

بررسی تجربی رشد عرضی و طولی جریان گل آلود سه بعدی در حالت غیر دائم

بهار فیروزآبادی^۱، سید محمد رضا موسوی حکمتی^۲، منوچهر راد^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- مری امدادی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهری و دانشجوی دکتری واحد علوم و تحقیقات

۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این تحقیق جریان گل آلود (turbidity current) در حالت سه بعدی، مغوش و غیر دائم به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تحلیل ابعادی مدلی تئوری جهت پیش بینی رشد عرضی و طولی جریان به دست آمده است. عرض جریان، b ، و فاصله نوک دماغه پیشانی از ورودی، x شاره چگال نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه $(Q_o^3 / B_o)^{1/5} = l_o$ بدون بعد شده اند و نیز زمان منتظر با، t_o ، و α نسبت به عبارت $U_o / t_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ که مقیاس زمانی شناوری اولیه نام نهاده شده بدون بعد می شود. نتایج نشان می دهد، در منحنی های عرض بدون بعد بر حسب طول بدون بعد و همچنین در منحنی های عرض بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد دو ناحیه R_1 ($b / l_o \leq 2$) و R_2 ($b / l_o > 2$) قابل تشخیص است. این امر حاکی از آن است که در این دو ناحیه، مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند متفاوتند. در ناحیه R_1 نرخ رشد عرض جریان کمتر از ناحیه R_2 می باشد، بطوریکه عرض جریان در ناحیه R_1 و R_2 به ترتیب، متناسب با $x^{1.2}$ و $x^{0.25}$ می باشد. پراکندگی نتایج پخش طولی نشان می دهد که وجود سه ناحیه R_1 ، R_2 و R_3 قابل تشخیص است، ناحیه R_1 بیشترین و ناحیه R_2 ، کمترین نرخ رشد (پخش) طولی نسبت به دو ناحیه دیگر را دارا هستند. نرخ رشد طولی در نواحی R_2 و R_3 به ترتیب متناسب با $t^{0.55}$ و $t^{0.7}$ می باشد و در ناحیه R_1 تقریباً متناسب با $t^{0.89}$ است.

کلمات کلیدی: جریان گل آلود، رشد عرضی و طولی، سه بعدی، غیر دائم

Investigation of lateral and longitudinal growth of 3-D inclined unsteady turbidity currents

Abstract

In this paper, the spreading of three-dimensional, turbulent and unsteady inclined turbidity currents has been investigated. The experimental results were normalized in the form of non-dimensional plots and then a theoretical model was developed. The current width, b , and the relative situation of the tip of the nose of turbidity current, x , are normalized with respect to the buoyancy length scale $l_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ and related time t is normalized with respect to the buoyancy time scale. Results show that the non-dimensional current width vs non-dimensional distance and non-dimensional time, $t_o = 1/U_o (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$, two regimes R_1 ($b / l_o \leq 2$) and R_2 ($b / l_o \geq 2$) are distinguished. This indicates that in these two regimes, the amount and type of the balanced forces are different. In regime R_1 , the rate of lateral growth is less than regime R_2 ,

while the current width in R_1 and R_2 regimes, respectively are proportional to $x^{0.25}$ and $x^{1.2}$. In the plots of the non-dimensional current length vs. non-dimensional time, three regimes R_1 , R_2 and R_3 are distinguished. In regime R_1 , the rate of longitudinal growth is more than other regimes while regime R_2 is less. The current length in R_2 and R_3 regimes, respectively are proportional to $t^{0.55}$ and $t^{0.7}$, approximately in regime R_1 , is proportional to $t^{0.89}$

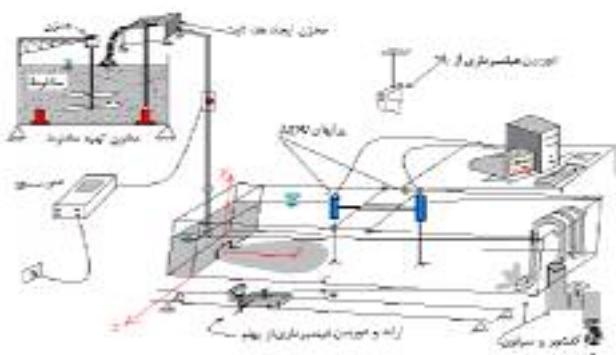
Keywords: Turbidity current, Lateral and longitudinal growth, Three-dimensional unsteady underflows

زبانه یک جریان چگال باشد که متناوباً توسط جزر و مد ایجاد می‌شود. این امر ممکن است بر رفتار جریان چگال در مصب رودخانه اثر بگذارد، بطوریکه زبانه رودخانه در سطح و زبانه آب شور در کف ایجاد شود. در کف اقیانوسها حرکت گل و لای عمدتاً به دلیل حضور جریانهای چگال می‌باشد. وقوع حرکت رسوبات در کف دریا و وجود ارگانیسم‌ها و هوا دهی در عمق زیاد و نزدیک کف، دلایل وجود جریانهای چگال است. دانستن سرعت این جریانها می‌تواند کمک بزرگی در درک فرآیندهای تشکیل آبراهه‌های زیردریا (Canyon Fan) باشد. در زمین لرزه‌ای که در سال ۱۹۲۹ میلادی در شمال نیوفوندلند (New Found land) به شدت ۷ Grand-Banks ریشتراخ داد و به عنوان زمین لرزه مشهور شده، جلگه‌ای ژرف از جریان گلآلود به سمت جنوب اقیانوس در طول ۲۰۰ km به راه افتاد. در صد کیلومتر اول حرکت این جریان شتابدار و شوینده بستر کف بوده و توانسته بود کف دره را کنده و با خود تا فاصله ۲۰۰ km ببرد. با از دست دادن سرعت در صد کیلومتر دوم، مواد سنگین رسوب کرده و جریان در نهایت، محو شده است. این جریان عظیم پتانسیلی حدود ۵۰ الی ۱۰۰ کیلومتر مربع مواد را جابجا کرده و کابلهای کف دریا را پاره کرده است. برای این جریان سرعتی حدود ۳۵۰ مایل دریایی بیان شده است [۵,۶]. فن و موریس [۷] ذکر می‌کنند که جریان گلآلود می‌تواند کیلومترها ذرات لای و رس را با خود حمل کند. صلاح الدین و همکاران [۸] دریافتند که رسوبات ریز در جریان چگالی، ظرفیت حمل ذرات درشت‌تر را افزایش می‌دهند، علویان [۹] آزمایشاتی بر روی جریان چگال آب - نمک سه بعدی، تحت شیب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه انجام داد. وی نشان داد، پخش عرضی جریان

