

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

بهار فیروزآبادی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا موسوی حکمتی<sup>۲</sup>، منوچهر راد<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- مربی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری 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، مغشوش 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  $l_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$  بدون بعد شده اند و نیز زمان متناظر با،  $b$ ، و،  $x$  نسبت به عبارت  $t_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5} / U_o$  که مقیاس زمانی شناوری اولیه نام نهاده شده بدون بعد می شود. نتایج نشان می دهد، در منحنی های عرض بدون بعد بر حسب زمان 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  $X^{0.25}$  و  $X^{1.2}$  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  $R_2$  ( $b / l_o > 2$ ) 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  $t^{0.89}$

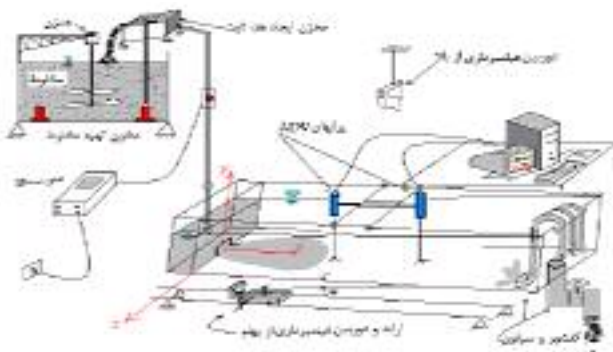
**Keywords:** Turbidity current, Lateral and longitudinal growth, Three-dimensional unsteady underflows

## ۱- مقدمه

یکی از پدیده های دریایی که در شکل دهی کف دریاها و اقیانوسها و انتقال رسوبات از رودخانه به دریا نقش بسزایی دارد جریان چگال (Density Current) یا جریان ثقلی (Gravity Current) می باشد. زمانی که جریان گل آلود رودخانه ها وارد دریا یا مخزن سد می شود به علت سنگین تر بودن از آب دریا یا مخزن به داخل آن فرو رفته و در روی کف و در جهت شیب جریان می یابد. به این پدیده که در اثر اختلاف چگالی بین لایه های مختلف سیال بوجود می آید، جریان چگال گفته می شود. جریان چگال حاوی ذرات جامد معلق اصطلاحاً جریان گل آلود (Turbidity Current) نامیده می شود. اختلاف چگالی که محرک اصلی رانش این جریان است، می تواند ناشی از اختلاف درجه حرارت، وجود مواد محلول و وجود ذرات معلق باشد [۱]. گردیدن چگالی به دلیل دارا بودن مولفه های در جهت جریان نیروی رانش را بوجود آورده و سیال چگال تر را در زیر سیال با چگالی کمتر به حرکت در می آورد. این جریان در زمینه های مختلفی از علوم با تعاریف متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است، که می توان از ژئوفیزیک، هیدرولیک و هواشناسی نام برد. لایه مرزی، انتقال جرم و حرارت، اقیانوس شناسی، مکانیزم حرکت بهمن، زدودن آلودگی های نفتی و جوی، حشره شناسی و کنترل آفات و تکنولوژی گازهای متراکم از مواردی است که جریان چگال در آنها بررسی می شود [۲،۳]. در اقیانوسها، جریان چگال در اثر اختلاف شوری و درجه حرارت ایجاد می شود و یا به صورت جریان های گل آلود دیده می شود [۴] که گاهی سرعت آنها به مقادیر قابل ملاحظه ای می رسد. خطوط حاوی کف در سطح اقیانوسها ممکن است نشان دهنده

زبانه یک جریان چگال باشد که متناوباً توسط جزر و مد ایجاد می شود. 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 می باشد. 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 می تواند کمک بزرگی در درک فرآیندهای تشکیل آبراهه های زیردریا (Canyon Fan) باشد. در زمین لرزه ای که در سال ۱۹۲۹ میلادی در شمال نیوفوندلند (New Found land) به شدت ۷ ریشتر رخ داد و به عنوان زمین لرزه Grand-Banks مشهور شده، جلگه ای ژرف از جریان گل آلود 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 کابل های کف دریا را پاره کرده است. برای این جریان سرعتی حدود ۳۵۰ مایل دریایی بیان شده است [۵،۶]. فن و موریس [۷] ذکر می کنند که جریان گل آلود می تواند 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 درشت تر را افزایش می دهند، علویان [۹] آزمایشاتی بر روی جریان چگال آب - نمک سه بعدی، تحت شیب های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه انجام داد. وی نشان داد، پخش عرضی جریان

اگرچه تحقیقات چندی درباره جریانهای گل آلود 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 حالتهای مغشوش ناشناخته مانده است [۱۴]. هدف تحقیق حاضر بررسی تجربی رفتار جریان چگال مغشوش، سه بعدی و حاوی ذرات بوده است. این بررسی منجر به تهیه مدلی شده است که می تواند رشد عرضی و طولی جریان را از نظر زمانی و مکانی پیش بینی نماید.



