

مطالعه آزمایشگاهی جریان ثقلی به وجود آمده در اثر جریان های تبادلی در محیط محدود

امیرحسین زابلی پور*، صاحب منصوررضایی فومنی*، حامد کتابچی*

ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران

hketabchi@civil.sharif.edu

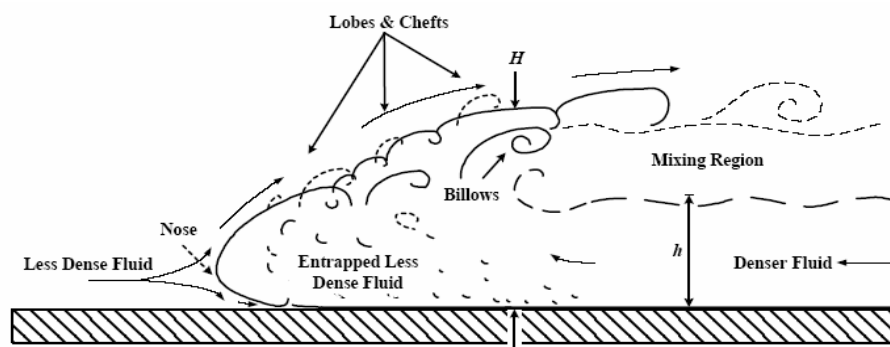
خلاصه

جریان های ثقلی یکی از جریان های مرتبط با چگالی می باشند که در شرایط حاکم در طبیعت و نیز در سازه های ساخته بشر به وجود می آیند. این جریان ها در رده سیال های لایه ای طبقه بندی می شوند و زمانی که دو یا چند سیال با چگالی های مختلف به صورت ناپایدار از لحاظ ثقلی، در کنار هم قرار می گیرند، پدید می آیند. بر اساس مطالعات صورت گرفته پیشین، جریان های ثقلی به اغتشاش ناشی از آشفتگی جریان و اختلاط در آن وابسته می باشند، ولی در جریان های با عدد رینولدز بالا، نشان داده شده است که سرعت جریان تبادلی، عملاً به پارامترهای ذکر شده بستگی ندارد و در این شرایط سرعت و عمق جریان با اعمال اصل بقای انرژی، با دقت خوبی به دست می آید. در این مطالعه سرعت جریان سیال چگال با چگالی های مختلف برای حالات مختلف نسبت عمق سیال دولایه، با یک برنامه آزمایشگاهی و پردازش عکس های ثبت شده به دست آمده است. بررسی نتایج، نشان دهنده مطابقت آنها با نتایج تحلیلی به دست آمده، براساس تئوری جریان های با عدد رینولدز بالا می باشد. بر طبق مشاهدات، سیال چگال از کف به سمت سیال با چگالی کمتر حرکت نموده و به صورت مشابه سیال با چگالی کمتر در جهت عکس در سطح به سمت سیال چگال جابه جا می گردد و سرعت جریان در این دو قسمت تقریباً مساوی و خلاف جهت هم می باشد. جریان در قسمت بالای پیشانی دارای حرکت های چرخشی و آشفته بوده و بسیار پیچیده می باشد.

کلمات کلیدی: جریان تبادلی، سرعت جریان، سیال لایه ای، عمق جریان، مطالعه آزمایشگاهی

مقدمه

جریان های ثقلی یکی از جریان های مرتبط با چگالی سیال می باشد که در شرایط طبیعی و یا در مصنوعات ساخته بشر به وجود می آید. در این پدیده جریان به وجود آمده روی سطح تحتانی گسترده شده و اختلاط شدیدی بین قسمت پنجه جریان و سیال اطرافش رخ می دهد. یک شکل تیپ از چنین جریان ثقلی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای تیپ از جریان ثقلی

* دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش مهندسی آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف



جریانی که سبب اختلاط می گردد، به دلیل دو نوع ناپایداری بوجود می آید: اول به دلیل حباب ها و اغتشاش پدید آمده در اثر چرخش موجود در ناحیه سرعت برشی قسمت فوقانی سیال چگال و دوم به دلیل تغییرات بسیار پیچیده با بروز خلل و فرج در سیال که در اثر تاثیر گرانش زمین در بخش تحتانی پنجه جریان پدیدار می گردد. Benjamin محققى بود که در این زمینه مطالعات زیادی انجام داده است و براساس مطالعات وی، با انتخاب محدوده ای در جهت حرکت جریان که جلوی آن هنوز ساکن می باشد، با استفاده از تئوری ای بر پایه علم هیدرولیک، فلاکس جرمی و ممنتوم ورودی و خروجی به حجم کنترلی را طوری در نظر گرفت که محدوده آن، مرزهای فوقانی و تحتانی مخزن از بالا و پایین و صفحات قائم فرضی در بالادست و پایین دست می باشد. او نشان داد که محدوده حل این مساله به عمق جریان بستگی دارد. اگر فرض شود که فلاکس ورودی و خروجی به این حجم کنترل برابر باشد، این راه حل های مساله، به دو حالت خاص ختم می گردد: اولی این که عمق جریان صفر باشد و دومی این که جریان دقیقا نصف ارتفاع کل را تشکیل دهد. علیرغم اختلاطی که در آزمایش ها مشاهده می شود و اغتشاشی که به دلیل آشفتگی و تنش های لزجی به وجود می آید، به نظر می رسد که این تئوری بر پایه اصل بقای انرژی، نتایجی منطبق بر واقعیت را ارائه می دهد [۱].

