

مدلسازی تنوری گسترش عرضی جریان چگالی سه بعدی حاوی ذرات در حالت‌های غیر دایم

سید محمدرضا موسوی حکمتی

مریی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر ری (عهده دار مکاتبات)

منوچهر راد

استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

بهار فیروزآبادی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ پذیرش: ۸۵/۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۸۴/۹/۱۰

چکیده

یکی از پدیده‌هایی که در پخش و گسترش آلودگی‌های به صورت محلول یا ذرات معلق نقش مهمی را ایفا می‌کند، جریان چگالی یا ثقلی می‌باشد، لذا شناخت رفتار آن در پیش بینی و کنترل پخش آلودگی‌ها اهمیت بسزایی دارد. در این تحقیق، با توجه به آزمایشات تجربی انجام شده، گسترش عرضی جریان چگالی حاوی ذرات (turbidity current) در حالت سه بعدی، مغشوش و غیر دایم در قالب ارائه قوانین مربوطه بصورت یک شکل کلی بدون بعد مورد تحلیل قرار گرفته و در نهایت مدلی تئوری ارائه می‌شود. عرض جریان، b ، و موقعیت نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی، X ، نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه، بدون بعد شده اند و نیز زمان متناظر با، b ، و X ، نسبت به مقیاس زمانی شناوری اولیه، بدون بعد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، در منحنی‌های عرض بدون بعد بر حسب طول بدون بعد و همچنین در منحنی‌های عرض بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد دو ناحیه R_1 و R_2 قابل تشخیص است و 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 می‌باشد، بطوریکه عرض جریان در ناحیه R_1 و R_2 به ترتیب، متناسب با $X^{0.25}$ و $X^{0.75}$ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جریان چگالی- جریان حاوی ذرات- گسترش عرضی غیر دایم- مدلسازی تنوری

مقدمه

تر را در زیر سیال با چگالی کمتر به حرکت در می‌آورد (۲). برای مثال، حرکت جبهه هوای سرد در زیر هوای گرمتر، حرکت گرد و غبار، پیشروی آب شور دریا در زیر آب شیرین در مصب رودخانه‌ها، دور ریزی فاضلاب سنگین در رودخانه‌ها و در دریاچه‌ها، پخش دود و ابرهای خارج شده از دودکش‌های مجتمع‌های صنعتی، حرکت جریان گل‌آلوده رودخانه در مخازن سدها، جریان مورد مبادله در تنگه‌ها در اثر اختلاف چگالی، انباشتگی و حرکت گاز متان در معادن زغال سنگ و غیره را می‌توان بعنوان مصادیقی از پدیده جریان چگالی نام برد (۳). ته نشست ذرات ریز از مواد رسوبی باعث ایجاد مشکلاتی به ویژه در آبهای کم عمق می‌شود. به علاوه، آلوده‌کننده‌هایی چون فلزات سنگین به دلیل وزن مخصوص بالا و خواص شیمیایی آنها در مواد

زمانی که فاضلاب سنگین مجتمع‌های صنعتی در رودخانه‌ها و در دریاچه‌ها می‌شود و یا هنگامیکه جریان گل‌آلود رودخانه وارد مخزن پشت سد می‌شود به علت سنگین تر بودن از آب محیط اطراف خود 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 چگالی گفته می‌شود. جریان چگالی حاوی ذرات جامد معلق اصطلاحاً جریان حاوی ذرات (turbidity current) نامیده می‌شود. اختلاف چگالی که محرك اصلی رانش این جریان است، می‌تواند ناشی از اختلاف دما، وجود مواد محلول و وجود ذرات معلق باشد (۱). گرادیان چگالی عمودی نیروی رانش را بوجود آورده و سیال چگال

می توان به وسیله شرایط اولیه اش تخمین زد. طبیعت این رژیم، وابسته به پارامتر $Re_0 \tan^2 \theta / Ri_0$ که در آن و به ترتیب اعداد رینولدز و ریچاردسون اولیه (ورودی) و زاویه شیب 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 ($Sc > 1$)، بالانس نیرویی بین نیروهای شناوری و لزج و اگر $Sc < 1$ باشد، بالانس نیرویی بین نیروهای شناوری و اینرسی بر قرار است. عمران و همکاران (۱۲) گسترش عرضی جریان چگالی 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 شیب های عرضی مختلف جلگه سیل گیر کانال (floodplain). نتایج نشان می دهد که بزرگی جریان عرضی بطور قوی وابسته به شیب عرضی جلگه سیل گیر می باشد و نیز در حالت کانال مستقیم محدود شده، دیواره های جانبی بلند کانال باعث می شود که جریان چگال در داخل کانال ننگه داشته شده و منجر به رشد عمودی جریان شود. قاسم و عمران (۱۳) دریافتند که ساختار جریان چگالی اولیه مانند جریان در کانال باز، بطور ناچیز تحت تاثیر انحنای قرار می گیرد. تسپهرینتزیس و علویان (۳) رفتار سینماتیکی و هندسی جریان چگالی در حال پخش را با شناوری منفی در حالت های دو بعدی و سه بعدی در سه شیب افقی، متوسط و تند در جهات طولی و عرضی بطور غیر دایم مورد تحقیق قرار دادند. آنها بر اساس بالانس بین نیروهای مقاوم و رانش که عبارتند از گرانش، شناوری، اینرسی و اصطکاک در هر دو جهت طولی و عرضی حل های تحلیلی ساده ای را برای پخش طولی و عرضی ارائه نمودند، به طوری که این عبارت های تحلیلی بدست آمده بر حسب زمان t ، به شیب کف، شار شناوری ورودی (اولیه)، عدد ریچاردسون ورودی (اولیه) و هندسه جریان چگالی در ورودی، بستگی دارند. حل تحلیلی حاصل، سازگاری خوبی را با نتایج تجربی نشان می دهد.

از طرفی با توجه به اینکه فرآیند غالب در مساله رسوب گذاری در مخازن سدها، جریانهای چگالی حاوی ذرات