شکل ۱- طرح شماتیک دستگاه آزمایش

## ۲- دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایشها

دستگاه آزمایش یک کانال شیب پذیر به ابعاد ۱۲ متر طول، ۱/۵ متر عرض کل (عرض استفاده شده در این آزمایشات ۱/۲۶ متر می باشد) و ۰/۶ متر ارتفاع می باشد. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱ دیده می شود. یک مخزن تغذیه (مخزن تهیه مخلوط) به شکل استوانه از فولاد ضد زنگ و به حجم ۲ متر مکعب در بالا دست قرار می گیرد که حاوی مخلوط ذرات و آب است. جهت ایجاد مخلوط حاوی ذرات از کائولن (Kaolin) با چگالی مخصوص ۲۶۵۰ کیلو گرم بر مترمکعب و اندازه متوسط ذرات (D<sub>50</sub>) حدود ۲۰ میکرون استفاده شده است. این مخلوط ذرات رس را به خوبی پوشش می دهد. در این آزمایشات از سه غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ۰/۱٪، ۰/۵٪ و ۱٪ استفاده شد. بدین ترتیب که با اندازه گیری

چگالی، وابسته به شار شناوری اولیه و شیب کف می باشد بطوریکه در یک شیب ثابت با افزایش شار شناوری اولیه، نرخ پخش عرضی افزایش می یابد و در یک شار شناوری اولیه ثابت با افزایش شیب، نرخ پخش عرضی کاهش می یابد زیرا مولفه نیروی رانش در جهت شیب افزایش می یابد. هورچ [۱۰] در بررسی خود بر روی جریانهای چگالی ناشی از اختلاف شوری و حرارت، وجود دو رژیم را تشخیص می دهد. ۱- رژیم در حال گسترش، در این رژیم رشد جریان را می توان به وسیله شرایط اولیه اش تخمین زد. طبیعت این رژیم وابسته به پارامتر  $Re \tan^2 \theta / Ri_o$  است که در آن  $Re_o$  و  $Ri_o$  به ترتیب اعداد رینولدز و ریچاردسون اولیه و  $\theta$  زاویه شیب کف می باشند. ۲- رژیم کاملاً

گسترش یافته، که مستقل از شرایط اولیه جریان می باشد. در این رژیم، اگر عدد اشمیت جریان بزرگتر از یک باشد ( $Sc > I$ )، تعادل نیرویی بین نیروهای شناوری و لزج و اگر  $Sc < I$  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 کانال زیر آبی محدود و نامحدود در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار دادند که عبارتند از یک حالت کانال مستقیم محدود شده و سه حالت کانال مستقیم محدود نشده با شیبهای عرضی مختلف کانال. نتایج نشان می دهد که بزرگی جریان عرضی بطور قوی وابسته به شیب عرضی می باشد و نیز در حالت کانال مستقیم محدود شده، دیواره های جانبی بلند کانال باعث می شود که جریان چگال در داخل کانال نگه داشته شده و منجر به رشد عمودی جریان شود. تسیه رینتریس و علویان [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 ساده ای را برای پخش طولی و عرضی ارائه نمودند، بطوریکه عبارتهای تحلیلی بدست آمده بر حسب زمان  $t$ ، به شیب 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 می دهد.

جهت اندازه‌گیری رشد (پخش) طولی و عرضی جریان چگال و نیز مشاهده شکل پیشانی از دو دوربین فیلم‌برداری دیجیتال استفاده شده است. کانال اسکلت فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای دارد که قابل فیلم‌برداری از پهلو می‌باشد. در سمت پهلویی کانال 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 بدنه و پیشانی جریان با دقت سی تصویر در یک ثانیه فیلم‌برداری کرد. کف کانال جهت اندازه‌گیری پخش طولی و عرضی جریان، شبکه بندی شده است. یک دوربین دیگر در بالای کانال تعبیه شده تا از نحوه پخش عرضی جریان چگال فیلم‌برداری نماید. چگالی شاره حاوی ذرات قبل از ورود به دریچه با نمونه‌گیری از آن توسط هیدرومتر با دقت ۰/۵ گرم بر 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.