۱- مقدمه

یکی از پدیده‌های دریایی که در شکل‌دهی کف دریاهای و اقیانوسها و انتقال رسوبات از رودخانه به دریا نقش بسزایی دارد جریان چگال (Density Current) یا جریان ثقلی (Gravity Current) می‌باشد. زمانی که جریان گلآلود رودخانه‌ها وارد دریا یا مخزن سد می‌شود به علت سنگین‌تر بودن از آب دریا یا مخزن به داخل آن فرو رفته و در روی کف و در جهت شیب جریان می‌یابد. به این پدیده که در اثر اختلاف چگالی بین لایه‌های مختلف سیال بوجود می‌آید، جریان چگال گفته می‌شود. جریان چگال حاوی ذرات جامد معلق اصطلاحاً جریان گلآلود (Turbidity Current) نامیده می‌شود. اختلاف چگالی که محرک اصلی رانش این جریان است، می‌تواند ناشی از اختلاف درجه حرارت، وجود مواد محلول و وجود ذرات معلق باشد [۱]. گرادیان چگالی به دلیل دارا بودن مولفه‌ای در جهت جریان نیروی رانش را بوجود آورده و سیال چگال‌تر را در زیر سیال با چگالی کمتر به حرکت در می‌آورد. این جریان در زمینه‌های مختلفی از علوم تعاریف متفاوت موردن بررسی و تحقیق قرار گرفته است، که می‌توان از ژئوفیزیک، هیدرولیک و هواشناسی نام برد. لایه مرزی، انتقال جرم و حرارت، اقیانوس‌شناسی، مکانیزم حرکت بهمن، زدودن آلودگی‌های نفتی و جوی، حشره‌شناسی و کنترل آفات و تکنولوژی گازهای متراکم از مواردی است که جریان چگال در آنها بررسی می‌شود [۲,۳]. در اقیانوسها، جریان چگال در اثر اختلاف شوری و درجه حرارت ایجاد می‌شود و یا به صورت جریان‌های گلآلود پدیده می‌شود [۴] که گاهی سرعت آنها به مقادیر قابل ملاحظه‌ای می‌رسد. خطوط حاوی کف در سطح اقیانوسها ممکن است نشان دهنده

اگرچه تحقیقات چندی درباره جریانهای گل آlund انجام شده است [۱۳]، اما تحقیقات در جریان سه بعدی حاوی ذرات همچنان ناچیز است. به همین دلیل بسیاری از پارامترهای فیزیکی این جریانها به ویژه در حالتی مغذی معمولی ناشناخته مانده است [۱۴]. هدف تحقیق حاضر بررسی تجربی رفتار جریان چگال مغذی معمولی، سه بعدی و حاوی ذرات بوده است. این بررسی منجر به تهیه مدلی شده است که می‌تواند رشد عرضی و طولی جریان را از نظر زمانی و مکانی پیش‌بینی نماید.



شکل ۱- طرح شماتیک دستگاه آزمایش

۲- دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایشها

دستگاه آزمایش یک کanal شبیه‌بازیر به ابعاد ۱۲ متر طول، ۱/۵ متر عرض کل (عرض استفاده شده در این آزمایشات ۱/۲۶ متر می‌باشد) و ۰/۶ متر ارتفاع می‌باشد. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱ دیده می‌شود. یک مخزن تغذیه (مخزن تهیه مخلوط) به شکل استوانه از فولاد ضد زنگ و به حجم ۲ متر مکعب در بالا دست قرار می‌گیرد که حاوی مخلوط ذرات و آب است. جهت ایجاد مخلوط حاوی ذرات از کائولن (Kaolin) با چگالی مخصوص ۲۶۵ کیلو گرم بر مترمکعب و اندازه متوسط ذرات (D_{50}) حدود ۲۰ میکرون استفاده شده است. این محدوده ذرات رس را به خوبی پوشش می‌دهد. در این آزمایشات از سه غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۱۵٪ استفاده شد. بدین ترتیب که با اندازه‌گیری

چگالی، وابسته به شار شناوری اولیه و شبکه می‌باشد بطوریکه در یک شبکه ثابت با افزایش شار شناوری اولیه، نرخ پخش عرضی افزایش می‌یابد و در یک شار شناوری اولیه ثابت با افزایش شبکه، نرخ پخش عرضی کاهش می‌یابد زیرا مولفه نیروی رانش در جهت شبکه افزایش می‌یابد. هرچهار [۱۰] در بررسی خود بر روی جریانهای چگالی ناشی از اختلاف شوری و حرارت، وجود دو رژیم را تشخیص می‌دهد. ۱- رژیم در حال گسترش، در این رژیم رشد جریان را می‌توان به وسیله شرایط اولیه‌اش تخمین زد. طبیعت این رژیم وابسته به پارامتر $Re \tan^2 / Ri$ است که در آن Re و Ri به ترتیب اعداد رینولدز و ریچاردسون اولیه و θ زاویه شبکه می‌باشند. ۲- رژیم کاملاً

گسترش یافته، که مستقل از شرایط اولیه جریان می‌باشد. در این رژیم، اگر عدد اشمتیت جریان بزرگتر از یک باشد ($Sc > 1$)، تعادل نیرویی بین نیروهای شناوری و لزج و اگر $Sc < 1$ باشد، تعادل نیرویی بین نیروهای شناوری و اینرسی برقرار است. عمران و همکاران [۱۱] گسترش عرضی جریان چگال دایم و سه بعدی را بصورت عددی در کanal زیر آبی محدود و نامحدود در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار دادند که عبارتند از یک حالت کanal مستقیم محدود شده و سه حالت کanal مستقیم محدود نشده با شبکه‌ای عرضی مختلف کanal. نتایج نشان می‌دهد که بزرگی جریان عرضی بطور قوی وابسته به شبکه عرضی می‌باشد و نیز در حالت کanal مستقیم محدود شده، دیواره‌های جانبی بلند کanal باعث می‌شود که جریان چگال در داخل کanal نگه داشته شده و منجر به رشد عمودی جریان شود. تسيهيرينتريس و علويان [۱۲] بر اساس تعادل بین نیروهای مقاوم و رانش، که عبارتند از گرانش، شناوری، اینرسی و اصطکاک در هر دو جهت طولی و عرضی حلهای تحلیلی ساده‌ای را برای پخش طولی و عرضی ارائه نمودند، بطوریکه عبارتهای تحلیلی بدست آمده بر حسب زمان t ، به شبکه کف، شار شناوری اولیه، عدد ریچاردسون اولیه و هندسه جریان چگال در ورودی، بستگی دارند. حل تحلیلی حاصل، سازگاری خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

جهت اندازه‌گیری رشد (پخش) طولی و عرضی جریان چگال و نیز مشاهده شکل پیشانی از دو دوربین فیلمبرداری دیجیتال استفاده شده است. کanal اسکلت فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای دارد که قابل فیلمبرداری از پهلو می‌باشد. در سمت پهلوی کanal یک ریل فلزی ساخته شده است که ارابه فیلمبرداری بر روی آن حرکت می‌کند و با نصب دوربین بر روی آن می‌توان از پخش طولی، ارتفاع بدنی و پیشانی جریان با دقیق سی تصویر در یک ثانیه فیلمبرداری کرد. کanal جهت اندازه‌گیری پخش طولی و عرضی جریان، شبکه بندی شده است. یک دوربین دیگر در بالای کanal تعییه شده تا از نحوه پخش عرضی جریان چگال فیلمبرداری نماید. چگالی شاره حاوی ذرات قبل از ورود به دریچه با سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است. در نتیجه در طول حرکت شاره چگال، غلظت موضعی اندازه‌گیری نشده است.