رسوبی تجمع می نمایند. لایروبی رسوب، معمولاً گران بوده و از طرف دیگر حتی در صورت انجام، تخلیه مواد لایروبی شده به دلیل ایجاد آلودگی خود مسئله ساز است. رسوب ذرات، همچنین، می تواند بر اکولوژی و مسائل زیست محیطی اثر گذارده و زندگی آبزیان را به مخاطره اندازد. به این دلایل در سالهای اخیر، بررسی و تحقیق درباره مکانیزم های انتقال ذرات و یا جریان های حاوی ذرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۴). شاید مهمترین ظهور و کاربرد جریان گل آلود در مخازن سدها باشد که خود یکی از روش های مهم رسوب زدایی در مخازن به شمار می رود، بطوری که گارسیا (۵) از جریان گل آلود به عنوان روش عمومی جهت رسوب زدایی مخازن سدها نام می برد. در اقیانوس ها، جریان چگالی در اثر اختلاف شوری و درجه حرارت ایجاد می شود و یا به صورت جریان های گل آلود دیده می شوند (۶). فن و موریس (۷) ذکر می کنند، 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، همچنین خاک رس از گل و لای ریز و درشت در نگهداری مومنتوم و هویت جریان، موثرتر است. کسل و کراننبرگ (۹) به بررسی آزمایشگاهی جریان گل آلود بسیار غلیظ به کمک خاک چینی بر روی سطح شیبدار پرداختند و با توجه به تعریفی که از عدد رینولدز موثر ارائه می دهند، گذر از حالت لایه ای به مغشوش را در عدد رینولدز موثر ۲۰۰۰ بیان می کنند. علویان (۱۰) آزمایشاتی بر روی جریان چگالی آب- نمک سه بعدی، تحت شیب های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه انجام داد. وی نشان داد، پخش عرضی جریان چگالی، وابسته به شار شناوری اولیه و شیب کف می باشد به طوری که 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 (۱۱) در بررسی خود بر روی جریانهای چگالی ناشی از اختلاف شوری و دما، وجود دو رژیم را تشخیص می دهد، ۱- رژیم در حال گسترش، در این رژیم رشد جریان را

فلاد 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 با چگالی مخصوص ۲۶۵۰ کیلو گرم بر متر مکعب که اندازه متوسط ذرات آن حدود ۲۰ میکرون می‌باشد استفاده شده است. بدین صورت که با اندازه‌گیری دما آب، چگالیش را از جداول مشخص کرده و سپس، مقدار وزنی از آب که می‌بایست، با مقدار وزن معینی از کائولن مخلوط شود، حاصل می‌شود. در این آزمایشات، از سه غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ۱/۰، ۵/۰، و ۱/۵ استفاده شد. به دلیل نیاز به هد ثابت در خروجی این مخزن و جهت تنظیم دبی ثابت، در بالای این مخزن، یک مخزن کوچکتر به ابعاد ۳۰×۵۰×۵cm 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 از به درون مخزن تهیه مخلوط سرریز می‌شود که این عمل همچنین باعث سیرکولاسیون و ممانعت از ته نشینی می‌گردد. یک پمپ کف کش دیگر نیز در درون مخزن تغذیه قرار گرفته و عمل سیرکولاسیون را انجام می‌دهد و همچنین از یک هم زن نیز جهت ممانعت از ته نشینی ذرات استفاده شده است. جریان حاوی ذرات بعد از مخزن ایجاد هد ثابت، وارد قسمتی از کانال می‌شود که از بقیه کانال توسط دیواره ای جدا شده است و آب صاف به این قسمت راه ندارد. زمانی که 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 کف شور 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. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱ دیده می‌شود. شیب کانال توسط جک های هیدرولیکی حداکثر تا ۳/۵٪ تغییر می‌کند. آزمایشات در سه شیب ۱، ۲ و ۳ درصد انجام شده است.

می‌باشند (۱۴)، لذا بررسی هیدرودینامیک این جریان در پیش بینی و محاسبات رسوب اهمیت ویژه ای می‌یابد. اگرچه تحقیقات چندی درباره جریان های گل آلود انجام شده است (۱۵)، اما هنوز هم بسیار ناچیز می‌باشد. زیرا طبیعت این جریانها کاملاً به شرایط اولیه و محیط بستگی دارد. بنابراین بسیاری از پارامترهای فیزیکی جریانهای گل آلود ناشناخته مانده و به این ترتیب پیش بینی رسوب گذاری کاملاً غیر واقعی و با تقریب خواهد بود (۱۶). یو و همکاران (۱۷)، به بررسی تجربی رفتار ته نشینی رسوبات ریز در مخازن پرداختند و بیان می‌کنند که رفتار ته نشینی رسوبات به طور تنگاتنگ با اندازه ذرات رسوب در ارتباط است. به دلیل اینکه نیروی رانش، نیروی گرانش موثر است و پروفیل سرعت به طور تنگاتنگ با پروفیل غلظت در ارتباط است، لذا هیدرودینامیک جریان و پروفیل سرعت از عوامل بسیار تعیین کننده در رسوب گذاری است. در بسیاری از کاربردها، جریان چگالی مغشوش است و تبادل اندازه حرکت در طول فصل مشترک قائم و جانبی اتفاق می‌افتد. این تبادل، منجر به درون کشیدگی آب صاف که در بالای جریان چگالی حضور دارد شده و مشخصه های آنرا تغییر می‌دهد. مقدار درون آمیختگی به پایداری جریان بستگی دارد که، خود تابعی از برش در فصل مشترک و گرادیان فشار هیدرو استاتیکی عمود بر فصل مشترک است. دو مکانیزم اصلی برای تولید اغتشاش در جریان های چگالی گل آلود وجود دارد (۱۶). اغتشاش تولید شده توسط برش حاصل از جریان اصلی و اغتشاش تولید شده توسط شناوری. نرخ تولید اغتشاش ناشی از برش، توسط گرادیان قائم سرعت پایین دست، کنترل می‌شود. حتی در حضور لایه بندی پایدار، شناوری می‌تواند یک منبع تولید اغتشاش باشد (۲).

دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایشات

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 می‌باشد) و ۰/۶ متر ارتفاع می‌باشد. یک مخزن تغذیه (مخزن تهیه مخلوط) به شکل استوانه از

با توجه به اینکه غلظت های مورد استفاده در این آزمایشها کم است، لذا از تاثیر آن بر لزجت مخلوط آب و ذرات کائولن صرف نظر شده و بنابراین، لزجت جریان چگال برابر لزجت آب در نظر گرفته شده است (۵) جدول شماره 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 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، است 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. شیب کف کانال است. شکل شماره ۲ شماتیک جریان چگالی و شکل ۳ شماتیک گسترش عرضی و طولی جریان چگالی را نشان می دهد.

نتایج حاصل از آزمایشات

پخش عرضی غیر دایم بر حسب مکان

در این بحث بر اساس دسته بندی تعادل نیروها، گسترش عرضی جریان چگالی بررسی می شود و مدلی تئوری برای این گسترش ارائه می شود. برای گسترش عرضی در حالت غیر دائم از دو نوع نمودار استفاده شده است.

نمودار نوع اول، گسترش عرض بدون ($\frac{b}{l_o}$) بر حسب طول

بدون بعد ($\frac{x}{l_o}$) می باشد. در این نمودارها، b ، عرض جریان چگالی و، x ، موقعیت نسبی نوک دماغه پیشانی نسبت به ورودی می باشند که نسبت به مقیاس طولی شناوری اولیه $l_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ بدون بعد شده اند. Q_o ، B_o به ترتیب دی و رودی (اولیه) و فلاکس شناوری ورودی (اولیه) می باشند. در شکل شماره ۴ نمودارهای a ، b و c ، اثر تغییرات

جهت اندازه گیری دی، جریان از یک دی سنج اولتراسونیک ساخت شرکت Greyline کانادا، مدل DFM با دقت ۰/۱ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. این دی سنج، جهت اندازه گیری دی، از پدیده داپلر در امواج استفاده می کند. آزمایشات در سه دی ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر دقیقه انجام شده است.

