

## تخمین ارتفاع غوطه‌وری جریان غلیظ با استفاده از مدل تلاطمی Re-Normalized Group

حامد ارجمندی<sup>1\*</sup>، مهدی قمشی<sup>2</sup>، جواد احدیان<sup>3</sup>، حسن گلیج<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 90/2/28 تاریخ پذیرش: 90/11/12

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

2 و 3- استاد و استادیار، سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبه: E-mail: [H\\_Arjmandi\\_Ir@yahoo.com](mailto:H_Arjmandi_Ir@yahoo.com)

### چکیده

جریان‌های غلیظ هرگاه به یک توده سیال سبک‌تر برخورد نمایند، یک ناحیه غوطه‌وری را ایجاد می‌کنند. با توجه به این‌که در ارتفاع غوطه‌وری مرز بین سیال غلیظ با سیال پیرامون در محل نقطه غوطه‌وری مشخص می‌گردد، برآورد این نقطه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر سیال ساکن که بر نقطه غوطه‌وری می‌گذارند، 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 همه آزمایش‌ها ارتفاع غوطه‌وری در دبی‌های مختلف از سیال غلیظ و تفاوت دانسیته 6، 9، 13 و 16 کیلوگرم بر مترمکعب برای سه شیب 8، 12 و 16 درصد اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از مدل Flow-3D تحت شرایط مدل تلاطمی RNG ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شرایط آزمایشگاهی موجود شبیه‌سازی شد. بررسی مقایسه‌ای نشان داد که عمق غوطه‌وری برآورد شده با استفاده از Flow-3D تحت شرایط مدل تلاطمی RNG در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در آزمایشگاه از دقت مناسبی برخوردار می‌باشند به گونه‌ای که به طور متوسط برای شیب 8 درصد مدل ریاضی حدود 14 درصد نتایج را بیشتر پیش‌بینی می‌نماید و این در حالی است که برای کلیه شیب‌ها به طور متوسط نتایج حاصل از مدل تلاطمی RNG 10/5 درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع غوطه‌وری، شبیه‌سازی، شیب بستر، مدل تلاطمی RNG

## Prediction of Plunge Point in the Density Current Using RNG Turbulence Modeling

H Arjmandi<sup>1\*</sup>, M Ghomeshi<sup>2</sup>, J Ahadiayn<sup>3</sup> and H Goleij<sup>4</sup>

Received: 18 May 2011 Accepted: 12 May 2012

<sup>1</sup>MSc Student, Civil Engin., Univ. of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran

<sup>2,3</sup>Prof. and Assoc. Prof., Water Structure, Univ. of Shahid Chamran Ahwaz, Iran

<sup>4</sup>MSc Student, Water Structure, Univ. of Shahid Chamran Ahwaz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: [H\\_Arjmandi\\_Ir@yahoo.com](mailto:H_Arjmandi_Ir@yahoo.com)

### Abstract

When the density current smashes into the lower dense fluid mass a plunge region will occur. Since the plunge depth bounds between density current and ambient fluid, determining of this point is important. In this research, the hydraulic parameters of density current and bed slope of stagnant fluid were investigated. To achieve the purpose of this research a physical model was built in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University (SCU) and various experiments were performed. In the experiments, the plunge depth at the different discharge of density current and density difference 6, 9, 13 and 16 kg/m<sup>3</sup> at three slopes 8, 12 and 16% was measured. Then using Flow-3D under RNG turbulence model, plunge depth was simulated for the same experimental condition. The comparison of results obtained showed that the predicted plunge depth with Flow-3D under RNG turbulence model had a high and satisfactory accuracy. Finding showed that for the 8% bed slope, the results of RNG turbulence model 14% was more than experimental data. While, for the entire slope, the results of RNG turbulence model was predicted 10.5% in average more than measured data. Generally, the statistical investigations showed that the RNG turbulence model with satisfactory precision estimated the plunge point depth.

**Keywords:** Bed slope, Plunge point depth, RNG model, Simulation, Turbulence Model

### مقدمه

نخیره آنها را کاهش می‌دهد (تونیلو و پارکر 2003) و هر ساله تقریباً 20 میلیارد تن رسوبات توسط رودخانه‌های جهان انتقال یافته و در آبهای ساکن ته‌نشین می‌گردد (تربن 1383). حجم خاک فرسایش یافته در ایران حدود 800 میلیون مترمکعب از حجم مفید سدها را کاهش می‌دهد که این مقدار بیش از 3 تن

احداث سد بر روی رودخانه باعث قطع انتقال رسوب شده و شرایط جریان ورودی به مخزن را کاملاً تغییر می‌دهد. مهمترین پدیده در این میان، رسوبگذاری در مخزن سد و کاهش حجم مفید آن است. تجمع رسوبات در مخازن سدها، سالانه یک درصد از حجم

کافی روی پارامترهای مختلف نظیر ضریب درون آمیختگی رسوب، معادلات به خوبی حل نشده‌اند سزار و همکاران (2001) در تحقیقات خود یک مدل عددی ارائه داده‌اند و نیز از یک مدل آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند. همچنین در این تحقیق از مشاهدات میدانی مخزن لوزون در آلپ سویس استفاده شده است. مدل عددی برای جریان دو فازي جهت شبیه سازی جریان-های گل آلود بوده است. تحقیق دیگری توسط پارکر و تونیلو (2007) نیز بر روی ضخامت جریان گل آلود و عدد فرود قبل و بعد از نقطه غوطه وری انجام شده که در آن عدد فرود به صورت توابعی که فقط به میزان درون آمیختگی سیال پیرامون ارتباط دارد ارائه گردیده است. فلیکس و همکاران (2005) در یک مطالعه آزمایشگاهی اندازه گیری ترکیبی پروفیل سرعت و غلظت را در جریان گل آلود مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه دیگری کوبو و ناکاجیما (2002) با مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی، آرایش موج رسوبی ناشی از جریان‌های گل آلود را بررسی کرده‌اند. نتایج بدست آمده در راستای فهم نحوه شکل گیری موج رسوبی همراه با یک مدل عددی ارائه شده است. مطالعات سینگ و شاه (1971) بر اساس دستیابی به یک رابطه ریاضی برای نقطه غوطه‌وری پایه‌گذاری شد. در این راستا با بررسی پدیده‌های فیزیکی، عوامل مؤثر در تشکیل نقطه غوطه‌وری شناسایی و با انجام آنالیز ابعادی و مطالعات آزمایشگاهی رابطه‌ای برای عمق نقطه غوطه‌وری ارائه نمودند. قمشی (1995) در بررسی آزمایشگاهی با شیب کف ثابت و با استفاده از جریان غلیظ رسوبی و جریان غلیظ آب نمک و نیز استفاده از داده‌های آزمایشگاهی 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 ثقلی چگال در نظر گرفته شده است. حقی‌آبی (2004) رابطه بین سرعت جبهه جریان غلیظ و شدت جریان مستغرق را برای شیب ثابت ارائه نموده‌اند. بر اساس تحقیقات آکیما و استقان (1984) مشخص گردید که در عدد فرود چگال  $0/68$  نقطه غوطه وری به وقوع می‌پیوندد. همچنین ساویج و بریمبرگ

