. Vincon-Leite. 1999. Numerical investigation of plunging density current *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 125(6): 584-594.
- 6- Dallimore, C. J., Imberger, J. and B. R. Hodges. 2004. Modeling a plunging underflow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 130(11): 1068-1076.
- 7- Fan, J. 1960. Experimental studies on density current. *Scientia Sinica*. 9: 275-303.
- 8- Graf, W. H. 1983. The behavior of silt-laden current. *International Water Power and Dam Construction*, 35(9): 33-38
- 9- Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentation modeling. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia.
- 10- Hebbert, B. Imberger, J., Loh, I. and J. Patterson. 1979. Collie river underflow into the wellington reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 105 (HYS): 553-545.
- 11- Haghiabi, A.H. 2004. The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents. Ph. D. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 12- Lee, H. Y. and W. Yu. 1997. Experimental study of reservoir turbidity current. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 123(6): 520-528.
- 13- Parker, G. and H. Toniolo. 2007. Note on the analysis of plunging of density flows. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 133(6): 690-694.
- 14- Singh, B. and C.R., Shah. 1971. Plunging phenomena of density currents in reservoirs. *Lahouille Blanche*, 26(1): 59-64.
- 15- Savage, S.B. and J. Brimberg. 1975. Analysis of plunging phenomena in water resource. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 13(2): 187-204.