جهت اندازه گیری پروفیل سرعت، از سرعت سنج آکوستیک ADV، ۱۰ MHz، ساخت شرکت Nortek با دقت ۰/۱ mm/s استفاده می شود. در این نوشتار نتایج پروفیل سرعت ارائه نمی شود. جهت اندازه گیری پخش طولی و عرضی جریان چگالی و نیز مشاهده شکل پیشانی از دو دوربین فیلم برداری دیجیتال استفاده شده است. کانال اسکلت فلزی و دیواره های شیشه ای دارد که قابل فیلم برداری از پهلو است. در سمت پهلوئی کانال یک ریل فلزی ساخته شده است که، ارابه فیلم برداری، بر روی آن حرکت می کند، و با نصب دوربین، بر روی آن می توان از پخش طولی، ارتفاع بدنه و پیشانی جریان با دقت ۰/۱ ثانیه فیلم برداری کرد. کف کانال جهت اندازه گیری پخش طولی و عرضی جریان، شبکه بندی شده است. یک دوربین دیگر، در بالای کانال تعبیه شده تا از نحوه پخش عرضی جریان چگال فیلم برداری نماید. چگالی شاره حاوی ذرات، قبل از ورود به دریچه، با نمونه گیری از آن توسط هیدرومتر با دقت ۰/۵ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شده است. در نتیجه، در طول حرکت شاره چگال غلظت موضعی اندازه گیری نشده است.

در این آزمایش از سه غلظت، سه دی و سه شیب متفاوت استفاده شده و اثر آنها بر ارتفاع، سرعت جریان چگال و ارتفاع رسوب اندازه گیری شده است. جدول شماره ۱ نشان دهنده شرایط آزمایش می باشد. اعداد ریچاردسون ورودی Ri_{in} و رینولدز ورودی Re_{in} به صورت زیر تعریف می شود

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

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

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 کلیه نمودارها، در نقطه $\frac{x}{l_0} \approx 6$ عرض بدون بعد $\frac{b}{l_0} \approx 2$ می باشد و می توان نتیجه گرفت که، لاقل در محدوده تغییرات دبی، غلظت و شیب آزمایشات حاضر این نقطه تقریباً مستقل از تغییرات نام برده است. بر اساس نتایج اجراهای مختلف، در محدوده آزمایش برای هر اجرا، عرض بدون بعد متناسب است با عبارت ذیل: $\frac{b}{l_0} \propto \left(\frac{x}{l_0}\right)^n$ (۵)

بنابراین: $b \propto x^n$ (۶)

با توجه به رابطه (۴)، عرض b نسبت به x در هر یک از نواحی R_1 و R_2 از فرمول زیر تبعیت می کند: $b = A x^n$ (۷)

در رابطه (۴)، A' ضریب تناسب می باشد. چنانچه مشاهده می شود، برای هر اجرا، در کلیه نمودارهای a تا f شیب نتایج برداشت شده در ناحیه R_1 با تغییرات غلظت، دبی و شیب ثابت است. ولی در ناحیه R_2 شیب نتایج برداشت شده، برای هر اجرا، ثابت نیست و در غلظت ها، دبی ها و شیب های بالاتر، تغییر آن بیشتر مشهود است، اما در محدوده پراکندگی نتایج حاضر، ثابت در نظر گرفته شده است. جهت مقایسه، در نمودارهای (b) و (e) RUN 20 که تحت شرایط $Q=15 \text{ lit/min}$ و $C=1\%$ ، $S=2\%$ است، آورده شده است. بطوریکه مشاهده می شود، در نواحی R_1 (رژیم اینرسی-لزجی) و R_2 (رژیم شناوری-لزجی)، نتایج این اجرا، در محدوده پراکندگی اجراهای دیگر می افتد، لذا می توان گفت، در محدوده این آزمایش در یک غلظت ثابت یا دبی ثابت تاثیر شیب کف بر پخش عرضی بدون بعد b بر حسب x بر اجراها مختلف ناچیز می باشد. همچنین جهت مقایسه، RUN 15 در نمودار (c) و (f) که تحت شرایط $Q=20 \text{ lit/min}$ و $C=1/5\%$ ، $S=3\%$ می باشد، آورده شده است که، عیناً مطالب فوق، در مورد این اجرا نیز صادق است.

دبی بر پخش عرضی بدون بعد در شیب و غلظت ثابت و نمودارهای e, d, f ، اثر تغییرات غلظت بر پخش عرضی بدون بعد در شیب و دبی ثابت را نمایش می دهند. به طوری که، پراکندگی نتایج نشان می دهد، 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 شکل کلی ذیل می توان برازش نمود.

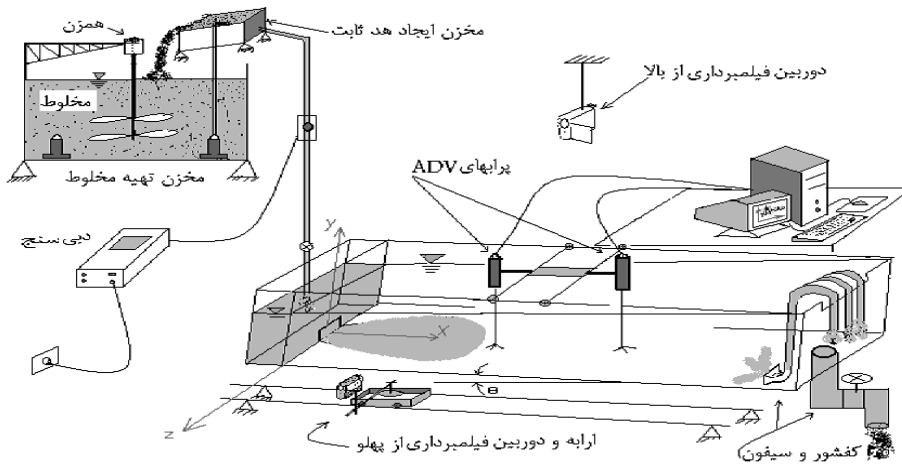
$$\frac{b}{l_0} = \left(\frac{x}{l_0}\right)^n A \quad (۴)$$

n ، شیب خط گذرانده شده در صفحه Log-Log و A ضریب تناسب می باشد. چنانچه مشاهده می شود در کلیه

نمودارها در نقطه $\frac{x}{l_0} \approx 6$ تغییری در شیب داده ها اتفاق

می افتد و لذا دو ناحیه R_1 ($\frac{x}{l_0} < 6$) و R_2 ($\frac{x}{l_0} > 6$) را می توان تقریباً در همین جا از هم مجزا دانست. بر طبق آنچه که نتایج نشان می دهد، در کلیه نمودارها، میزان