رسوب در هر ثانیه است (اکرمی 1375). در ایالات متحده میزان رسوبگذاری در مخارن سدها سالیانه به  $1200 \times 10^6$  تن می‌رسد (چاپلی 1380). در غالب موارد سعی می‌شود که با استفاده از نیروی هیدرودینامیکی آب، رسوبات ریزدانه خارج شوند. یکی از این روش‌ها خارج کردن جریان سیلاب در قالب دینامیک جریان‌های گل آلود می‌باشد. بنابراین بررسی و مطالعه حرکت جریان‌های گل آلود در مخازن در جهت وصول به هدف فوق، اطلاعات گرانبهایی را در اختیار قرار خواهد داد. به دلیل این‌که نقطه غوطه‌وری مرز جداکننده بین سیال پیرامون (مخزن) و سیال غلیظ می‌باشد، بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ غوطه‌ور شده در مخزن، سرعت بدنه و پیشانی، میزان شدت اختلاط و غیره به این نقطه وابسته است، بنابراین دانستن ارتفاع نقطه غوطه‌وری به عنوان نقطه شروع غوطه‌ور شدن جریان غلیظ ورودی به درون مخزن ضروری می‌باشد. لذا محققین فرمول‌های مختلفی جهت محاسبه عمق جریان غلیظ در محل غوطه‌وری ارائه نموده‌اند (صاحب شبان 1381، آکیما و استعفان 1984، هیبرت و همکاران 1979، ساویج و بریمبرگ 1975). در این تحقیق به طور کلی هدف شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و ژئومتری بر نقطه غوطه‌وری در جریان‌های غلیظ زیرگذر می‌باشد و بر این اساس از مدل ریاضی Flow-3D تحت شرایط مدل RNG تلاطمی جهت شبیه‌سازی استفاده گردیده است.

#### پیشینه موضوع

از سال 1950 به بعد مسائل رسوبگذاری ناشی از جریان‌های گل آلود به صورت تئوری و آزمایشگاهی در بسیاری از کشورها مطالعه شده است. تاکنون مشاهدات میدانی نه چندان زیادی در زمینه جریان‌های گل آلود انجام گرفته است (یاماموتو و همکاران 2008) به دلیل دشواری و گرانی اندازه‌گیری‌های میدانی، عمده بررسی‌های تجربی جریان گل آلود در آزمایشگاه صورت گرفته است. مدل‌های ریاضی این جریان‌ها در 70 سال اخیر توسعه یافته‌اند و به دلیل فقدان شناخت

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 بوسیله 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. در تحقیقات ایشان مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی هیبرت و همکاران (1979) در مخزن ویلنگتن (استرالیا) برای شبیه‌سازی استفاده شد و کنتورهای چگال جریان غلیظ تحتانی مدل شده و اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی ناحیه غوطه‌وری و گسترش جریان تحتانی در مخزن را ارزیابی نمودند. پارکر و تونیلو (2007) به آنالیز غوطه‌وری جریان‌های چگال پرداختند و مشخص نمودند که نسبت ضخامت لایه جریان غلیظ تحتانی بلافاصله پس از غوطه‌وری به عمق جریان بلافاصله قبل از غوطه‌وری و اعداد فرود چگالی مرتبط، به عنوان توابعی از پارامتر بدون بعد  $g$  (میزان اختلاط ابتدایی) تعیین می‌شوند و روابط تغییر یافته اصلاحی را برای غوطه‌وری ارائه نمودند. روابط ارائه شده توسط این محققین در هر دو فرم صریح و ضمنی بررسی گردیده است.

#### ساختار جریان غلیظ

جریان غلیظ جریانی با چگالی  $r_t$  است که ذاتاً در اختلاف چگالی  $\Delta r$  بر روی شتاب جاذبه  $g$  بوجود می‌آید (شکل 1). این جریان تا زمانی که جاذبه به وسیله نسبت  $\Delta r / r_a$  بر اساس رابطه 1 کاهش یافته است رخ می‌دهد.

$$g' = g \left( \frac{r_t - r_a}{r_a} \right) = g \frac{\Delta r}{r_a} \quad [1]$$

که  $r_t$  چگالی متوسط جریان و  $r_a$ ، چگالی سیال پیرامون است (گراف و آلتیناکار 1998). جریان سنگین اغلب در هنگام سیلاب بوجود آمده و در محل برخورد

(1975) پدیده غوطه‌وری را در ترم‌های معادلات حرکت برای یک جریان متغیر تدریجی دولایه‌ای بررسی نمودند. در تحقیقات ایشان توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیک فرض گردیده و شدت اختلاط در نظر گرفته نشده است. لی و یو (1997) به مطالعه آزمایشگاهی بر روی جریان چگال 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 کردند. آنها بیان نمودند که ناحیه غوطه‌وری پایدار زمانی بوجود می‌آید که اختلاط جریان پیرامون با جریان غلیظ به حد ثابتی برسد. در آزمایش‌های ایشان عدد فرود چگالی در نقاط غوطه‌وری در حالت اولیه و پایدار به ترتیب تقریباً برابر با  $1/6$  و  $0/6$  بود و همچنین طول ناحیه غوطه‌وری 15 برابر عمق آب در نقطه غوطه‌وری پایدار محاسبه گردید. همچنین این محققین نشان دادند که مقدار جریان حجمی در فرآیند غوطه‌وری 17 درصد افزایش می‌یابد و حدود 70 درصد دبی جریان پیرامون و 80 درصد دبی رسوب به لایه با چگالی 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. بارنت و همکاران (1999) به مطالعه عددی غوطه‌وری جریان غلیظ پرداختند. این محققین برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از مدل آشفتگی  $k-e$  اصلاح شده با اثرات شناوری استفاده نمودند که خصوصیات جریان غلیظ موثر از غوطه‌وری و کشش<sup>1</sup> 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. دالی‌مور و همکاران (2004) مدل سازی جریان غلیظ تحتانی را بررسی نمودند. این محققین از