در این آزمایش از سه غلظت، سه دبی و سه شیب متفاوت استفاده شده و اثر آنها بر ارتفاع، سرعت جریان چگال و ارتفاع رسوب اندازه‌گیری شده است. جدول ۱ نشان دهنده شرایط اولیه اجراهای مختلف آزمایش می‌باشد. اعداد ریچاردسون ورودی (Ri_{in})، (عدد ریچاردسون، نسبت نیروهای شناوری به نیروهای اینرسی می‌باشد) و رینولدز ورودی (Re_{in})، (عدد رینولدز نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزجی تعریف می‌شود) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Ri_{in} = \frac{g'_{in} h_{in} \cos \theta}{u_{in}^2} \quad (1)$$

$$Re_{in} = \frac{u_{in} h_{in}}{v} \quad (2)$$

g' شتاب ثقل کاهش یافته ورودی و برابر $g(\rho_{in} - \rho_w)/\rho_w$ ، h_{in} و u_{in} ارتفاع و سرعت شاره چگال در ورود، θ شیب کف و v لزجت سینماتیکی مخلوط در ورود است. g شتاب ثقل و ρ_{in} و ρ_w به ترتیب اختلاف چگالی شاره و آب صاف و چگالی آب صاف است. با توجه به اینکه غلظتها مورد استفاده در

دمای آب، چگالی آن را از جداول مشخص کرده و سپس مقدار وزنی از آب که می‌بایست با مقدار وزن معینی از کائولن مخلوط شود، حاصل می‌شود. به دلیل نیاز به هد ثابت در خروجی این مخزن و جهت تنظیم دبی ثابت، در بالای این مخزن، یک مخزن کوچکتر به ابعاد $30 \times 50 \text{ cm} \times 50$ تعییه شده است. ابتدا مخلوط حاوی ذرات توسط یک پمپ کف کش به درون مخزن کوچکتر (مخزن ایجاد هد ثابت) پمپ می‌شود و اضافه آن به درون مخزن تهیه مخلوط سرربیز می‌شود که این عمل همچنین باعث سیرکولاسیون و ممانعت از تهنشینی می‌گردد. یک پمپ کف کش دیگر نیز در درون مخزن تغذیه قرار گرفته و عمل سیرکولاسیون را انجام می‌دهد و همچنین از یک همزن نیز جهت ممانعت از تهنشینی ذرات استفاده شده است. جریان حاوی ذرات بعد از مخزن ایجاد هد ثابت، وارد قسمتی از کanal می‌شود که از بقیه کanal توسط دیواره‌ای جدا شده است و آب صاف به این قسمت راه ندارد. زمانیکه سطح مخلوط چگال هم سطح آب صاف کanal اصلی شد، توسط یک دریچه زیر گذر (که به صورت کشویی باز می‌شود و به ابعاد $10 \text{ سانتیمتر طول} \times 1/25 \text{ سانتیمتر ارتفاع}$) جریان چگال در زیر آب صاف وارد کanal اصلی می‌گردد و در انتهای کanal به صورت کفسشور و سیفون تخلیه می‌شود. لذا عرض اولیه شاره چگال 10 سانتیمتر و ارتفاع اولیه آن $1/25 \text{ سانتیمتر}$ می‌باشد. جریان چگال حاوی ذرات کائولن در زیر آب صاف به سمت پایین دست در عرض و طول کanal گسترش می‌یابد. شیب کanal توسط جکهای هیدرولیکی حداقل تا $3/5 \%$ تغییر می‌کند. آزمایشات در سه شیب 1° ، 2° و 3° درصد انجام شده است.

جهت اندازه‌گیری دبی جریان از یک دبی‌سنج اولتراسونیک ساخت شرکت Greyline کانادا، مدل DFM با دقیق $1/0.1 \text{ لیتر}$ بر دقیقه استفاده شده است. این دبی‌سنج جهت اندازه‌گیری دبی از پدیده داپلر استفاده می‌کند و صدور و انکاس موج صوتی را کالیبره می‌نماید. آزمایشات در سه دبی 10° ، 15° ، 20° لیتر بر دقیقه انجام شده است.

جدول دیده می شود، درجه حرارت آب نیز یادداشت شده تا بتوان اثر آن را در محاسبه لزجت سینماتیک وارد کرد. در این جدول C_{in} غلظت وزنی مخلوط در ورودی، می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_{in} = \frac{w_k}{w_w} \times 100 \quad (\text{¶})$$

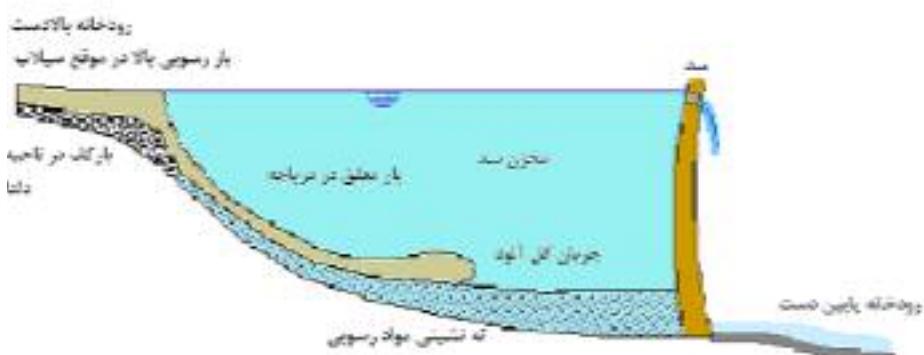
و w_k به ترتیب وزن آب و کائولن مخلوط شده هستند. S شبکه کف کانال می باشد. شکل ۲ شماتیک جریان چگال گلآلود در یک مخزن و شکل ۳ شماتیک رشد عرضی و طولی آن را نمایش می دهد.