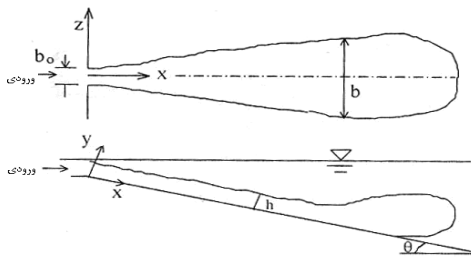
گسترش عرضی b برای $\frac{x}{l_0} < 6$ و $\frac{x}{l_0} > 6$ مختلف است و این امر حاکی از آن است که در این دو ناحیه، مقدار و نوع نیروهایی که با هم در تعادل هستند، متفاوتند. تقسیم جریان، از نقطه نظر تعادل نیروها به سه ناحیه در جهت عرضی و هم طولی، از پیشنهادهای تسیهرینتزیس و علویان (۳) است. مشاهده کلیه گرافهای شکل شماره (۴)، از a تا f نشان می دهد که، به وضوح، دو ناحیه در گسترش عرضی جریان وجود دارد. در ابتدای ورود جریان، که اصطکاک ناچیز است، تعادل بین نیروهای اینرسی و لزجی بر قرار است (ناحیه R_1) و سپس، در فاصله ای که جریان چگالی در جهت عرضی از مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می شود، تعادل بین نیروهای شناوری و لزجی برقرار می شود (ناحیه R_2). در انتها، تعادل بین نیروهای گرانش و لزجی بر قرار می شود که، در اینجا، به دلیل محدودیت عرضی کانال و برخورد جریان چگالی به دیواره کانال، ناحیه R_2 (گرانش-لزجی)، قابل مشاهده نیست. 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



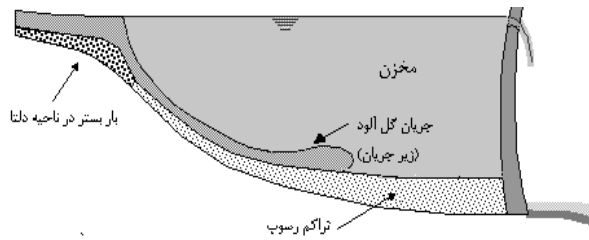
شکل (۱). طرح شماتیک دستگاه آزمایش

جدول (۱). مشخصات اجراهای مختلف آزمایش

RUN	S	C _{in}	Q _{in} (lit/min)	Re _{in}	Ri _{in}	T(°C)
۳	۳٪	۰/۱۵٪	۱۰	۱۵۳۲/۳۲۴	۰/۰۲۶۲	۱۷
۴	۳٪	۰/۱۵٪	۱۵	۲۲۹۷/۹۱۲	۰/۰۱۱۷۶	۱۷
۵	۳٪	۰/۱۵٪	۱۰	۱۵۳۲/۳۲۴	۰/۰۲۶۲	۱۷
۶	۳٪	۱٪	۲/۴	۳۶۶/۷۰۰	۰/۱۵۷۸۲	۱۷
۷	۳٪	۱٪	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۴۷	۱۶/۵
۸	۳٪	۱٪	۱۰	۱۵۷۱/۰۴۴	۰/۰۳۳۱	۱۸
۹	۳٪	۱٪	۵	۷۸۴/۹۳۳	۰/۱۳۲۶	۱۸
۱۰	۳٪	۱٪	۶	۹۲۹/۹۳۴	۰/۰۹۲۱	۱۷/۵
۱۱	۳٪	۰/۱۵٪	۵	۷۶۵/۵۸۷	۰/۰۱۰۵	۱۷
۱۲	۳٪	۱/۱۵٪	۲۰	۲۹۹۰/۹۳	۰/۰۱۰۰	۱۶
۱۳	۳٪	۱/۱۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶
۱۴	۳٪	۱/۱۵٪	۱۰	۱۴۵۰/۱۶۵۷	۰/۰۴۰۶	۱۵
۱۵	۳٪	۱/۱۵٪	۲۰	۲۷۵۹/۱۴۸	۰/۰۰۹۹	۱۳
۱۶	۲٪	۰/۱۵٪	۱۰	۱۴۵۰/۱۶۵۷	۰/۰۲۶۶	۱۵
۱۷	۲٪	۰/۱۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۱۶۵	۱۶
۱۸	۲٪	۰/۱۵٪	۲۰	۲۹۹۰/۹۳۵	۰/۰۰۶۵	۱۶
۱۹	۲٪	۱٪	۱۰	۱۵۲۰/۸۲۹	۰/۰۳۳۶	۱۷
۲۰	۲٪	۱٪	۱۵	۲۱۹۱/۸۸۵	۰/۰۱۴۷	۱۵
۲۱	۲٪	۱٪	۲۰	۲۹۲۳/۲۴۵	۰/۰۰۸۲	۱۵
۲۲	۲٪	۱٪	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۴۷	۱۶/۵
۲۳	۲٪	۱/۱۵٪	۱۰	۱۵۰۲/۳۱۶	۰/۰۴۰۶	۱۶/۵
۲۴	۲٪	۱/۱۵٪	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶/۵
۲۵	۲٪	۱/۱۵٪	۲۰	۱۵۰۲/۳۱۶	۰/۰۴۰۶	۱۶/۵
۲۶	۱٪	۰/۱۵٪	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۲۶۵	۱۶
۲۷	۱٪	۰/۱۵٪	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۲۶۵	۱۶
۲۸	۱٪	۰/۱۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۱۶	۱۶
۲۹	۱٪	۱٪	۱۰	۱۴۷۷/۱۴۲	۰/۰۳۳۵	۱۵/۸
۳۰	۱٪	۰/۱۵٪	۲۰	۲۸۷۸/۵۵۲	۰/۰۰۶۵۴۲	۱۴/۵
۳۱	۱٪	۰/۱۵٪	۲۰	۲۷۹۷/۸۳۳	۰/۰۰۶۵۴۲	۱۳/۵
۳۲	۱٪	۱٪	۱۵	۲۱۲۷/۶۸۲	۰/۰۱۴۷	۱۴
۳۳	۱٪	۱٪	۲۰	۲۹۹۰/۹۳۵	۰/۰۰۸۲۶۵۴	۱۶
۳۴	۱٪	۱/۱۵٪	۱۰	۱۵۵۹/۲۵۸	۰/۰۴۰۶	۱۸
۳۵	۱٪	۱/۱۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶
۳۶	۱٪	۱/۱۵٪	۲۰	۳۰۲۷/۳۴۳	۰/۰۱	۱۶/۵



شکل (۳). شماتیک گسترش عرضی و طولی جریان چگالی



شکل (۲). شماتیک جریان چگالی

جدول (۲) مقادیر n و A برای نمودارهای مختلف

نمودارهای شکل (۳)	R ₁		R ₂	
	n	A	n	A
a	۰/۳۳	۱/۶	۱/۱۲	۰/۰۴
b	۰/۱۹۵	۱/۹۵	۱/۲	۰/۳۵
c	۰/۲۲	۲	۱/۲	۰/۳۷
d	۰/۱۸	۲/۲	۱/۳	۰/۳
e	۰/۲۵	۱/۸	۱,۲	۰/۰۳۵
f	۰/۳	۱/۷	۱/۰۲	۰/۳۱
شکل (۴) ALL	۰/۲۵	۱/۹	۱/۲	۰/۳۵