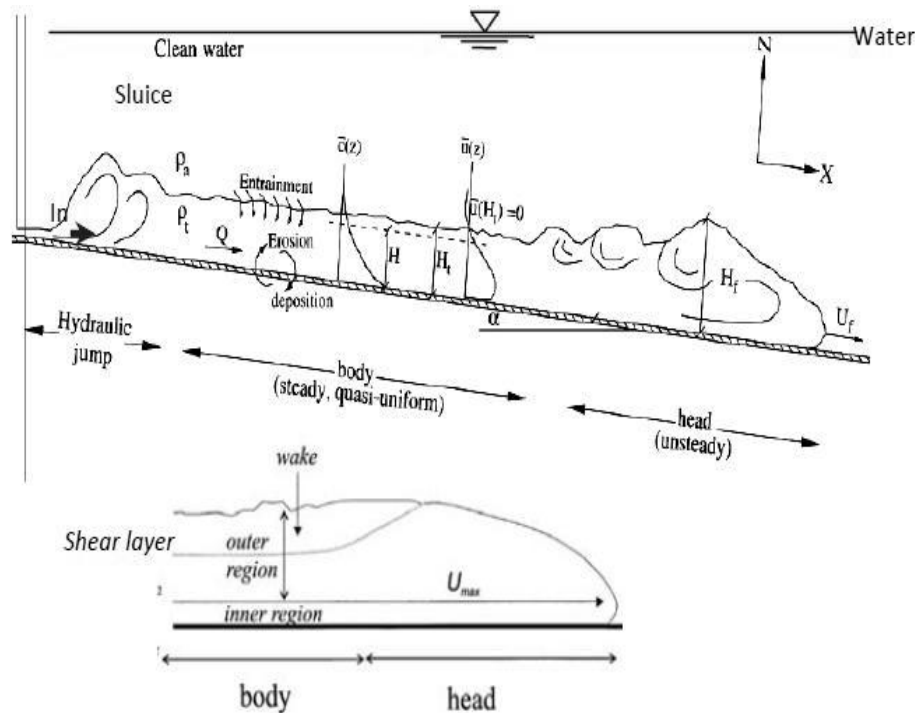
<sup>1</sup>Entrainment

$$r_t = C_s r_s + (1 - C_s) r_a = r_a + (r_s - r_a) C_s \quad [2]$$

که در آن  $C_s$  غلظت حجمی است که نسبت به عمق جریان متوسط گیری می‌شود. جهت پارامتری کردن جریان غلیظ عدد فرود چگال جریان که عبارتست از نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ثقلی کاهش یافته به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g' h_p \cos a}} \quad [3]$$

رودخانه به مخزن سد، این جریان در نقطه غوطه‌وری به زیر آب مخزن فرو می‌رود و در کف مخزن جریان غلیظ ایجاد می‌گردد و چنانچه شیب کف زیاد باشد (بالاتر از 0/001) و یا پهنای آن کم باشد به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل 1). در این حرکت جریان می‌تواند به انتهای مخزن و ساختمان سد رسیده و یا به مدت چند روز امتداد یابد و حتی در اقیانوسها به حرکت خود ادامه دهد (فیروز آبادی و همکاران 2003). چگالی متوسط یک جریان سنگین با رابطه (2) بیان می‌شود:



شکل 1- پروفیل یک جریان غلیظ

به اطلاعات زیادی برای توضیح خصوصیات مکانیکی جریان دارد. ماهیت وابسته به زمان جریان متلاطم که به دامنه وسیعی از مقیاس‌های زمانی (فرکانس) وابسته است که به ناچار باید از تکنیک‌های متوسط گیری برای تقریب نوسانات که معادلات میانگین ناویر-استوکس از آن جمله می‌باشد، استفاده شود. پرائتل (1925) برای حل معادلات ناویر-استوکس مدل طول اختلاط را که یک حل ریاضی برای تنش‌های تلاطمی بود ارائه داد. در حال

#### مدل‌های تلاطمی

آنالیز و پیش‌بینی رفتار جریان متلاطم که از مسائل اساسی در دینامیک سیالات می‌باشد به وسیله تئوری CFD بررسی می‌گردد. مشکل این روش ناشی از خصوصیات طبیعی پدیده‌های متلاطم مانند تلاطمی و اتفاقی بودن این نوع پدیده‌ها است. جریان متلاطم جریانی سه بعدی و وابسته به زمان می‌باشد که احتیاج

روش‌های آماری را برای استخراج از معادلات متوسط برای مقادیر آشفته از قبیل انرژی جنبشی تلاطمی و شدت پراکندگی به کار می‌برد. در مدل  $k-e$  استاندارد معادلاتی که تلاطم را مدل می‌کنند شامل دو معادله می‌باشد. معادله اول که معادله انرژی جنبشی تلاطمی است، به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial rk}{\partial t} + \frac{\partial (rV_x k)}{\partial x} + \frac{\partial (rV_y k)}{\partial y} + \frac{\partial (rV_z k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + m_t f - r.e \quad [4]$$

معادله بالا که نرخ افت انرژی تلاطمی نامیده می‌شود به صورت معادلات 5 و 6 می‌باشد. ترم  $f$  موجود در روابط مربوط به تنش برشی بوده و مقادیر پیش فرض در مدل RNG برای ثابت‌های به کار گرفته شده در معادلات، در جدول 1 آورده شده است (لودر و اسپالینگ، 1974).