این آزمایشها کم است، لذا از تاثیر آن بر لرجهت مخلوط آب و ذرات کائولن صرفنظر شده و بنابر این لرجهت جریان چگال برابر لرجهت آب در نظر گرفته شده است [۳].

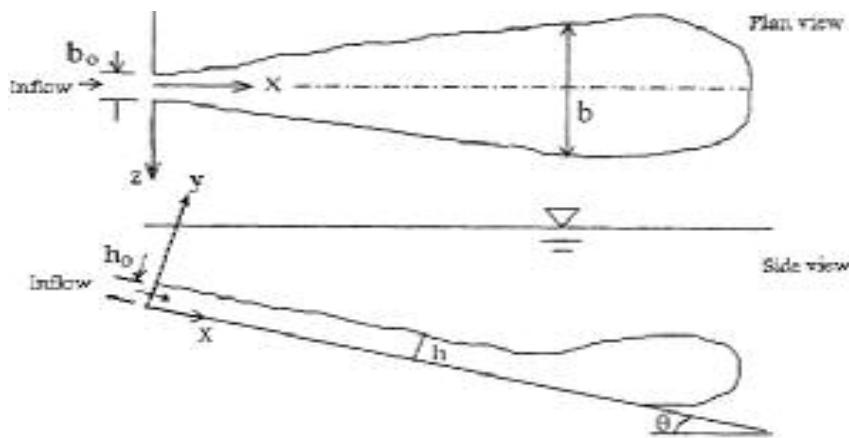
جدول ۱ نشان می دهد که محدوده عدد رینولدز ورودی در آزمایشات از ۳۶۰ تا ۳۰۲۰ را پوشش داده است. همچنین اعداد ریچاردسون ورودی توانسته است محدوده ای بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۶ را پوشش دهد. انتخاب این محدوده وسیع به این دلیل است که بتوان اثر عوامل مختلف را در جریان بررسی کرد. چنانکه در

جدول (۱) شرایط اولیه اجراهای مختلف آزمایش

RUN	S	Re _{in}	C _{in}	Ri _{in}	U _{in} (m/s)	Qo[lit/min]	g' _{in}	Bo[m ⁴ /s ³]	Io	to	T(°C)
15	3%	2759.15	1.50%	0.01	0.2666	20	0.06	1.895E-05	0.072	0.271	13
16	2%	1461.62	0.50%	0.026	0.1333	10	0.04	6.211E-06	0.059	0.446	15
17	2%	2242.64	0.50%	0.012	0.1999	15	0.04	9.315E-06	0.07	0.35	16
18	2%	2990.94	0.50%	0.007	0.2666	20	0.04	1.242E-05	0.078	0.294	16
19	2%	1532.32	1%	0.033	0.1333	10	0.05	7.848E-06	0.057	0.426	17
20	2%	2191.89	1%	0.015	0.1999	15	0.05	1.176E-05	0.067	0.334	15
21	2%	2923.25	1%	0.008	0.2666	20	0.05	1.569E-05	0.075	0.281	15
22	2%	2269.94	1%	0.015	0.1999	15	0.05	1.177E-05	0.067	0.334	16.5
23	2%	1513.67	1.50%	0.04	0.1333	10	0.06	9.482E-06	0.055	0.41	16.5
24	2%	2269.94	1.50%	0.018	0.1999	15	0.06	1.422E-05	0.064	0.322	16.5
25	2%	3027.34	1.50%	0.01	0.2666	20	0.06	1.896E-05	0.072	0.271	16.5
26	1%	1495.47	0.50%	0.026	0.1333	10	0.04	6.212E-06	0.059	0.446	16
27	1%	1495.47	0.50%	0.026	0.1333	10	0.04	6.212E-06	0.059	0.446	16
28	1%	2242.64	0.50%	0.012	0.1999	15	0.04	9.315E-06	0.07	0.35	16
29	1%	1488.39	1%	0.033	0.1333	10	0.05	7.846E-06	0.057	0.426	15.8
30	1%	2878.55	0.50%	0.007	0.2666	20	0.04	1.242E-05	0.078	0.294	14.5
31	1%	2878.55	0.50%	0.007	0.2666	20	0.04	1.242E-05	0.078	0.294	13.5
32	1%	2127.68	1%	0.015	0.1999	15	0.05	1.176E-05	0.067	0.334	14
33	1%	2990.94	1%	0.008	0.2666	20	0.05	1.569E-05	0.075	0.281	16
34	1%	1559.26	1.50%	0.041	0.1323	10	0.06	9.413E-06	0.054	0.412	18
35	1%	2242.64	1.50%	0.018	0.1999	15	0.06	1.422E-05	0.064	0.322	16
36	1%	3027.34	1.50%	0.01	0.2666	20	0.06	1.896E-05	0.072	0.271	16.5



شکل ۲- شماتیک حریان چگالی



شکل ۳- شماتیک رشد عرضی و طولی جریان چگالی گل آسود

۳- مدل تئوری و نتایج حاصل از آزمایشات

۳-۱-۳- مدل رشد عرضی غیردائم برحسب مکان

در این بحث بر اساس دسته بندی تعادل نیروها [۱۴] رشد عرضی جریان چگال بررسی می‌شود و مدلی تئوری برای این رشد، ارائه می‌شود. برای رشد عرضی در حالت غیردائم از نمودار عرض بدون (b / l_o) استفاده شده است. در این نمودارها، b ، عرض جریان چگال و، x ، موقعیت نسبی نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی می‌باشد که نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه $l_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ بدون بعد شده‌اند. Q_o دبی ورودی و $B_o = g' u A$ فلاکس شناوری اولیه می‌باشند. در شکل ۴، نتایج آزمایشات (اجراها) در شیب‌ها، غلظت‌ها و دبی‌های مختلف نمایش داده شده است. بطوریکه پراکندگی نتایج نشان می‌دهد، در این نمودار، دو ناحیه R_1 و R_2 قابل تشخیص است. چنانچه مشاهده می‌شود در نقطه $x / l_o \approx 6$ تغییری در شیب داده‌ها اتفاق می‌افتد و لذا دو ناحیه R_1 ($x / l_o < 6$) و R_2 ($x / l_o > 6$) را می‌توان تقریباً در همینجا از هم مجزا دانست. در کلیه اجراهای، میزان رشد عرضی b برای مقادیر ذکر شده فوق مختلف است و این امر حاکی از آن است که در این دو ناحیه، مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند متفاوتند. از هر یک از نواحی

مذکور خطی در صفحه Log-Log به صورت شکل کلی ذیل می‌توان برازش نمود.