جدول (۳) در صد خطای مقادیر n و A نسبت به رابطه (۵) و (۶)

نمودارهای شکل (۴)	درصد خطای A و n نسبت به رابطه (۹)		درصد خطای A و n نسبت به رابطه (۸)	
	n	A	n	A
a	۳۲	۱۵/۷۸۹	۶/۶۶۶	۱۴/۲۸۵
b	۲۲	۲/۶۳۱	۰	۰
c	۱۲	۵/۲۶۳	۰	۵/۷۱۴
d	۲۸	۱۵/۷۸۹	۸/۳۳۳	۱۴/۲۸۵
e	۰	۵/۲۶۳	۰	۰
f	۲۰	۱۰/۵۲۶	۰	۱۱/۴۲۸

جدول (۴) مقادیر n و A برای نمودارهای مختلف

نمودارها شکل (۶)	R ₁		R ₂	
	m	B	m	B
a	۰/۱۸	۱/۵۵	۰/۶۲	۰/۶
b	۰/۱۸۵	۱/۵	۰/۸	۰/۴
c	۰/۳۵	۱/۳	۰/۷۵	۰/۵۵
d	۰/۱۸	۲/۳	۱/۲	۰/۴
e	۰/۱۹	۱/۵۸	۰/۷۲	۰/۴۸
f	۰/۱۸	۱/۳	۰/۷۵	۰/۳۵
شکل (۷) ALL	۰/۰۲۷	۱/۵	۰/۶۵	۰/۶۵

می افتد و دو ناحیه R_1 و R_2 قابل تشخیص است. در ناحیه R_1 ، عرض آهسته تر رشد می کند و متناسب است با $x^{0.25}$ و در ناحیه R_2 ، عرض با متناسب با $x^{1.2}$ است. در صورتی که، تسیهرینتریس و علویان (۳) برای جریان چگالی فاقد ذرات

در شکل شماره ۵، نتایج تمام اجراها در شیب ها، غلظت ها و دبی ها مختلف نمایش داده شده است. همچنان که ذکر شد، در نقطه $6 \approx \frac{x}{l_0}$ یک تغییر در شیب داده ها اتفاق

پخش عرضی غیر دایم بر حسب زمان

در ادامه، گسترش عرضی بر حسب زمان حرکت دماغه پیشانی بررسی شده است. بر این اساس، نمودارهای (نوع

دوم) عرض بدون بعد $(\frac{b}{l_o})$ بر حسب زمان بدون بعد

$(\frac{t}{t_o})$ رسم شده است. در این نمودارها، b ، عرض جریان t_o ، زمان متناظر با b ، و x ، می باشد که، نسبت به

عبارت $t_o = \frac{1}{U_o} (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ ، که مقیاس زمانی شناوری اولیه نام نهاده می شود، بدون بعد می شوند. U_o سرعت ورودی (اولیه) جریان چگالی به داخل کانال است.

در شکل شماره ۶، نمودارهای a ، b و c اثر تغییرات دبی بر پخش عرضی بدون بعد در شیب و غلظت ثابت و نمودارهای d ، e و f اثر تغییرات غلظت بر پخش عرضی بدون بعد در شیب و دبی ثابت را نمایش می دهند. به طوری که، پراکندگی نتایج نشان می دهد، 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 شکل کلی ذیل می توان برآزش نمود.

$$\frac{b}{l_o} = \left(\frac{t}{t_o} \right)^{(m)} B \quad (10)$$

در رابطه فوق $l_o = (Q_o^3 / B_o)^{1/5}$ مقیاس طولی شناوری اولیه، m شیب خط گذرانده شده در صفحه Log-Log و B ضریب تناسب می باشد، قابل توجه است که، در اینجا نیز، بر طبق آنچه که نتایج نشان می دهد، در کلیه نمودارها،

میزان رشد عرض b برای $9.5 < \frac{t}{t_o}$ و $9.5 > \frac{t}{t_o}$ مختلف است و این امر حاکی از آن است که مقدار و نوع نیروهای که با هم در تعادل هستند در این دو ناحیه، متفاوت است. در ابتدای ورود، تعادل بین نیروهای اینرسی و لزجی برقرار است (ناحیه R_1) و سپس، جریان چگالی در جهت عرضی از مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می شود، در این حالت، تعادل بین نیروها شناوری و لزجی برقرار است (ناحیه R_2) و در انتها تعادل بین نیروها گرانش و لزجی

در شرایط مشابه، برای نواحی R_1 و R_2 عرض را به ترتیب متناسب با $x^{0.636}$ و $x^{0.2}$ بدست آورده اند.

در جدول شماره ۲، مقادیر n و A ، برای نمودارهای مختلف آورده شده است. به طوری که، مشاهده می شود، می توان نتیجه گرفت، با افزایش غلظت جریان چگالی در ناحیه R_1 مقدار n ، هیچ گونه رابطه صعودی و نزولی با تغییرات غلظت ندارد و مقدار A افزایش می یابد، ولی، در ناحیه R_2 با افزایش غلظت مقدار n افزایش می یابد و سپس در مقدار $1/2$ ثابت باقی می ماند. همچنین، مقدار A در ناحیه اخیر، هیچ گونه رابطه صعودی و نزولی با تغییرات غلظت ندارد. با افزایش دبی جریان چگالی، در ناحیه R_1 مقدار n افزایش و مقدار A کاهش می یابد، ولی، در ناحیه R_2 با افزایش دبی مقدار n کاهش می یابد سپس، در مقدار $1/2$ ثابت باقی می ماند و نیز مقدار A ، در ناحیه اخیر، هیچ گونه رابطه صعودی و نزولی با تغییرات دبی ندارد. چنانچه جدول شماره ۲، نیز نشان می دهد، در ناحیه R_2 با دقت بسیار بالایی می توان تمام داده ها را یکسان فرض نموده و گسترش عرضی را به صورت ذیل دانست.

$$\frac{b}{l_o} = \left(\frac{x}{l_o} \right)^{1.2} \quad 0.35 \quad (8)$$

در ناحیه R_1 ، اگر فرض شود که:

$$\frac{b}{l_o} = \left(\frac{x}{l_o} \right)^{0.25} \quad 1.9 \quad (9)$$

با بعضی از اجراها، تطابق ندارد. خطاهای این عدم تطابق در جدول شماره ۳ آورده شده است. این اختلاف را می توان از برداشت داده ها نیز، تفسیر کرد. در این ناحیه، به دلیل فوق بحرانی بودن جریان، آشفتگی زیادی در جریان وجود دارد، گردابه ها و افت و خیزهایی نیز، در فصل مشترک عرضی جریان چگالی و آب صاف دیده می شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه افزایش شیب و غلظت تغییر معنی داری در داده ها ایجاد نمی کند، لذا، با این توصیف، می توان گسترش عرضی را مطابق رابطه کلی فرض کرد.