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \cdot \phi + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad [5]$$

$$C_{1\varepsilon} = 1/42 - \frac{h \left( 1 - \frac{h}{h_\infty} \right)}{1 + bh^3} \quad [6]$$

جدول 1- ضرایب مدل RNG

$b$	$C_2$	$C_m$	$s_k$	$s_t$	$s_e$	$h_\infty$
0/12	1/68	0/085	0/72	0/85	0/72	4/38

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی جریان غلیظ و محاسبه نقطه غوطه‌وری می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌های این تحقیق از مدل Flow-3D تحت شرایط مدل تلاطمی RNG استفاده شد. این مدل چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی است. روش حل معادلات در این مدل بر اساس روش حجم محدود بوده که معادلات جریان

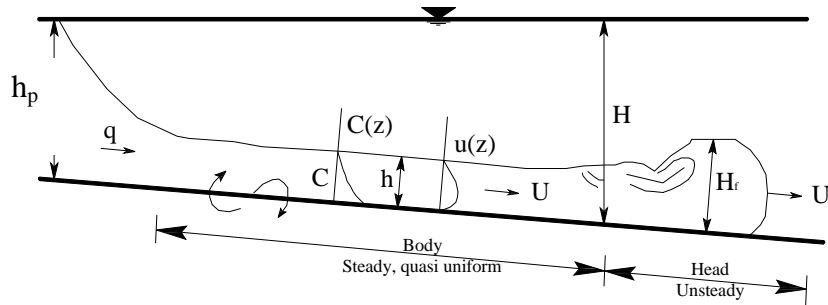
حاضر مدل طول اختلاط به عنوان یک مدل صفر معادله-ای شناخته می‌شود. پرائتل در سال 1945 برای حل تنش‌های متلاطم مدل تک معادله‌ای را ارائه کرد. کولموگرف (1942) اولین مدل کامل تلاطم را ارائه کرد. این مدل، مدل دو معادله‌ای نام گرفت. این معادلات برای سالها غیر قابل حل بود تا زمانی که کامپیوترهایی با قابلیت بالا اختراع گردیدند. روتا (1951) با استفاده از مدل تقریبی متلاطم بوزینسک به حل معادلات تنش‌های رینولدز پرداخت و این روش به نام Second-order یا Second-moment جریان نامیده شد. برای یک جریان سه بعدی این مدل شامل هفت معادله می‌باشد که یک معادله مربوط به طول اختلاط و شش معادله دیگر به تنش‌های رینولدز مربوطه می‌شوند. به این ترتیب در اواخر دهه 50 چهار دسته اصلی از مدل‌های تلاطمی توسعه یافته بودند. این مدل‌ها به ترتیب شامل مدل صفر معادله، مدل یک معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای و مدل Second-order می‌باشد. در این تحقیق از مدل تلاطمی دو معادله‌ای RNG که معادلات حاکم بر آن در ادامه آورده شده، برای محاسبه عمق جریان چگال استفاده شده است. مدل RNG از بسط و توسعه مدل  $k-e$  مبتنی بر روش تجدید نرمال‌سازی گروهی (RNG) به دست آمده است، به صورتی که ثابت‌هایی که به طور تجربی در معادله استاندارد  $k-e$  بدست آمده‌اند، به طور صریح در معادله RNG استخراج شده‌اند. عموماً مدل RNG قابلیت اجرایی وسیعتری از مدل استاندارد  $k-e$  دارد، خصوصاً برای توصیف جریان‌های با شدت تلاطمی کمتر و جریان‌های که نواحی برشی قوی‌تری دارند از دقت بالا تری برخوردار است. مدل RNG درمقایسه با معادله  $k-e$  دارای یک ترم اضافی است که به طور معنی داری دقت آنرا برای جریانهای پیچیده افزایش می‌دهد. تئوری RNG یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی اشتقاقی را برای ویسکوزیته مؤثر و یک فرمول تحلیلی را برای اعداد پرائتل تلاطمی فراهم می‌کند. این خصوصیات مدل RNG را دقیق‌تر می‌کند و برای کلاس وسیعتری از جریان‌ها در مقابل مدل  $k-e$  استاندارد قابل اعتمادتر می‌کند. این مدل

که در بخش های بعدی به آن اشاره می‌شود. به طور کلی مطالعات و آزمایشات تجربی به عمل آمده بر روی پدیده غوطه‌وری نشان می‌دهد که عمق جریان غلیظ در نقطه غوطه‌وری ( $h_p$ ) تابع متغیرهایی نظیر شتاب ثقل، شیب کف مجرا حرکت جریان غلیظ، دبی جریان غلیظ و چگالی جریان پیرامون می‌باشد. در شکل 2 چگونگی حرکت جریان غلیظ در توده آب ساکن (سیال پیرامون) نشان داده شده است.

شامل معادله پیوستگی و مومنتم و دیگر معادلات مانند معادله پخشیدگی را حل عددی می‌نماید.

### مواد و روش‌ها

همان گونه که در بندهای گذشته به آن اشاره شد در این تحقیق شبیه‌سازی ریاضی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر ارتفاع غوطه‌وری بررسی شده است. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر نتایج، مقایسه‌ای بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی انجام شده



شکل 2- پدیده غوطه‌وری در هنگام ورود جریان غلیظ به دریاچه

غوطه‌وری بررسی می‌شود. بدین منظور جدول 2 سناریوهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل Flow-3D را نمایش می‌دهد.

در شکل 2،  $q$  دبی جریان غلیظ و ارتفاع غوطه‌وری می‌باشد. در این تحقیق اثر شیب کف و دبی جریان غلیظ و همچنین غلظت سیال ورودی بر ارتفاع نظیر

جدول 2- سناریوهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با استفاده از Flow-3D

شیب کف مجرا (m/m)	چگالی جریان غلیظ ( $\text{kg/m}^3$ )	دبی جریان غلیظ (L/s)
0/08	1006	
0/12	1009	محدوده بین
0/16	1013	0/5 تا 2
	1016	

و عرض 0/5 متر با ارتفاع 0/8 متر بود. جنس اسکلت فلوم از فلز بوده و بدنه و کف آن از پلکسی گلاس با ضخامت 2 سانتیمتر ساخته شد. بخش‌های مختلف این مدل فیزیکی شامل حوضچه‌های آرامش ابتدایی و انتهایی فلوم، مخازن مورد نیاز (مخزن آب زلال، جریان

جدول 2 سناریوهای آزمایشی به کار گرفته شده در شبیه‌سازی ریاضی را نمایش می‌دهد. در مجموع 36 آزمایش انجام شده مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مدل فیزیکی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز برپا شد که دارای طول کل 9/25 متر

بیشتر جریان ورودی به درون فلوم، جریان غلیظ به درون آب ساکن غوطه‌ور خواهد شد پس از پایداری نقطه غوطه‌وری، این عمق اندازه‌گیری می‌شود. شکل 3 نمای شماتیک مدل فیزیکی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود جریان غلیظ با یک بار ثابت وارد یک مخزن آرام کننده شده، پس از عبور از یک دریچه وارد فلوم می‌شود.