$$b / l_o = A(x / l_o)^n \quad (4)$$

n شیب خط گذرانده شده در صفحه Log-Log و ضریب تناسب می‌باشد. تقسیم جریان از نقطه نظر تعادل نیروها به سه ناحیه، از پیشنهادات تسیه‌های تجزیس و علیوان [۱۲] می‌باشد. آنها جریان چگال در حال پخش را که تحت شرایط شیب متوسط و مافق بحرانی ($Ri_{in} < 1$) در ورودی می‌باشد، از نقطه نظر تعادل نیروها به سه ناحیه تقسیم کرده‌اند که به ترتیب رخداد عبارتند از: ۱- اینرسی - لزجی ۲- شناوری - لزجی ۳- گرانش - لزجی، آنها این تقسیم بندی را هم برای پخش عرضی و هم طولی به کار می‌گیرد. اما همانطور که از نتایج پخش طولی بر می‌آید و با توجه به اینکه در تحقیق حاضر نیز جریان چگال تحت شرایط شیب متوسط و مافق بحرانی ($Ri_{in} < 1$) در ورودی می‌باشد، بنابراین در ابتدای ورود جریان چگال به زیر آب تمیز که اصطکاک ناچیز است تعادل بین نیروهای اینرسی و لزجی (ناحیه R_1) برقرار است و سپس در طول کوتاهی که پرش

با توجه به رابطه (۴)، عرض b نسبت به x در هر یک از نواحی R_1 و R_2 از فرمول زیر تعیین می‌کند:

$$b = A' x^n \quad (7)$$

در رابطه (۷)، A' ضریب تناسب می‌باشد. چنانچه مشاهده می‌شود، برای هر اجرا، در کلیه منحنی‌های شکل ۴، شیب نتایج برداشت شده در ناحیه R_2 با تغییرات غلظت، دبی و شیب ثابت است. ولی در ناحیه R_1 شیب نتایج برداشت شده، برای هر اجرا، ثابت نیست و در غلظتها، دبی‌ها و شیب‌های بالاتر، تغییر آن بیشتر مشهود است، اما در محدوده پراکندگی نتایج حاضر، ثابت در نظر گرفته شده است.

مشاهدات تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در ناحیه اخیر به دلیل فوق بحرانی بودن جریان، آشفتگی زیادی در جریان وجود دارد، گردابه‌ها و افت و خیزهای نیز در فصل مشترک عرضی جریان چگال و آب صاف دیده می‌شود که این امر می‌تواند دلیل پراکندگی نتایج برداشت شده در ناحیه R_1 باشد. در ناحیه R_1 عرض آهسته‌تر رشد می‌کند و متناسب با $x^{0.25}$ است. در ناحیه R_2 عرض با $x^{1.2}$ متناسب است و مقدار میانگین ضریب A' در ناحیه R_1 و R_2 با توجه به خط برآش شده در صفحه Log-Log به ترتیب $1/9$ و $0/35$ می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه افزایش شیب و غلظت تغییر معنی داری در داده‌ها ایجاد نمی‌کند، لذا با این توصیف می‌توان در محدوده آزمایش، رشد عرضی نسبت به مکان را به صورت بدون بعد در ناحیه R_1 و R_2 به ترتیب مطابق روابط کلی ذیل در نظر گرفت.

$$b / l_o = 1.9(x / l_o)^{0.25} \quad (8)$$

$$b / l_o = 0.35(x / l_o)^{1.2} \quad (9)$$

۲-۳- مدل رشد عرضی غیردائم بر حسب زمان

در ادامه، گسترش عرضی بر حسب زمان حرکت دماغه پیشانی بررسی شده است. بر این اساس نمودارهای عرض بدون بعد (b / l_o) بر حسب زمان بدون بعد (t / t_o) در شکل (۵) رسم شده است. در این

هیدرولیکی در آن رخ می‌دهد، جریان چگال در جهت طولی از مافق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود که در این ناحیه تعادل بین نیروها شناوری و لزجی برقرار است (ناحیه R_2) و در انتهای، تعادل بین نیروهای گرانش و لزجی برقرار می‌شود (ناحیه R_3). چنانچه نمودار اجرهای مختلف نشان می‌دهد، به دلیل رسم منحنی‌ها در صفحه Log-Log ناحیه حد واسطه بین دو ناحیه R_1 و R_2 که در آن تعادل بین نیروهای شناوری-لزجی برقرار است، قابل رویت نیست. مشاهده کلیه نتایج آزمایشات حاضر در شکل ۴ نشان می‌دهد که به وضوح دو ناحیه در رشد عرضی جریان چگال وجود دارد. در ابتدای ورود جریان که اصطکاک ناچیز است تعادل بین نیروهای اینرسی و لزجی برقرار است و سپس در طول کوتاهی که دقت آن در پراکندگی داده‌ها آشکار نمی‌شود، جریان چگال در جهت عرضی از مافق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود. در انتهای، تعادل بین نیروهای گرانش و لزجی برقرار می‌شود. با توجه به شیب خطوط گذرانده شده، در ناحیه R_1 رشد عرض b نسبت به ناحیه R_2 کمتر است، زیرا نیروی رانش بزرگ‌تر (نیروی اینرسی و نیروی مولفه وزن ظاهری در جهت جریان) و نیروی مقاوم (نیروی پسا) ناچیز است و در نتیجه جریان شتاب گرفته و فرصت کمتری برای پخش شدن دارد. در شکل ۴، در نقطه $6 \approx l_o / x$ عرض بدون بعد $b / l_o \approx 2$ می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که لاقل در محدوده تغییرات دبی، غلظت و شیب در آزمایشات حاضر این نقطه تقریباً مستقل از تغییرات نام برده می‌باشد. بر اساس نتایج اجرهای مختلف در محدوده آزمایش برای هر اجرا و در کل برای تمام اجرهای عرض بدون بعد متناسب است با عبارت ذیل:

$$b / l_o \propto (x / l_o)^n \quad (5)$$

بنابراین:

$$b \propto x^n \quad (6)$$

میزان رشد عرض b در این در دو ناحیه متفاوت است و این امر حاکی از آن است که مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند در این دو ناحیه، متفاوت است. در ناحیه R_1 رشد عرض b با زمان، نسبت به ناحیه R_2 کمتر است موارد ذکر شده اخیر و همچنین نوع نیروهایی که در هر رژیم در تعادل هستند، بالطبع قابل پیش‌بینی است زیرا در نمودارهای شکل ۵، از زمان متناظر مکان نقاط برداشت شده، استفاده شده است. لذا از توضیحات اضافی صرفنظر و به بند قبل ارجاع داده می‌شود. در کلیه نمودارها، در زمان بدون بعد $t / t_o \approx 10$ ، عرض بدون بعد تقریباً $b / l_o \approx 2$ می‌باشد و می‌توان گفت که در محدوده تغییرات دبی، غلظت و شیب آزمایشات این نقطه تقریباً مستقل از تغییرات نام برده می‌باشد.