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

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

$g'_{in}$  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،  $\theta$  شیب کف و  $\nu$  لزجت سینماتیکی مخلوط در ورود است.  $g$  شتاب ثقل و  $\rho_{in}$  و  $\rho_w$  به ترتیب اختلاف چگالی شاره و آب صاف و چگالی آب صاف است. با توجه به اینکه غلظت‌های 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  $30 \times 50 \times 50$  cm تعبیه 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 سرریز می‌شود که این عمل همچنین باعث سیرکولاسیون و ممانعت از ته‌نشینی می‌گردد. یک پمپ کف‌کش 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 کانال می‌شود که از بقیه کانال توسط دیواره‌ای جدا شده است و آب صاف به این قسمت راه ندارد. زمانیکه سطح مخلوط چگال هم سطح آب صاف کانال اصلی شد، توسط یک دریچه زیر گذر (که به صورت کشویی باز می‌شود و به ابعاد ۱۰ سانتیمتر طول و ۱/۲۵ سانتیمتر ارتفاع) جریان چگال در زیر آب صاف وارد کانال اصلی می‌گردد و در انتهای کانال به صورت کفشور و سیفون تخلیه می‌شود. لذا عرض اولیه شاره چگال ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع اولیه آن ۱/۲۵ سانتیمتر می‌باشد. جریان چگال حاوی ذرات کائولن در زیر آب صاف به سمت پایین دست در عرض و طول کانال گسترش می‌یابد. شیب کانال توسط جک‌های هیدرولیکی حداکثر تا ۳/۵٪ تغییر می‌کند. آزمایشات در سه شیب ۱، ۲ و ۳ درصد انجام شده است.

جهت اندازه‌گیری دبی جریان از یک دبی‌سنج اولتراسونیک ساخت شرکت Greyline کانادا، مدل DFM با دقت ۰/۰۱ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. این دبی‌سنج جهت اندازه‌گیری دبی از پدیده داپلر استفاده می‌کند و صدور و انعکاس موج صوتی را کالیبره می‌نماید. آزمایشات در سه دبی ۱۰، ۱۵، ۲۰ 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:

$$C_{in} = \frac{w_k}{w_w} \times 100 \quad (3)$$

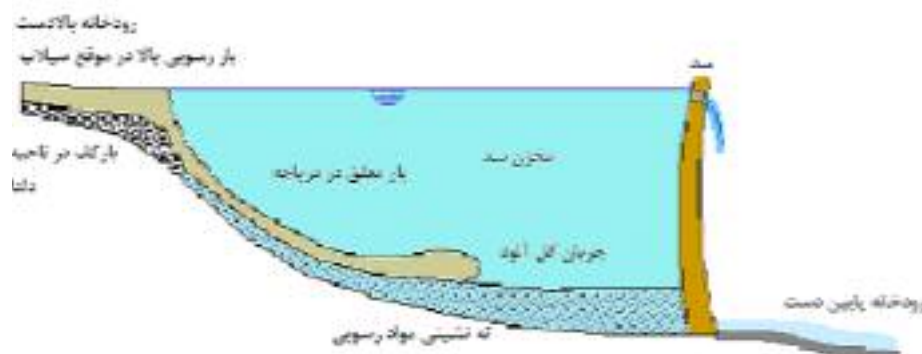
$w_k$  و  $w_w$  به ترتیب وزن آب و کائولن مخلوط شده هستند.  $S$  شیب کف کانال می باشد. شکل ۲ شماتیک جریان چگال گل آلود در یک مخزن و شکل ۳ شماتیک رشد عرضی و طولی آن را نمایش می دهد.