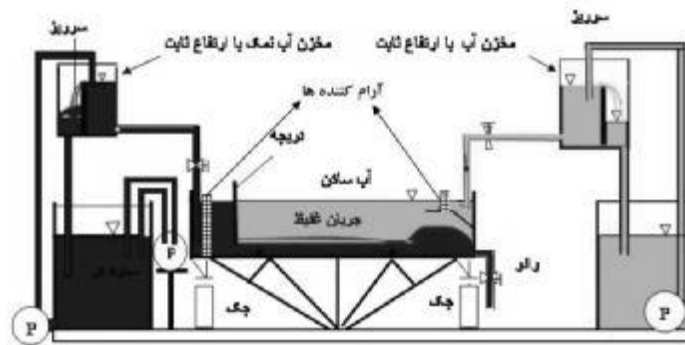
شکل 4 نمونه‌ای از ارتفاع غوطه‌وری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را نمایش می‌دهد. نقطه غوطه‌وری در مکانی به وقوع می‌پیوندد که ارتفاع جریان غلیظ بر روی شیب، کاهش می‌یابد. بر روی شکل این ارتفاع نیز با  $h_p$  نمایش داده شده است.

#### نتایج و بحث

مطابق با آنچه که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد و بر اساس سناریوهای آزمایشی، بر روی مدل فیزیکی آزمایش‌ها در سه شیب 8، 12 و 16 درصد با چهار غلظت مشخص و چند دبی ورودی انجام شد. سپس مدل Flow-3D تحت شرایط مدل تلاطمی RNG مطابق با شرایط آزمایشگاهی موجود در مجموع 36 آزمایش اجرا گردید. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی، داده‌های بدست آمده با استفاده از مدل ریاضی با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مقایسه و نتایج در سه شیب به طور جداگانه ترسیم شد. شکل 5 نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی شده در مدل برای آزمایش با دانسیته 1006 کیلوگرم بر متر مکعب در شیب 16 درصد و دبی جریان غلیظ 1/9 لیتر بر ثانیه را نمایش می‌دهد. در جدول 3 نمونه‌ای از نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای عمق غوطه‌وری در شیب 12 درصد ارائه شده است.

غلیظ و مخازن بار ثابت) و پمپ‌های مورد نیاز (پمپ تأمین آب زلال، اختلاط و تأمین جریان غلیظ هر آزمایش) می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری دبی ورودی جریان غلیظ به درون فلوم از روش حجمی استفاده شد. حوضچه آرامش در ابتدای فلوم برای جلوگیری از تأثیر نوسان بوجودآمده در اثر ریزش جریان غلیظ به درون فلوم بر روی دبی ورودی جریان غلیظ به درون فلوم و حوضچه آرامش آب زلال در انتهای فلوم، برای جلوگیری از تأثیر آب زلال ورودی بر روی جریان غلیظ و انعکاس آن به بالادست تعبیه شده‌اند. همچنین جهت ثابت نگه داشتن ارتفاع بار جریان غلیظ و آب زلال ورودی به فلوم به منظور جلوگیری از نوسان، مخزن با بار ثابت استفاده شد. این مخزن توسط یک تیغه فولادی به دو مخزن مجزا تبدیل شده (تفکیک آب زلال و سیال غلیظ). همچنین هر یک از این دو مخزن مذکور نیز با استفاده از تیغه فولادی به ارتفاع مشخص به دو قسمت مجزا تقسیم شده (جهت سر ریز آب زلال و سیال غلیظ). 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 (پمپ A) و دیگری وظیفه اختلاط جریان غلیظ و انتقال آن به داخل مخزن آب نمک با ارتفاع ثابت را انجام می‌دهد (پمپ B). پس از تهیه ماده غلیظ نمکی در یک سطل جداگانه، آن را در مخزن ذخیره جریان غلیظ حاوی آب ساکن ریخته، سپس توسط پمپ B آن‌ها مخلوط می‌شوند، در ادامه آب زلال و سیال غلیظ به درون مخزن با بار ثابت و از آن جا به درون فلوم انتقال داده شد. هنگامی که سطح جریان غلیظ پشت دریچه با سطح آب زلال درون فلوم برابر شد، دریچه ورودی فلوم به طور کامل باز می‌شود تا جریان غلیظ وارد آب زلال ساکن درون فلوم شود. با توجه به غلظت





شکل 3- نمای شماتیک از مدل فیزیکی



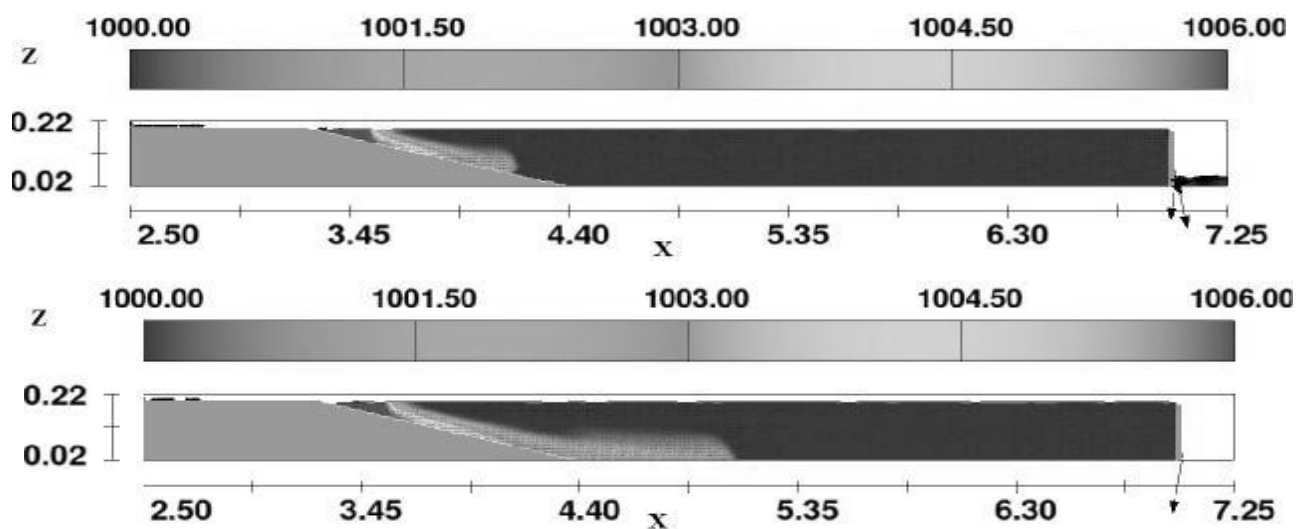
شکل 4- ارتفاع غوطه‌وری مشاهده شده در آزمایشگاه