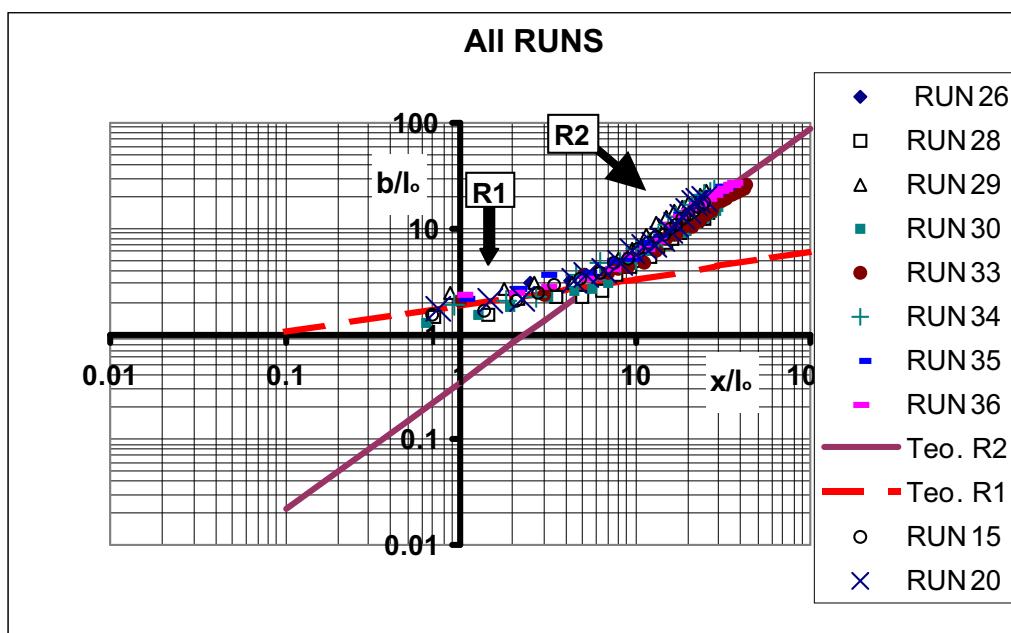
با توجه به موازی بودن شیب نتایج اجراهای مختلف با تقریب نسبتاً خوب، می‌توان گفت که عرض در ناحیه R_2 متناسب است با $t^{0.65}$ ولی در ناحیه R_1 ، با توجه به پراکندگی بیشتر نتایج، عرض تقریباً با $t^{0.27}$ متناسب است.

نمودارها، b ، عرض جریان و x ، زمان متناظر با b و x می‌باشند که نسبت به عبارت $U_o^{1/5} = (Q_o^3/B_o)^{1/5}$ ، که مقیاس زمانی شناوری اولیه نام نهاده شده بدون بعد می‌شوند. U_o ، سرعت ورودی جریان چگال به داخل کanal می‌باشد.

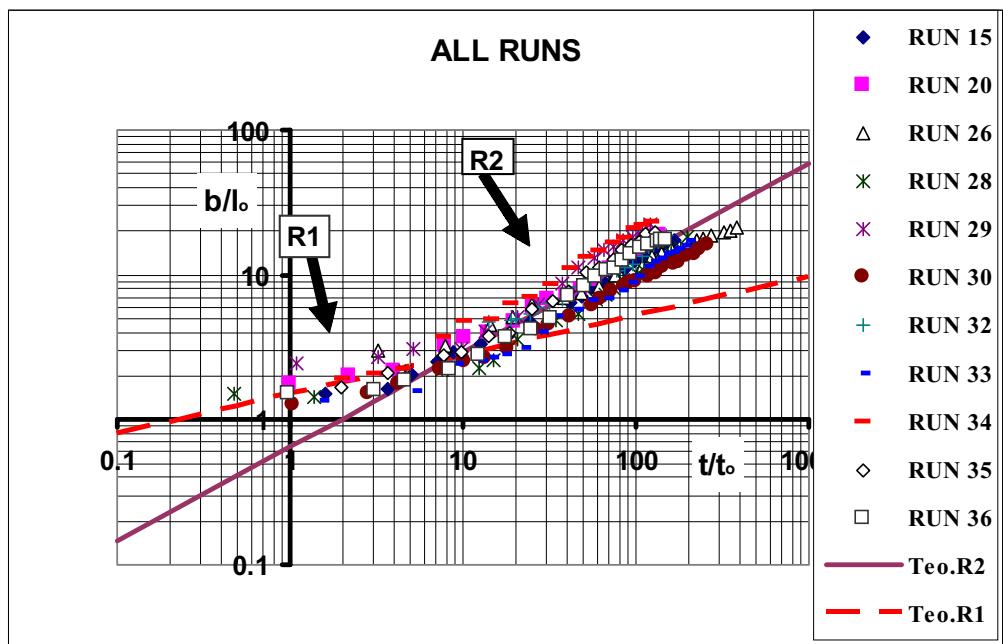
در شکل ۵، نتایج اجراهای در شیب‌ها، غلظت‌ها و دبی‌های مختلف در محدوده آزمایش نمایش داده شده است. بطوريکه پراکندگی نتایج نشان می‌دهد، مجدداً در هریک از نمودارها، دو ناحیه R_1 و R_2 قابل تشخیص است. از هر یک از نواحی مذکور خطی در صفحه Log-Log به صورت کلی ذیل می‌توان برآش نمود.

$$b / l_o = B (t / t_o)^m \quad (10)$$

در رابطه فوق، m شیب خط گذرانده شده در صفحه Log-Log و B ضریب تناسب می‌باشد چنانچه مشاهده می‌شود در نقطه $x / l_o \approx 10$ تغییری در شیب داده‌ها اتفاق می‌افتد و لذا دو ناحیه R_1 ($t / t_o < 10$) و R_2 ($t / t_o > 10$) را می‌توان تقریباً در همینجا از هم مجزا دانست.