بنابراین:

$$b \propto t^m \quad (12)$$

مجدداً، با توجه به رابطه (۱۰)، عرض b نسبت به x در هر یک از نواحی R_1 و R_2 از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$b = B x^m \quad (13)$$

در فرمول فوق B' ضریب تناسب است. چنانچه مشاهده می شود، برای هر اجرا، در کلیه نمودارهای a تا f شیب نتایج برداشت شده در ناحیه R_1 با تغییرات غلظت، دبی و شیب، ثابت است. ولی، در ناحیه R_2 شیب برداشت شده، برای هر اجرا، ثابت نیست و در غلظتها، دبی ها و شیب های بالاتر، بیشتر مشهود است، اما، در محدوده پراکندگی نتایج، ثابت در نظر گرفته شده است.

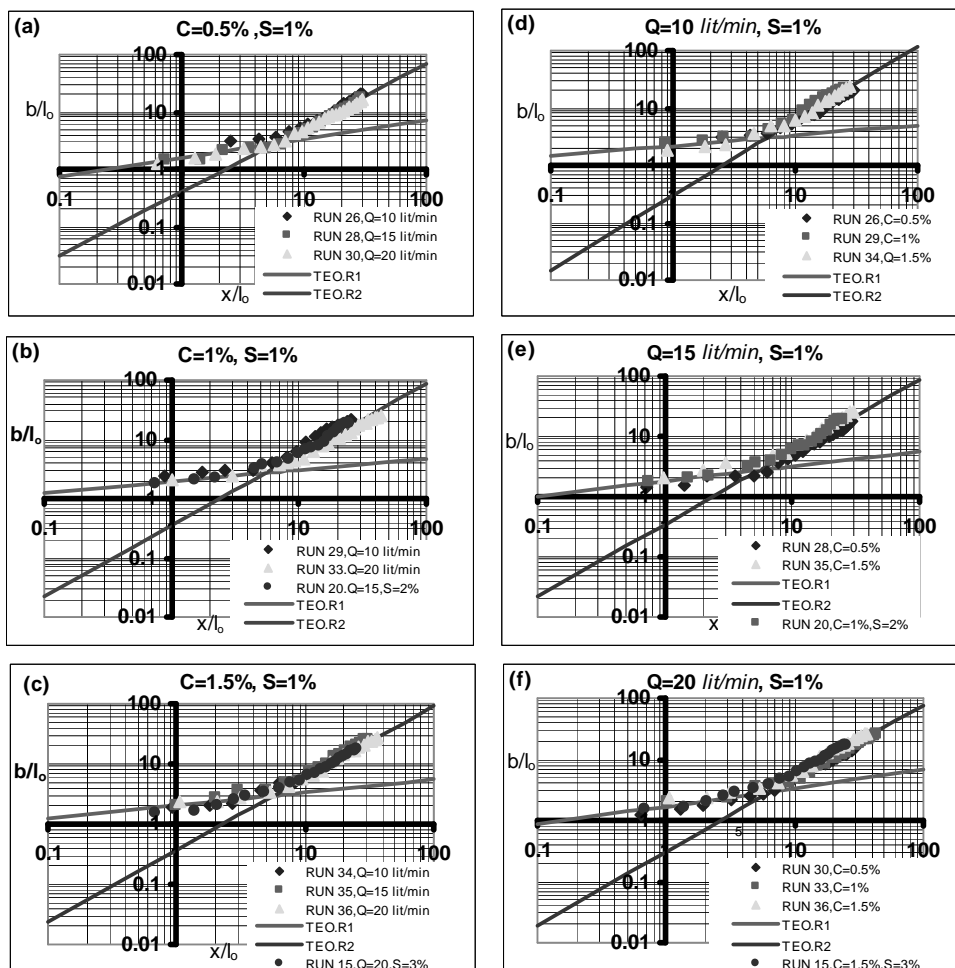
بر قرار می شود که همانطور که قسمت ۳-۱ ذکر شد، به سبب برخورد جریان چگالی با دیواره این ناحیه، قابل مشاهده نیست.

با توجه به شیب خطوط گذرانده شده، در ناحیه R_1 رشد عرض b با زمان، نسبت به ناحیه R_2 کمتر است. در کلیه

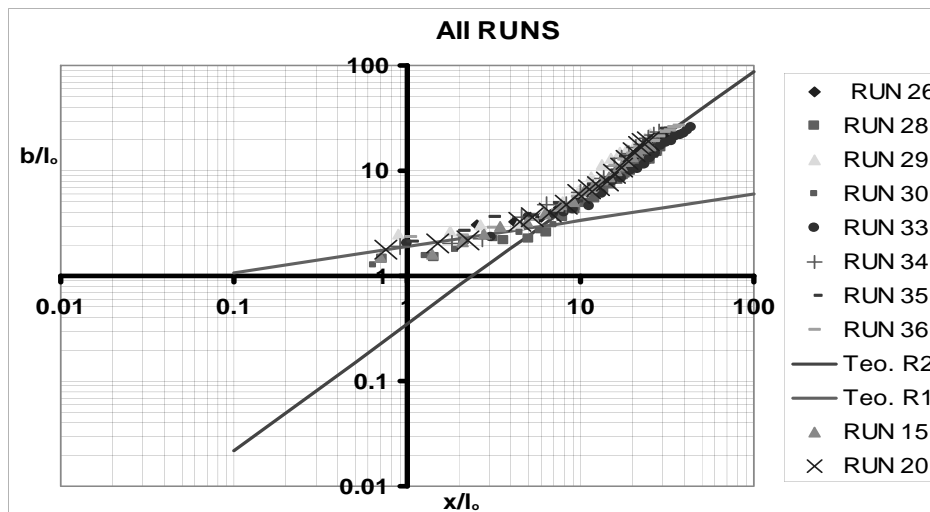
نمودارها، در زمان بدون بعد $\frac{t}{t_0} \approx 9.5$ ، عرض بدون

بعد تقریباً $\frac{b}{l_0} \approx 2$ می باشد و می توان گفت که، در محدوده تغییرات دبی، غلظت و شیب آزمایشات این نقطه تقریباً مستقل از تغییرات نام برده، بر اساس نتایج اجراهای مختلف، در محدوده آزمایش، برای هر اجرا، عرض بدون بعد متناسب است با عبارت ذیل:

$$\frac{b}{l_0} \propto \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \quad (11)$$



شکل (۴) اثر تغییرات غلظت، دبی و شیب بر پخش عرضی بدون بعد



شکل (۵) نتایج تمام اجراها در شیب و غلظت مختلف

اتفاق می افتد و دو ناحیه R_1 و R_2 قابل تشخیص است. در ناحیه R_2 عرض سریعتر رشد می کند و نیز با توجه به موازی بودن شیب نتایج اجراهای مختلف می توان گفت، متناسب است با $t^{0.65}$ ولی، در ناحیه R_1 ، با توجه به پراکندگی بیشتر نتایج، تقریباً عرض با $t^{0.27}$ متناسب است. در صورتی که تسپهرینتیز و علویان (۳)، برای جریان چگالی، فاقد ذرات در شرایط مشابه، برای نواحی R_1 و R_2 عرض را به ترتیب، متناسب با $t^{0.437}$ و $t^{0.125}$ بدست آورده اند. دیده می شود، برای هر دو نوع نمودار، یک و دو تغییر رژیم در

اتفاق می افتد. این امر، حاکی از تعریف صحیح زمان، بدون بعد متناظر با طول بدون بعد است. در جدول شماره ۴، مقادیر m و B (رابطه ۱۰) آورده شده است. هر دو نوع نمودار نکته را تایید می کند که، گسترش عرضی، تابع تعادل نیروها بوده و از روند مشخصی پیروی می کند.