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

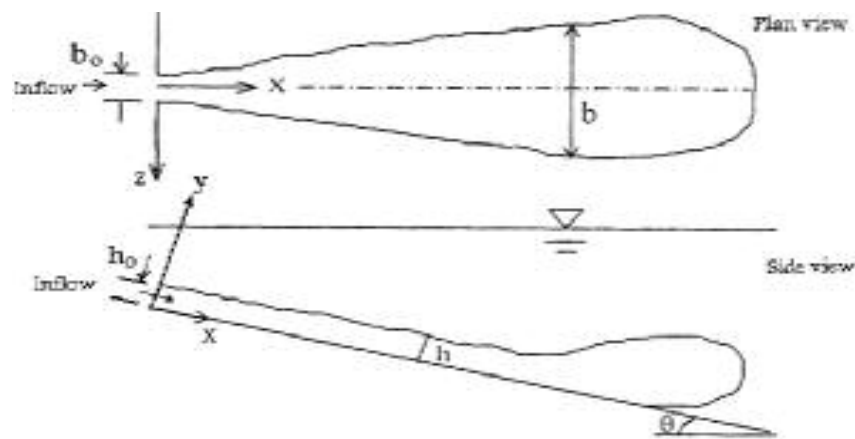
جدول ۱ نشان می دهد که محدوده عدد رینولدز ورودی در آزمایشات از ۳۶۰ تا ۳۰۲۰ را پوشش داده است. همچنین اعداد ریچاردسون ورودی توانسته است محدوده ای بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۶ را پوشش دهد. انتخاب این محدوده وسیع به این دلیل است که بتوان اثر عوامل مختلف را در جریان بررسی کرد. چنانکه در

جدول (۱) شرایط اولیه اجزای مختلف آزمایش

RUN	S	Re <sub>in</sub>	C <sub>in</sub>	Ri <sub>in</sub>	U <sub>in</sub> (m/s)	Qo[lit/min]	g' <sub>in</sub>	Bo[m4/s3]	lo	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 جریان چگالی



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

### ۳- مدل تئوری و نتایج حاصل از آزمایشات

#### ۳-۱- مدل رشد عرضی غیردایم بر حسب 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  $(b/l_o)$  بر حسب طول بدون بعد  $(x/l_o)$  استفاده شده است. در این نمودارها،  $b$ ، عرض جریان چگال و،  $x$ ، موقعیت نسبی نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی می‌باشند که نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه  $l_o = (Q_o^3/B_o)^{1/5}$  بدون بعد شده‌اند.  $Q_o$  دبی ورودی و  $B_o = g'uA$  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 همین جا از هم مجزا دانست. در کلیه اجراها، 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.

$$b/l_o = A(x/l_o)^n \quad (۴)$$

$n$ ، شیب خط گذرانده شده در صفحه Log-Log و  $A$  ضریب تناسب می‌باشد. تقسیم جریان از نقطه نظر تعادل نیروها به سه ناحیه، از پیشنهادات تسیهرینتزیس و علویان [۱۲] می‌باشد. آنها جریان چگال در حال پخش را که تحت شرایط شیب متوسط و مافوق 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 می‌گیرند. 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 مافوق 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 تبعیت می‌کند:

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

در رابطه (۷)،  $A'$  ضریب متناسب 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 خیزهایی 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 برازش 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.

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

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

### ۲-۲- مدل رشد عرضی غیر دایم 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 مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود که در این ناحیه تعادل بین نیروها شناوری و لزجی برقرار است (ناحیه  $R_2$ ) و در انتها، تعادل بین نیروهای گرانش و لزجی برقرار می‌شود (ناحیه  $R_3$ ). چنانچه نمودار اجزای مختلف نشان می‌دهد، به دلیل رسم منحنی‌ها در صفحه Log-Log ناحیه حد واسط 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 مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود. در انتها، 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  $6 \approx x/l_o$  عرض بدون بعد  $2 \approx b/l_o$  می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که لااقل در محدوده تغییرات دبی، غلظت و شیب در آزمایشات حاضر این نقطه تقریباً مستقل از تغییرات نام برده می‌باشد. بر اساس نتایج اجزای مختلف در محدوده آزمایش برای هر اجرا و در کل برای تمام اجراها عرض بدون بعد متناسب است با عبارت ذیل:

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

بنابراین:

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

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

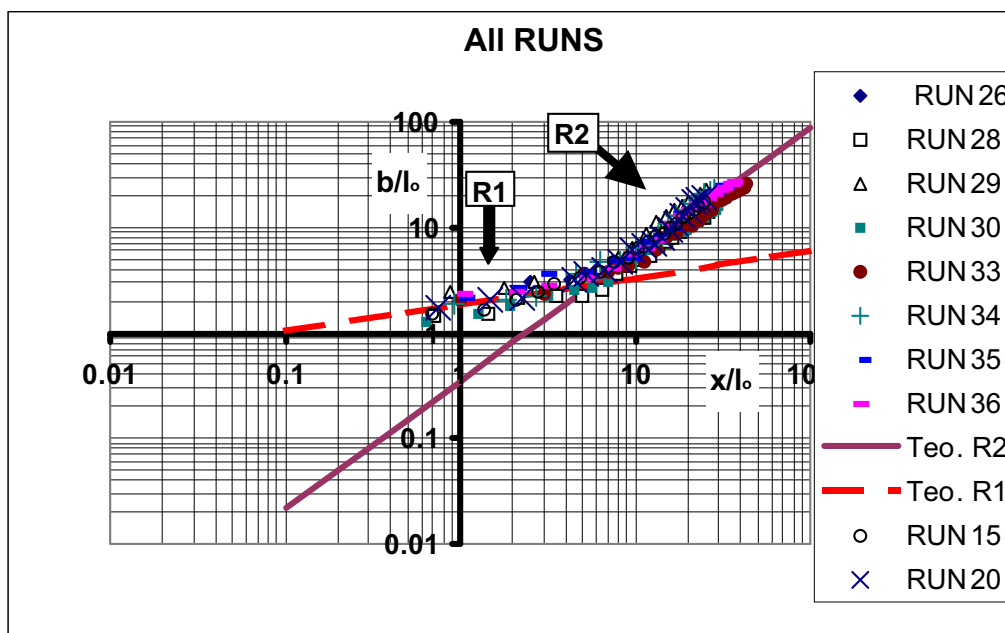
در شکل ۵، نتایج اجراها در شیب‌ها، غلظت‌ها و دبی‌های مختلف در محدوده آزمایش نمایش داده شده است. بطوریکه پراکندگی نتایج نشان می‌دهد، مجدداً در هر یک از نمودارها، دو ناحیه  $R_1$  و  $R_2$  قابل تشخیص است. از هر یک از نواحی مذکور خطی در صفحه Log-Log به صورت کلی ذیل می‌توان برآزش نمود.

برده می‌باشد.

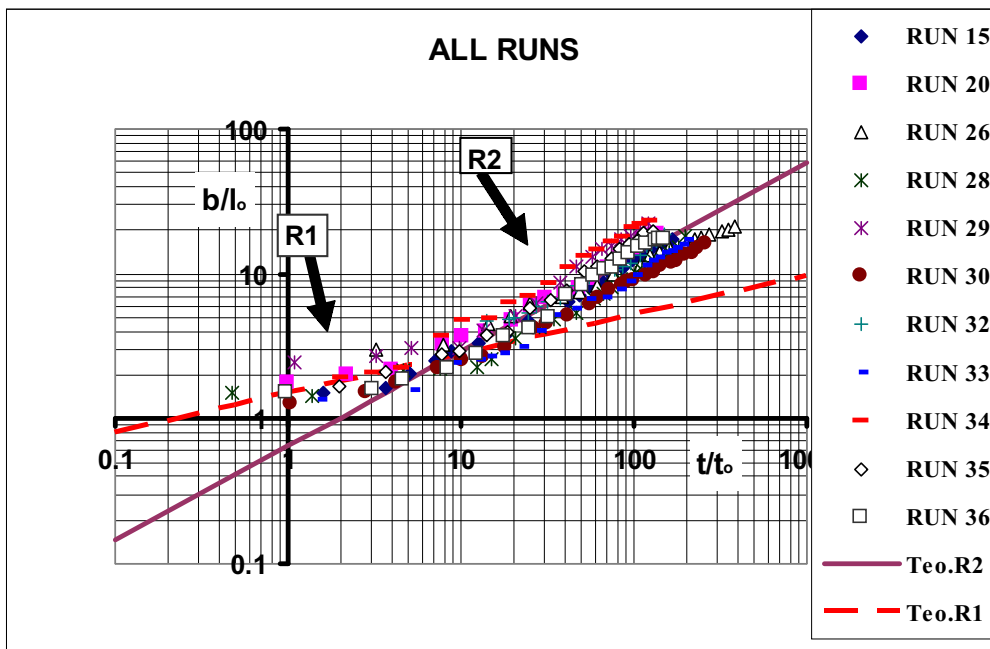
با توجه به موازی بودن شیب نتایج اجراهای مختلف با تقریب نسبتاً خوب، می‌توان گفت که عرض در ناحیه  $R_2$  متناسب است با  $t^{0.65}$  ولی در ناحیه  $R_1$ ، با توجه به پراکندگی بیشتر نتایج، عرض تقریباً با  $t^{0.27}$  متناسب است.