شکل ۴- نتایج تمام اجراهای در شیب و غلظت مختلف



شکل ۵- نتایج تمام اجراهادر شیب و غلظت مختلف

در محدوده آزمایشات حاضر و در کلیه نمودارها برای پخش طولی غیردائم، تقریباً در دو بازه $t/t_0 < 10$ و $t/t_0 < 500$ تغییری در شیب داده‌ها اتفاق می‌افتد و لذا می‌توان سه ناحیه R_1 ، R_2 و R_3 تقریباً در خارج از این دو بازه را از هم مجزا دانست. در شکل ۶ سه ناحیه بطور آشکار نمایش داده شده است. بر طبق آنچه که نتایج نشان می‌دهد، در کلیه نمودارها، با توجه به شیب نتایج، میزان پخش طولی، X ، برای سه ناحیه R_2 ، R_3 و R_1 مختلف است و این امر حاکی از آن است که در این سه ناحیه، مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند متفاوتند. مشاهده شیب نقاط برداشت شده در کلیه نمودارها نشان می‌دهد که در ناحیه R_1 آهنگ رشد طولی نسبت به دو ناحیه دیگر بیشتر است، زیرا نیروی رانش بزرگتر (نیروی اینرسی و نیروی مولفه وزن ظاهری در جهت جریان) و نیروی مقاوم ناچیز است و در نتیجه جریان شتاب گرفته و فرصت کمتری برای پخش شدن عرضی دارد و نیز ناحیه R_2 ، کمترین آهنگ رشد طولی را به علت پرش هیدرولیکی و آشفتگی دارا است.

۳-۳- رشد طولی غیردایم بر حسب زمان

در تحقیق حاضر، در محدوده آزمایش و بر اساس دسته بندی تعادل نیروهای حاکم بر جریان چگال، رشد طولی جریان گل آلود در حالت مافوق بحرانی و مغشوش در ورود به زیر آب ساکن، بصورت بدون بعد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و در نهایت به مدلی تئوری برای پخش طولی در داخل کانال منجر می‌شود. نتایج بدست آمده از آزمایشات به صورت نمودارهای طول بدون بعد (L/x) بر حسب زمان بدون بعد (t/t_0)، ارائه می‌شوند. در این نمودارها، موقعیت نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی، X ، و زمان متناظر با X ، به ترتیب نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه $Q_o = (Q_o^3/B_o)^{1/5}$ و مقیاس زمانی شناوری اولیه $t_o = \frac{1}{U_o} (Q_o^3/B_o)^{1/5}$ بدون بعد شده‌اند. Q_o و B_o به ترتیب دبی و فلاکس شناوری اولیه می‌باشند. بطوریکه پراکندگی نتایج نشان می‌دهد، در هر یک از نمودارها و نیز برای هر اجرا، سه ناحیه R_1 ، R_2 و R_3 قابل تشخیص است. از هر یک از نواحی مذکور خطی در صفحه Log-Log به شکل کلی می‌توان برآش نمود.

- ۵- منحنی عرض بدون بعد نسبت به زمان بدون بعد نشان می‌دهد که می‌توان گسترش عرضی را برحسب زمان بدون بعد مدل کرد.
- ۶- در رشد طولی با توجه پراکندگی نتایج وجود سه ناحیه R_1 ، R_2 و R_3 قابل تشخیص است و در این نواحی مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند متفاوتند.
- ۷- ناحیه R_1 بیشترین و ناحیه R_2 ، کمترین آهنگ نرخ رشد (پخش) طولی را دارا هستند.
- ۸- نرخ رشد طولی در نواحی R_2 و R_3 به ترتیب متناسب با $t^{0.55}$ و $t^{0.7}$ می‌باشد و در ناحیه R_1 تقریباً متناسب با $t^{0.89}$ است.

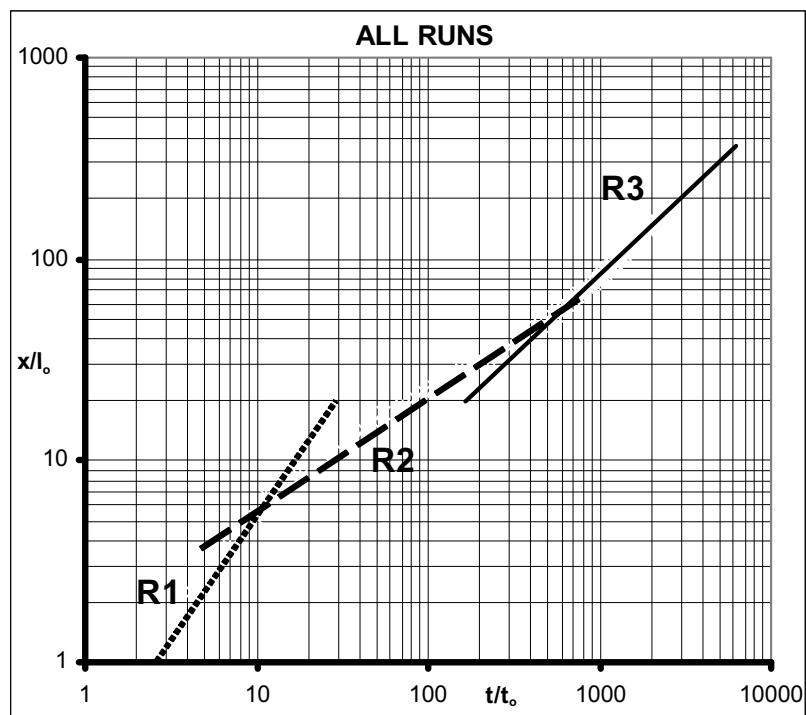
علائم

- $$B_o = g' u_{in} A$$
- $$C_{in} = \text{غلهای وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ورودی}$$
- $$U_0 = \text{سرعت جریان چگال در ورودی}$$
- $$g = \text{شتاب گرانش}$$
- $$U = \text{سرعت جریان چگال در جهت محور X}$$
- $$g'_{in} = \text{شتاب گرانش کاهش یافته در ورودی}$$
- $$h_{in} = \text{ارتفاع جریان در ورودی (ارتفاع دریچه ورودی)}$$
- $$V = \text{لزجت سینماتیکی}$$
- $$S = \text{شیب برحسب درصد}$$
- $$\theta = \text{زاویه شیب کف}$$
- $$\rho_{in} = \text{چگالی جریان چگال در ورودی}$$
- $$T = \text{درجه حرارت}$$
- $$\rho_w = \text{جرم ویژه آب}$$
- $$Q_0 = \text{دبی حجمی ورودی}$$
- $$A = \text{سطح مقطع جریان در ورود}$$