جدول 3- نتایج عمق غوطه‌وری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای شیب 12 درصد

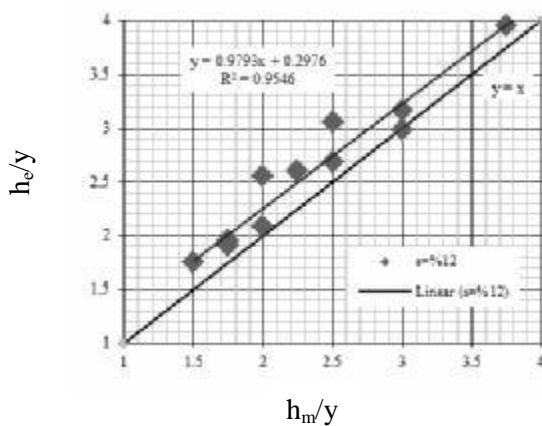
Q (L/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$h_e$ (cm)	$h_m$ (cm)
1/52	1006	7/50	7/9
1/10	1006	5	6/1
0/70	1006	4	4/2
1/40	1009	6	6/0
0/65	1009	3	3/5
1/05	1009	4	5/1
0/96	1013	3/50	3/9
1/45	1013	5	5/4
1/90	1013	8	8/6
1/45	1016	4/50	5/2
1/10	1016	3/50	3/8
1/90	1016	6	6/3

ترسیم گردید. شکل‌های 6 الی 8 نتایج مربوط به شیب‌های 8، 12 و 16 درصد را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها برای بی بعد کردن ارتفاع‌ها جهت برآزش از مقدار 2 سانتیمتر که ارتفاع آب بعد از دریاچه می‌باشد استفاده گردیده است. در اینجا لازم به ذکر است که با توجه باینکه  $h_e/y$  و  $h_m/y$  هر دو پارامترهای بی بعدی هستند لذا این محورها در نمودارهایی بعد در نظر گرفته شده‌اند.

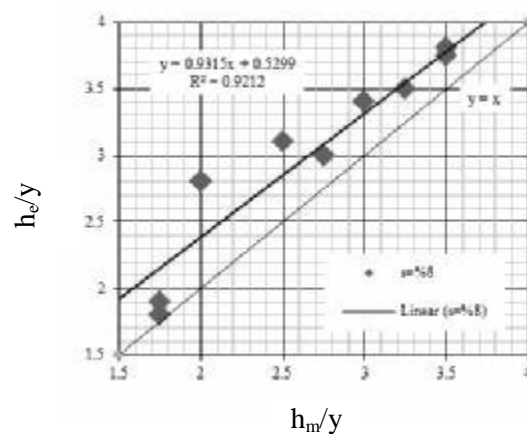
همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، نتایج عمق غوطه‌وری برای شیب 12 درصد برای کلیه غلظت‌های چهارگانه 6، 9، 13 و 16 گرم بر لیتر و در بی‌های مختلف آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص است که مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد؛ به گونه‌ای که، مقدار تفاوت 12/28 درصد می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع و مقایسه بهتر نتایج، مقادیر عمق‌های غوطه‌وری ارائه شده در جدول 3 به صورت نموداری



شکل 5- نتایج مدل ریاضی Flow-3D برای آزمایش ( $\rho = 1006 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $S = 16\%$ ,  $Q = 1.9 \text{ L/s}$ )

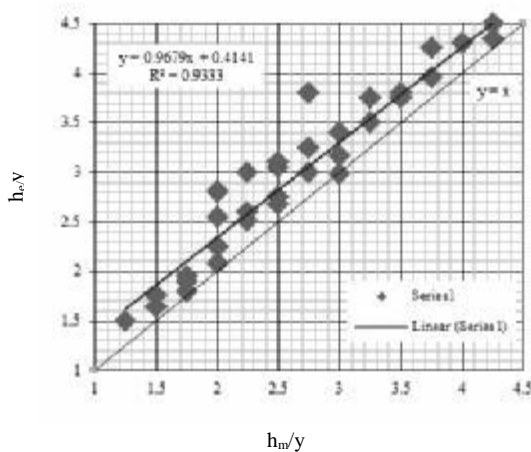


شکل 7- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب 12 درصد



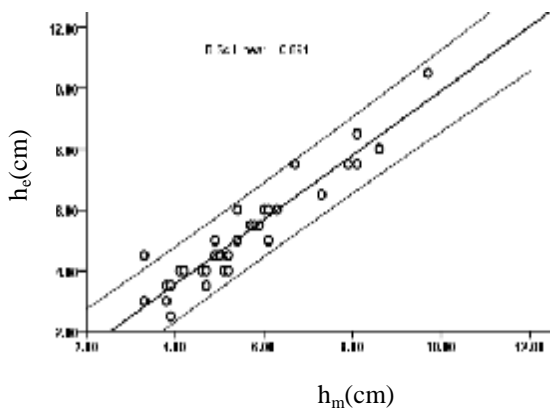
شکل 6- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب 8 درصد

اختلاف فشار بیشتر و به تبع آن نتایج بهتر RNG می‌باشد. شکل 9 برای کلیه شیب‌ها نتایج برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی Flow-3D را در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده نمایش می‌دهد.