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

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 همین جا از هم مجزا دانست.



شکل ۴- نتایج تمام اجراها در شیب و غلظت مختلف



شکل ۵- نتایج تمام اجراها در شیب و غلظت مختلف

### 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 می شود. نتایج بدست آمده از آزمایشات به صورت نمودارهای طول بدون بعد  $(x/l_0)$  بر حسب زمان بدون بعد  $(t/t_0)$  ارائه می شوند. در این نمودارها، موقعیت نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی،  $x$  و  $t$  زمان متناظر با  $x$ ، به ترتیب نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه  $l_0 = (Q_0^3/B_0)^{1/5}$  و مقیاس زمانی شناوری اولیه  $t_0 = \frac{1}{U_0} (Q_0^3/B_0)^{1/5}$  بدون بعد شده اند.

$Q_0$  و  $B_0$  به ترتیب دبی ورودی و فلاکس شناوری اولیه می باشند. بطوریکه پراکندگی نتایج نشان می دهد، 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 می توان برآزش نمود.

در محدوده آزمایشات حاضر و در کلیه نمودارها برای پخش طولی غیردایم، تقریباً در دو بازه  $10 < t/t_0 < 20$  و  $500 < t/t_0 < 1000$  تغییر در شیب داده ها اتفاق می افتد و لذا می توان 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 می دهد، در کلیه نمودارها، با توجه به شیب نتایج، میزان پخش طولی،  $x$ ، برای سه ناحیه  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  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 می دهد 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 پخش هیدرولیکی و آشفتگی دارا است.

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

$$B_o = g'u_{in}A \quad (\text{ورودی})$$

$$C_m = \text{غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ورودی}$$

$$U_o = u_{in} = \text{سرعت جریان چگال در ورودی}$$

$$g = \text{شتاب گرانش}$$

$$U = \text{سرعت جریان چگال در جهت محور } x$$

$$g'_{in} = \text{شتاب گرانش کاهش یافته در ورودی}$$

$$g'_{in} = g(\rho_{in} - \rho_w) / \rho_m$$

$$h_{in} = \text{ارتفاع جریان در ورودی (ارتفاع دریچه ورودی)}$$

$$V = \text{لزجت سینماتیکی}$$

$$S = \text{شیب برحسب درصد}$$

$$\theta = \text{زاویه شیب کف}$$

$$\rho_m = \text{چگالی جریان چگال در ورودی}$$

$$T = \text{درجه حرارت}$$

$$\rho_w = \text{جرم ویژه آب}$$

$$Q_o = \text{دبی حجمی ورودی}$$

$$A = \text{سطح مقطع جریان در ورودی}$$

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 شیب نتایج اجراهای مختلف با تقریب نسبتاً خوب، برای هر اجرا نیز این تناسب برقرار است. همچنین شیب نتایج برداشت شده در ناحیه  $R_2$  و  $R_3$  با تغییرات غلظت، دبی و شیب ثابت است. ولی براساس آنچه گفته شد، در ناحیه  $R_1$  شیب نتایج برداشت شده، برای هر اجرا، ثابت نیست. در شکل ۶ نتایج اجراهای مختلف در غلظت‌ها، دبی‌ها و شیب‌های متفاوت، ترسیم شده است. در ناحیه  $R_3$  انسجام نتایج از نظر شیب نتایج برداشت شده، بیشتر است و با دقت بالایی می‌توان شیب 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 شیب نتایج به دلیل همین امر باشد.