در ضمن، نظر به اینکه مدل (دستگاه مورد آزمایش) با واقعیت، تشابه هندسی و دینامیکی دارد، این بررسی قبلاً، توسط محققین صورت گرفته است که در اینجا، با توجه به فیزیک یکسان مسئله، واضح است، ضرورت بررسی مجدد را ندارد، لذا، در اینجا نتایج تجربی حاصل از مدل با واقعیت مربوطه هم خوانی دارد و از طرفی چون نتایج حاصله، بصورت بدون بعد ارائه شده اند، بنابراین تحت شرایط یکسان اولیه، می توان آنها را برای هر ابعادی در

جهت مقایسه در نمودار (b) RUN 20 که تحت شرایط $Q=15 \text{ lit/min}$ ، $C=1\%$ و $S=2\%$ است، آورده شده است. به طوری که، مشاهده می شود، در ناحیه R_2 ، نتایج این اجرا، در محدوده پراکندگی بقیه اجراها نمی افتد و این امر، نشان دهنده تاثیر شیب کف در ناحیه R_2 رژیم شناوری- لزجی) بر اجراها مختلف است به طوری که، در یک غلظت ثابت، هر چه شیب بیشتر باشد، نرخ رشد عرضی، با زمان بیشتر است، ولی، در مورد ناحیه R_1 (رژیم اینرسی- لزجی) می توان گفت، در غلظت ثابت، تاثیر شیب بر اجراها مختلف ناچیز است. همچنین، جهت مقایسه، RUN 20 در نمودار (e) آورده شده است. به طوری که مشاهده می شود، در ناحیه R_1 و R_2 نتایج این اجرا، در محدوده پراکندگی اجراهای دیگر می افتد و این امر نشان دهنده تاثیر ناچیز شیب کف در یک دبی ثابت، در نواحی R_1 و R_2 بر اجراها مختلف است، به طوری که، می توان گفت، در محدوده این آزمایش، در یک دبی ثابت، تاثیر شیب کف بر اجراها مختلف ناچیز است. جهت مقایسه، RUN 15 در نمودار (c) و (f) که، تحت شرایط $Q=20 \text{ lit/min}$ و $C=1/5\%$ ، $S=3\%$ است، آورده شده است. عیناً مطالب فوق در مورد این اجرا نیز صادق است.

در شکل (۷)، نتایج تمام اجراها در شیب ها، غلظت ها و دبی های مختلف، نمایش داده شده است، به طوری که،

مشاهده می شود، در نقطه $\frac{b}{l_0} \approx 2$ تغییر در شیب داده ها

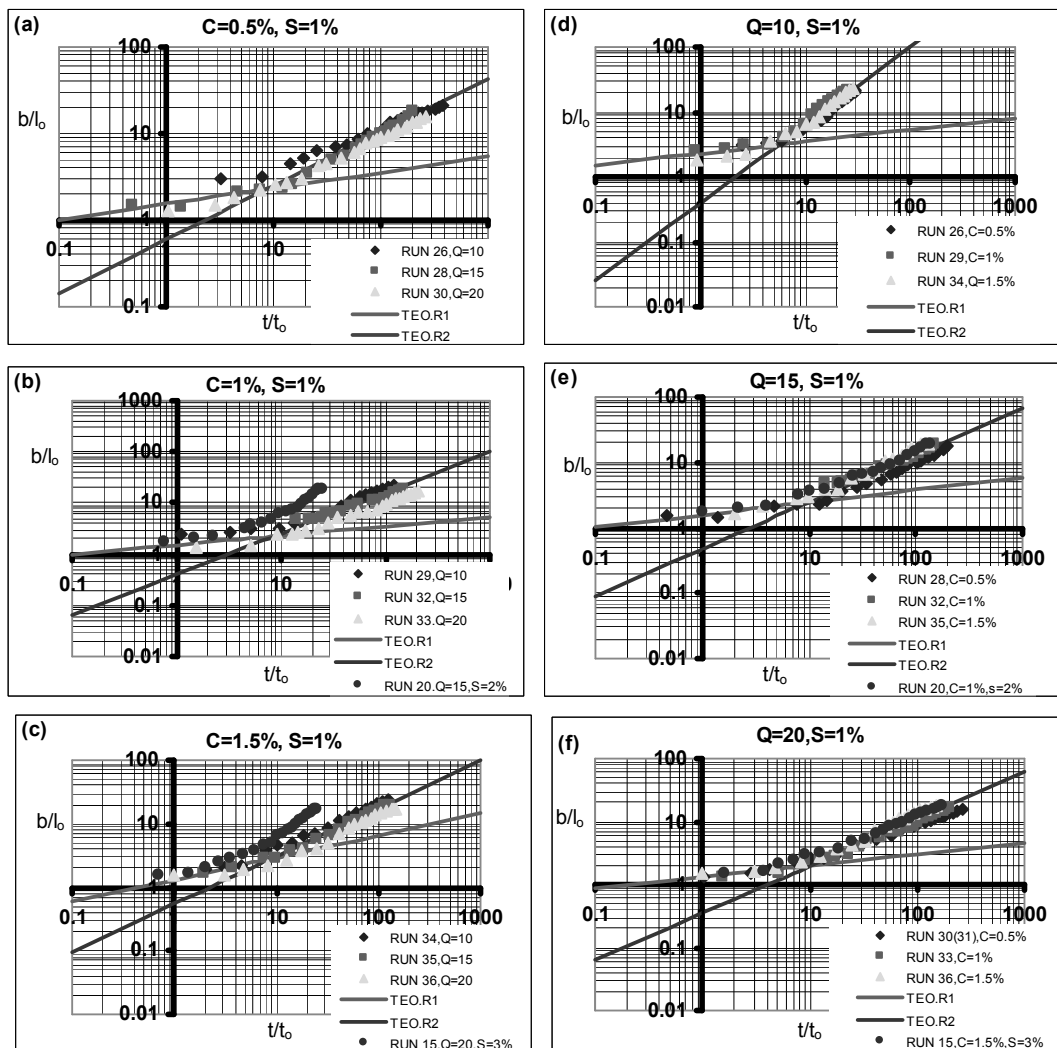
واقعیت، استفاده نمود.