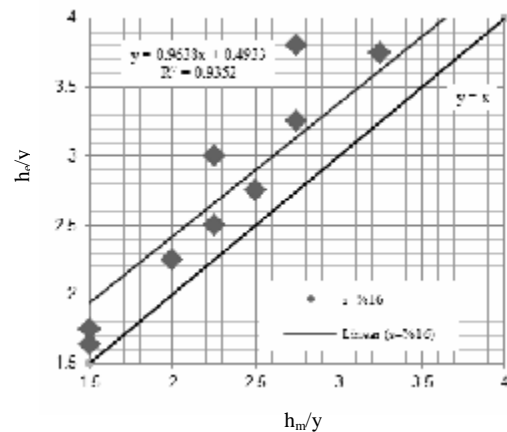


شکل 9- مقایسه داده‌های حاصل شده از مدل ریاضی با نتایج اندازه‌گیری شده در کلیه شیب‌ها

با توجه به شکل 9 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 Flow-3D مناسب است. مقدار ضریب رگرسیون در شکل 9 برابر با 86 درصد بوده که ضریب همبستگی نسبتاً بالایی می‌باشد. از طرفی داده‌های حاصل از مدل در سطح اطمینان 95% با استفاده از نرم‌افزار SPSS19 ترسیم شد. شکل 10 این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل 10- بررسی آماری و پراکنش داده‌های حاصل از Flow-3D در سطح اطمینان 95%



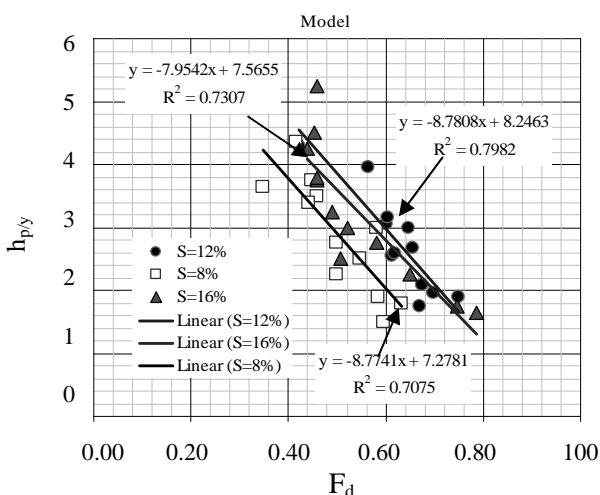
شکل 8- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب 16 درصد

همانطور که در شکل‌های 6 الی 8 مشاهده می‌شود، داده‌های شبیه‌سازی شده در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده ترسیم شده‌اند. با توجه به این اشکال در کلیه شیب‌ها مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی نسبت به نتایج اندازه‌گیری شده بیشتر بوده به گونه‌ای که در شیب 8 درصد مقدار اختلاف 14/70 درصد، در شیب 12 درصد مقدار اختلاف 12/28 درصد و برای شیب 16 درصد مقدار اختلاف شبیه‌سازی با نتایج واقعی 4/30 درصد می‌باشد. علت این امر را می‌توان در مدل تلاطمی مورد استفاده که مدل RNG 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 آشفتگی 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 چگالی باعث حرکت جریان غلیظ شده و در شیب بیشتر نیروی ثقل نیز باعث گسترش آن می‌گردد. از طرفی وجود نیروی شناوری در اثر اختلاف چگالی بوجود می‌آید و از عوامل تاثیر گذار بر نقطه 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 RNG می‌گردد. به لحاظ کمی برای شیب 16 درصد به طور کلی کمترین اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود و همان‌گونه که ذکر شد دلیل آن در

شیب	8%	12%	16%
ضریب مدل	0/88	0/91	0/93

همچنین با توجه به نزدیکی بودن ضرایب تصحیح برای مدل در شیب‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شیب تأثیر چندانی بر روی نقطه غوطه‌وری نگذاشته است. این نتیجه نیز از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده است. همچنین در این تحقیق تغییرات ارتفاع غوطه‌وری نسبت به عدد فرود چگال مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل‌های 11 و 12 آورده شده است.

با توجه به شکل 10 مشخص است که داده‌های کمی خارج از محدوده خطوط 95% قرار دارند که این نشان-دهنده دقت بالای مدل در برآورد داده‌ها است. با این توضیح در شیب‌های مختلف مقدار ضریب اصلاحی در نتایج برآورد شده با استفاده از Flow-3D در جدول 4 ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول 4 مشخص است که مدل داده‌های آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی مقادیر اندازه گیری شده را برآورد می‌نماید. به طور کلی برای کلیه شیب‌ها مقدار ضریب اصلاحی نتایج Flow-3D 0/91 می‌باشد.



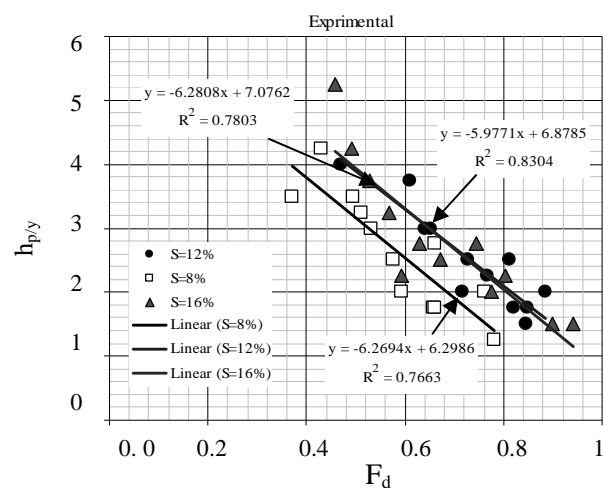
شکل 12- بررسی آماری نقطه غوطه‌وری در مقابل عدد فرود چگال مدل ریاضی

پارامتر عدد فرود چگال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ارتفاع غوطه‌وری خواهد داشت.