### ۴- نتیجه گیری

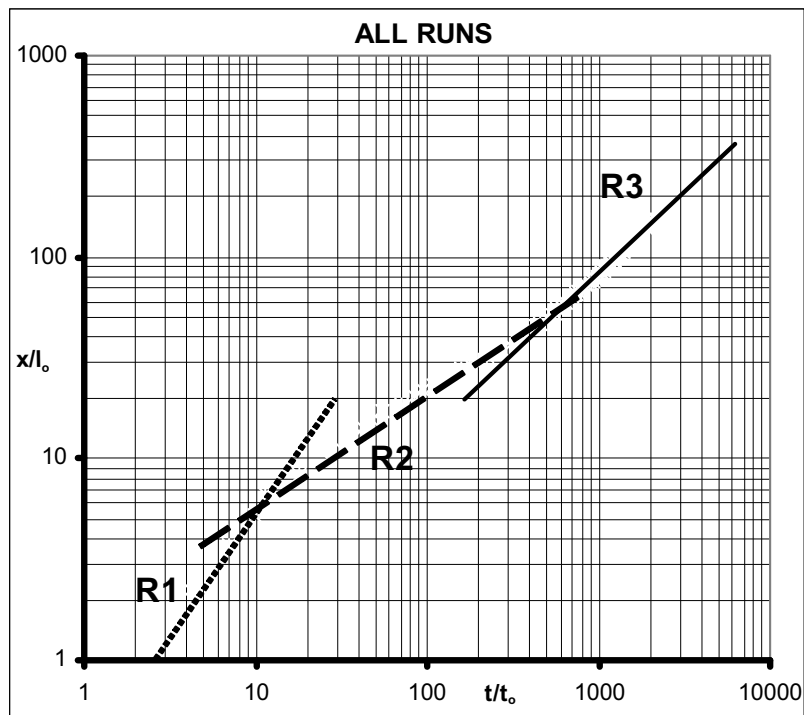
در محدوده آزمایشات حاضر، موارد ذیل نتیجه گرفته می‌شود:

۱- در نمودارهای عرض بدون بعد بر حسب زمان در  $x/l_o \approx 6$  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.

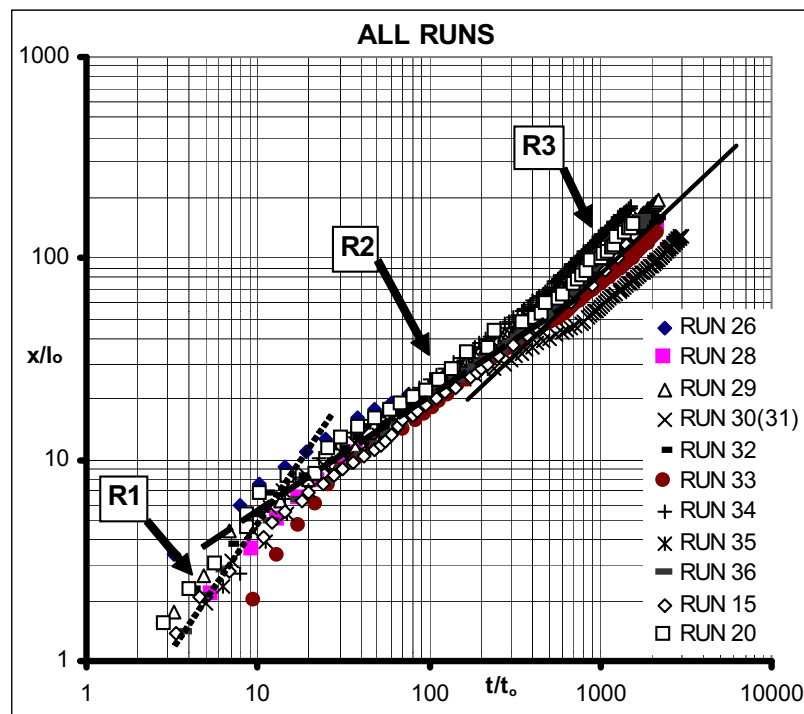
۲- تفاوت شیب خط برازش شده که حاکی از میزان رشد عرضی جریان دارد، نشان می‌دهد که در ناحیه  $R_1$  عرضی جریان آهسته‌تر رشد کرده و متناسب با  $x^{0.25}$  و در ناحیه  $R_2$  سریعتر رشد کرده و با  $x^{1.2}$  متناسب است.

۳- در محدوده آزمایشات حاضر اثر شیب کف و غلظت ورودی بر گسترش عرضی جریان نسبت به طول عمدتاً در ناحیه  $R_1$  است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۴- رسم منحنی عرض بدون بعد نسبت به زمان بدون بعد و همچنین نسبت به طول بدون بعد متناظر نشان می‌دهد که تغییر رژیم در  $b/l_o \approx 2$  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 اجراها در شیب ۱٪، ۲٪ و ۳٪

## ۵- مراجع

- 10-Horsch, G. M., (2004), "The structure of two-dimensional, miscible laminar density currents 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), "Hydraulodynamics 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.