ناحیه تا عرض بدون بعد $\frac{b}{l_0} \approx 2$ امتداد دارد. در گام بعدی، تعادل نیروها تغییر یافته و به تعادل بین نیروهای شناوری و لزجی منجر می شود. در این حالت، جریان از مافوق بحرانی به مادون بحرانی تغییر می یابد. رسم منحنی گسترش عرضی بدون بعد بر حسب طول بدون بعد در صفحه نشان می دهد که:

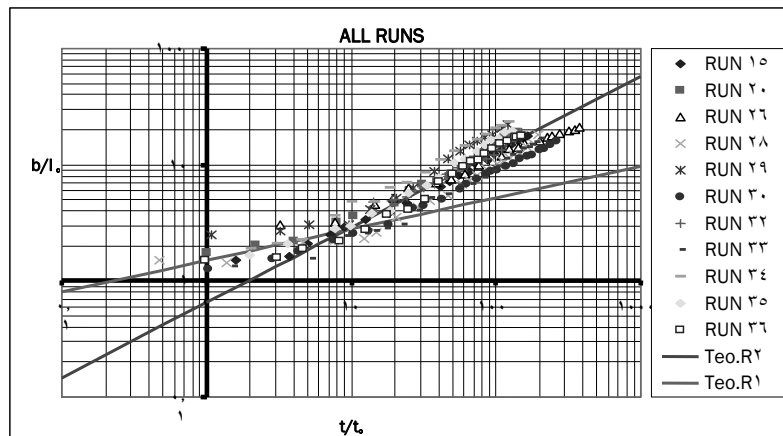
۱- در $\frac{x}{l_0} \approx 6$ تغییر رژیم جریان اتفاق می افتد در هر کدام از نواحی (R_1) و (R_2) می توان خطی بر داده ها برازش کرد.

نتیجه گیری

در این نوشتار گسترش عرضی جریان گل آلود سه بعدی در حالت غیر دائم، به صورت تجربی بررسی شده است و مدلی، تئوری برای آن استخراج شده است. رسم نمودارهای گسترش عرضی، بدون بعد، بر حسب طول بدون بعد و زمان بدون بعد، متناظر با آن نشان می دهد که، عرض جریان متناسب با تعادل نیروها گسترش می یابد. درحالتی که، جریان گل آلود وارد فضای آب محیط می شود، به دلیل ناچیز بودن اصطکاک کف، تعادل بین دو نیروی اینرسی و لزجی برقرار است. این



شکل (۶) اثر تغییرات غلظت، دبی و شیب بر پخش عرضی بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد



شکل (۷) نتایج تمام اجراها در شیب و غلظت مختلف

$$g'_n = g (\rho_n - \rho_w) / \rho_n$$

v = سرعت جریان چگال در جهت محور y

w = سرعت جریان چگال در جهت محور z

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

Q_{in} = دبی حجمی ورودی

θ = زاویه شیب کف

S = شیب برحسب درصد

ρ_{in} = چگالی جریان چگال در ورودی

T = دما

ρ_w = جرم ویژه آب

v = لزجت سینماتیکی

Reference

1. Turner, J. S., (1973), Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press London, U.K., 178-181.
2. Firoozabadi, B., Farhanieh, B., Rad, M., (2003), "Hydrodynamics of 2-D laminar turbidity current, Journal of Hydraulic Research, V. 41, N. 6, P.P. 623-630.
3. Tsihrintzis, V. A., Alavian, V., (1996), "Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes", Journal of Hydraulic Research, V. 34, N. 5, P.P. 695-711.

۲- تفاوت شیب خط برازش شده که حاکی از میزان گسترش عرضی جریان دارد، نشان می دهد که، در ناحیه R_1 عرض جریان آهسته تر رشد کرده و متناسب با $t^{0.25}$ و در ناحیه R_2 سریعتر رشد کرده و با متناسب $t^{1.2}$ 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 می توان از آن چشم پوشی کرد.

۴- رسم منحنی عرض، بدون بعد، نسبت به زمان بدون بعد متناظر هم نشان می دهد که، تغییر رژیم در

$\frac{b}{l_0} \approx 2$ اتفاق می افتد و داده های نمودار بر حسب طول بدون بعد را تائید می کند.

۵- منحنی عرض بدون بعد، نسبت به زمان بدون بعد، نشان می دهد که، می توان گسترش عرضی را بر حسب زمان بدون بعد مدل کرد.

علائم

B_0 = شار شناوری اولیه (ورودی)

$$B_0 = g'_0 h_0 b_0 U_0$$

C_{in} = غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ورودی

$U_0 = U_{in}$ = سرعت ورودی (اولیه) جریان چگالی

g = شتاب گرانش

U = سرعت جریان چگال در جهت محور x

$g_0 = g_{in}$ = شتاب گرانش کاهش یافته در ورودی

- N. 2, P.P. 173-181.
12. 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, P.P. 578-590
 13. Kassem, A., Imran, J., (2004), "Three-dimensional modeling of density current. II. Flow in sinuous confined and unconfined channels", Journal of Hydraulic Research, V. 42, N. 6, P.P. 591-602
 14. De Cesare, G., Schleiss, A., Hermann, F., (2001), "Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, V. 127, No. 1, P.P. 6-16.
 15. Felix, M., (2001), "A Two-Dimensional Numerical Model for a Turbidity Current", Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, V. 31, P.P. 71-81.
 16. Buckee, C.; Kneller, B., Peakall, J., (2001), "Turbulence Structure in Steady Solute-Driven Gravity Currents", Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, V. 31, P.P. 173-178.
 17. Yu, W. S., Lee, H. Y., and Hsu, M. S., (2000), "Experiments on deposition behavior of fine sediment in a reservoir", J. of Hydraulic Engineering, 126(12), P.P. 912-920
 4. Mukamedov, A.M., et al, (1972), «Origin and movement of the bottom current in the reservoir of Nurek power station and its effect on silting of the reservoir», International symposium on stratified flows, Novosibirsk.
 5. Garcia, M. H., (1994), "Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment", J. of Hydraulic Eng. ASCE, V. 120, N.11, P.P. 1240-1263.
 6. Firoozabadi, B., (2004), "Propagation of three dimensional density currents" BSME-ASME Conferences in Mechanical Eng., Bangladesh University of Technology, Bangladesh, 1-4 January.
 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, P.P.
 9. Kessel, T., Kranenburg, C., (1996), "Gravity current of fluid on sloping bed", J. of Hydraulic Engineering, V.122, N.12, December, 710-717.
 10. Alavian, V., (1986), "Behavior of density current an incline", J. of Hydraulic Engineering, V.122, N.1, January, P.P.27-42.
 11. Horsch, G. M., (2004), "The structure of two-dimensional, miscible laminar density currents flowing down an incline", Journal of Hydraulic Research, V. 42,