### نتیجه‌گیری

مطابق با آنچه که در این تحقیق گذشت، می‌توان نتایج بدست آمده را مطابق با بندهای زیر خلاصه نمود:

در این تحقیق مدل تلاطمی RNG برای شبیه‌سازی نقطه غوطه‌وری مورد استفاده قرار گرفت که به طور کلی در این مدل تلاطمی اگر اختلاف فشار



شکل 11- بررسی آماری نقطه غوطه‌وری در مقابل عدد فرود چگال مدل آزمایشگاهی

با توجه بررسی‌های آماری انجام شده برای فرود چگال برای هر دو مدل آزمایشگاهی و ریاضی که در شکل‌های 11 و 12 آورده شده‌اند، مشاهده می‌شود که در شیب‌های 12 و 16 درصد با توجه باینکه افزایش نیروی ثقل در مقایسه با نیروی شناوری چندان قابل توجه نبوده می‌توان نتیجه گیری نمود که بین این دو شیب تأثیر عدد فرود چگال بر روی ارتفاع غوطه‌وری ناچیز است. در شیب 8 درصد با توجه باینکه شیب کم است لذا نیروی ثقل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان ثقیلی نداشته در نتیجه بر عدد فرود چگال در مقایسه با دو شیب دیگر تأثیر چندانی ندارد بنابراین در این شیب

قرار دارند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد داده‌ها است. با استفاده از تحلیل‌های آماری در شیب‌های مختلف ضریب اصلاحی در نتایج برآورد شده محاسبه گردید. به طور کلی برای کلیه شیب‌ها مقدار ضریب اصلاحی 0/91 می‌باشد.

با توجه به نزدیکی بودن ضرایب تصحیح آماری برای مدل در شیب‌های مختلف می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شیب تاثیر چندانی بر روی نقطه غوطه‌وری ندارد.

نتایج نشان داد که در شیب‌های 12 و 16 درصد تاثیر عدد فرود چگال بر روی ارتفاع غوطه‌وری ناچیز است. در شیب 8 درصد تاثیر عدد فرود چگال در مقایسه با دو شیب دیگر بیشتر شده و بنابراین در این شیب پارامتر عدد فرود چگال تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ارتفاع غوطه‌وری خواهد داشت.

در جریان دوفازی آشفته بیشتر باشد نتایج بهتری حاصل می‌شود.

با افزایش نیروی ثقل میزان اختلاف فشار در جریان دوفازی افزایش یافته که باعث بهتر شدن نتایج مدل تلاطمی RNG می‌گردد. به لحاظ کمی برای شیب 16 درصد به طور کلی کمترین اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود.

بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد؛ به گونه‌ای که در شیب 8 درصد مقدار اختلاف 14/70 درصد، در شیب 12 درصد مقدار اختلاف 12/28 درصد و برای شیب 16 درصد مقدار اختلاف شبیه‌سازی با نتایج واقعی 4/30 درصد می‌باشد. بر اساس محاسبات آماری مشخص گردید که داده‌های بدست آمده در محدوده سطح اطمینان 95%

#### منابع مورد استفاده

- اکرمی ا، 1375. وضعیت رسوبگذاری در سدهای ایران و مقایسه آن با روش‌های تئوریک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- تربن ع. 1383. شبیه‌سازی عددی رسوبگذاری در مخازن سدها با مدل‌های یک بعدی، شبه دو بعدی و سه بعدی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران. سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس.
- چاپلی ا، 1380. بررسی راندمان تله اندازی رسوب در سدهای تأخیری با استفاده از مدل فیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- صاحب شیبان ع، 1381. بررسی مدل رسوب گذاری جریان‌های چگال در مخازن پشت سدها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- Akiyama J and Stefan HG, 1984. Plunging flow into a reservoir: theory. J Hydr Eng, ASCE 110(4): 484-499.
- Bournet P, Datus D, Tassin B and Vincon-Leite B, 1999. Numerical investigation of plunging density current. J Hydr Eng, ASCE 125(6): 584-594.
- Cesare GD, Schleiss A and Hermann F, 2001. Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. J Hydr Eng, ASCE 127(1): 6-16.

- Dallimore CJ, Imberger J and Hodges BR, 2004. Modeling a plunging underflow. *J Hydr Eng, ASCE* 130(11): 1068-1076.
- Flix M, Sturton S and Peakall J, 2005. Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents. *Journal of Sedimentary Geology* 179:31-47.
- Firoozabadi B, Farhanieh B and Rad M, 2003. Hydrodynamics of 2-D laminar turbidity current *J Hydr Res* 41(6):623-630
- Graf WH and Altinakar MS, 1998. *Fluvial Hydraulics-Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*. Wiley, New-York.
- Ghomeshi M, 1995. Reservoir sedimentation modeling. PhD Thesis. University of Wollongong, Australia.
- Haghiabi AH, 2004. The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents. PhD Thesis. Shahid Chamran University. Ahwaz, Iran.
- Hebbert B, Imberger J, Loh I and Patterson J, 1979. Collie river underflow into the wellington reservoir. *Journal of Hydr Div, ASCE* 105 (HYS): 553-545.
- Kubo Y and Nakajima T, 2002. Laboratory experiments and numerical simulation of sediment-wave formation by turbidity current. *Journal of Marine Geology* 192: 105 -121.
- Kolmogorov AN, 1942. Equations of turbulent motion of an incompressible fluid. *Izvestia Academy of Sciences. Physics* 6(182) : 56-58.
- Lee HY and Yu W, 1997. Experimental study of reservoir turbidity current. *J Hydr Eng, ASCE* 123(6):520-528.
- Lauder BE and Spalding DB, 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3: 269-289.
- Parker G and Toniolo H, 2007. Note on the analysis of plunging of density flows. *J Hydr Eng, ASCE* 133(6): 690-694.
- Prandtl L, 1945. Ube rein neues Formelsystem fur die ausgebildate turbulenz, *Nacr. Akad Wiss Gottingen. Math-Phys. KL*. Pp: 6-19.
- Prandtl L, 1925. Uber die ausgebildate turbulenz, *ZAMM*. 5: 136-139.
- Rotta JC, 1951. Statische theorie nichthomogener turbulenz. *Zeitschrift fur Physik* 129: 547-572.
- Savage SB and Brimberg J, 1975. Analysis of plunging phenomena in water resource. *Journal of Hydr Res, IAHR* 13(2): 187-204.
- Singh Band Shah CR, 1971. Plunging phenomena of density currents in reservoirs. *Lahouille Blanche* 26(1): 59-64.

- Toniolo H and Parker G, 2003. 1-D numerical modeling of reservoir sedimentation. Pp: 457-468. Proceeding, IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphology Dynamics. September 1-5, Barcelona, Spain.
- Yamamoto K, Yokoyama K, Takashima S and Abe S, 2008. Behavior of the turbidity plume relating to a density current in a tidal river. Pp. 9: 64-82. Proceedings in Marine Science. April 15. Okays University, Japan.