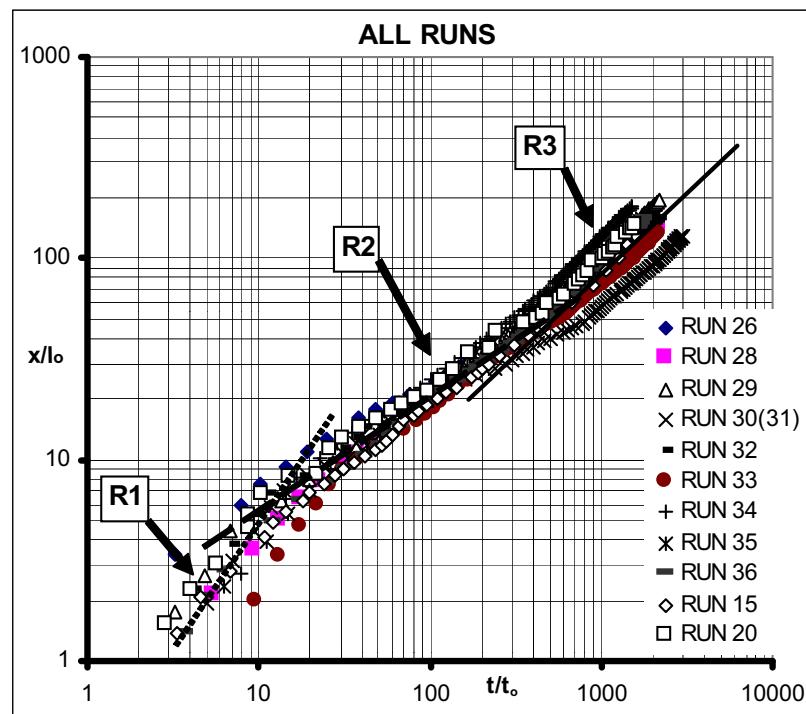
در کلیه نمودارهای شکل ۷، با توجه به خطوط برازش شده، نرخ رشد طولی در نواحی R_2 و R_3 به ترتیب متناسب با $t^{0.55}$ و $t^{0.7}$ می‌باشد. با توجه به موازی بودن شبی نتایج اجراهای مختلف با تقریب نسبتاً خوب، برای هر اجرا نیز این تناسب برقرار است. همچنین شبی نتایج برداشت شده در ناحیه R_2 و R_3 با تغییرات غلظت، دبی و شبی ثابت است. ولی براساس آجنه گفته شد، در ناحیه R_1 شبی نتایج برداشت شده، برای هر اجرا، ثابت نیست. در شکل ۶ نتایج اجراهای مختلف در غلظتها، دبی‌ها و شبی‌های متفاوت، ترسیم شده است. در ناحیه R_3 انسجام نتایج از نظر شبی نتایج برداشت شده، بیشتر است و با دقت بالایی می‌توان شبی اجراهای مختلف را یکسان در نظر گرفت لازم به ذکر است که در ناحیه R_1 جریان چگال هنوز به دیواره برخورد نکرده است و پخش در این ناحیه از نوع پخش آزاد به شمار می‌آید و شاید، ثابت نبودن شبی نتایج به دلیل همین امر باشد.

۴- نتیجه گیری

- در محدوده آزمایشات حاضر، موارد ذیل نتیجه گرفته می‌شود:
- در نمودارهای عرض بدون بعد بر حسب زمان در $x/l_0 \approx 6$ تغییر رژیم جریان اتفاق می‌افتد و در هر کدام از نواحی (R_1 و R_2) می‌توان خطی بر داده‌ها در صفحه Log-Log برازش نمود.
 - تفاوت شبی خط برازش شده که حاکی از میزان رشد عرضی جریان دارد، نشان می‌دهد که در ناحیه R_1 عرضی جریان آهسته‌تر رشد کرده و متناسب با $x^{0.25}$ در ناحیه R_2 سریعتر رشد کرده و با $x^{1.2}$ متناسب است.
 - در محدوده آزمایشات حاضر اثر شبی کف و غلظت ورودی بر گسترش عرضی جریان نسبت به طول عمدها در ناحیه R_1 است و می‌توان از آن چشم پوشی کرد.
 - رسم منحنی عرض بدون بعد نسبت به زمان بدون بعد و همچنین نسبت به طول بدون بعد متناظر نشان می‌دهد که تغییر رژیم در $b/l_0 \approx 2$ اتفاق می‌افتد. این امر حاکی از تعریف صحیح زمان بدون بعد متناظر با طول بدون بعد است.



شکل ۶- سه ناحیه R_1 ، R_2 و R_3



شکل ۷- نتایج تمام اجراهای در شیب ۱٪، ۲٪ و ۳٪

مراجع

- 10-Horsch,G. M., (2004), "The structure of two-dimensional, miscible laminar density urrents flowing down an incline", Journal of Hydraulic Research, V. 42, N. 2.
- 11-Imran, J., Kassem, A., Khan, S.M., (2004), "Three-dimensional modeling of density current. I. Flow in straight confined and unconfined channels", Journal of Hydraulic Research, V. 42, N. 6.
- 12-Tsihrintzis, V. A., Alavian, V., (1996), "Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes ", Journal of Hydraulic Research, V. 34, N. 5.
- 13-Felix, M., (2001), "A Two-Dimensional Numerical Model for a Turbidity Current", Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, V. 31, P. 71-81.
- 14-Buckee, C., Kneller, B., Peakall, J., (2001), "Turbulence Structure in Steady Solute-Driven Gravity Currents", Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, V. 31, P. 173-178.
- 1-Turner, J. S., (1973), "Buoyancy effects in fluids", Cambridge University Press London, U.K.
- 2-Firoozabadi, B., Farhanieh, B., Rad, M., (2003)," Hydraulics of 2-D laminar turbidity current, Journal of Hydraulic Research, V. 41, N. 6.
- 3-Garcia, M. H., (1994), "Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment", J. of Hydraulic Eng. ASCE, V. 120, N.11.
- 4-Firoozabadi, B., (2004), "Propagation of three dimensional density currents" BSME-ASME Conferences in Mechanical Eng., Bangladesh University of Technology, Bangladesh, 1-4 January.
- 5-Clarke, J. E. H., et al, (1990), "Large-scale current Induced and deposition in the path of the 1929 Grand-Banks turbidity current", Sedimentology, V. 37 P.P. 613-629.
- 6-Alavian, V., Jirka, G. Denton, R. Johnson, M. and Stefan H. , (1992), "Density currents entering lakes and reservoirs", J of Hydraulic Eng., V. 118, N.11, P.P. 1464-1489.
- 7-Fan, J.; Morris, G., (1992), "Reservoir Sedimentation .II: Reservoir Desiltation and Long Term Storage Capacity", J. of Hydraulic Eng. ASCE, V. 118, N.11.
- 8-Salaheldin, T. M., Imran, J., Chaudhry, M.H., Reed, C., (2000), "Role of fine grained sediment in turbidity current flow dynamics and resulting deposits", Marine Geology V. 171.
- 9-Alavian, V., (1986), "Behavior of density current an incline", J. of Hydraulic Engineering, V.122, N.1, January.