آزمایش های انجام شده توسط Bousinesq روی جریان های ثقلی، نیز نشان می دهد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش بینی شده از طریق تئوری مساله بر پایه اصل بقای انرژی Benjamin مطابقت دارد [۱].

در مطالعات فوق به جهت انجام مقایسه های لازم، سرعت ها به فرم عدد فروید بیان شده اند.

$$F_H = \frac{U}{\sqrt{g'H}} \quad (1)$$

که در آن چگالی سیال چگال برابر ρ_2 و سیال با چگالی کمتر ρ_1 و U سرعت جریان در قسمت پیشانی سیال چگال و H عمق جریان سیال چگال و g' شتاب گرانشی کاهش یافته می باشد که برابر است با:

$$g' = g \times \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (2)$$

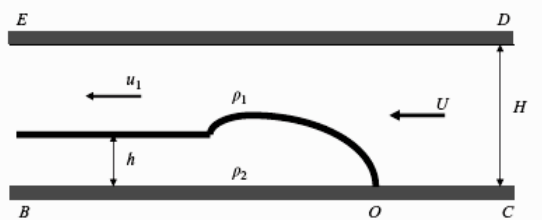
جریان های ثقلی زیادی به وسیله جریان های تبدالی در محیط محدود شده یا سایر عوامل در آزمایشگاه و یا در طبیعت تولید می شوند که نصف عمق سیال محیط را تشکیل نمی دهند. جریان هایی با عمق های خیلی کمتر از نصف عمق کل به آسانی در آزمایشگاه، با استفاده از سیال دولایه در محیط محدود، همان طوری که در شکل ۳ نشان داده می شود، به دست می آید. در این حالت ها، عدد رینولدز بزرگی به وجود می آید که اثرات ویسکوزیته در آن را ناچیز می نماید. این امر باعث می شود که سرعت جریان با صرف نظر کردن از اثرات ناچیز عواملی مثل اغتشاش و اختلاط، ثابت در نظر گرفته شود. Shin و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از اطلاعات پیشین که اشاره مختصری به برخی موارد آن در قسمت فوق شد و نیز مطالعات آزمایشگاهی، روابطی را جهت ارتباط جریان های مذکور با روابط پایه ای ارائه داد و جریان تبدالی در محیط محدود شده با سیال دولایه که جریان، بسیار کم عمق تر از نصف عمق کانال می باشد را بررسی کردند. روابط ارائه شده توسط این محققین تعمیمی بر کار Yih در سال ۱۹۶۵ می باشد که جریان را در حالت تمام عمق (سیال واحد) بر اساس اصل بقای انرژی در یک جریان تبدالی متقارن و محدود شده محاسبه نمود [۱].

تئوری مطالعه

این پدیده از اواخر دهه ۱۹۵۰ مورد توجه محققین قرار گرفت و کارهای آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی زیادی بر روی آن انجام شده است. دو تئوری Benjamin و Shin در این مطالعه برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روش تحلیلی مورد استفاده قرار می گیرد.

- تئوری Benjamin [۱]

تئوری Benjamin در سال ۱۹۶۸ حرکت دائمی جریان دوبعدی ثقلی حاکم در یک کانال مستطیلی را بررسی نموده است. جریان در بالادست و پایین دست دور به صورت هیدرواستاتیک فرض شده و نیز در داخل جریان هیچ گونه جریان نسبی ای وجود ندارد. بر اساس این تئوری، فرض می شود که یک جریان سیال چگال با چگالی ρ_2 ، سرعت ثابت U ، به سمت سیال با چگالی ρ_1 حرکت می کند. محدوده بررسی مساله به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



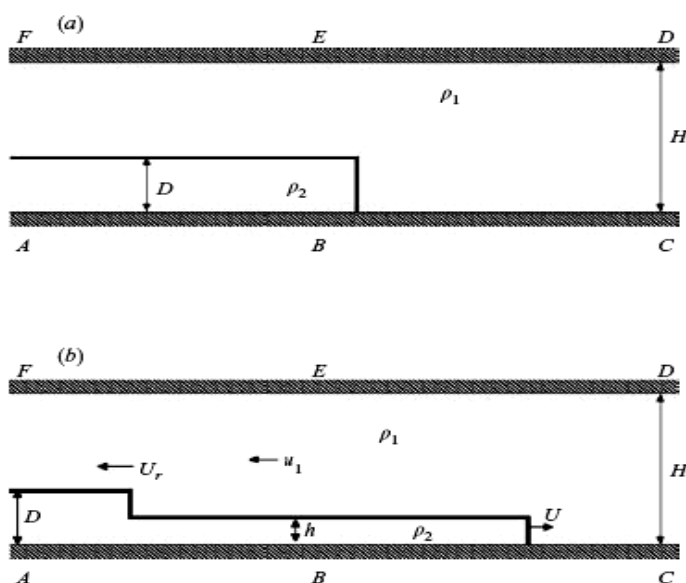
شکل ۲- محدوده بررسی جریان در تئوری Benjamin

سرعت جریان به صورت عدد بی بعد فروید و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می گردد. پارامترهای این رابطه مطابق شکل ۲، γ وزن مخصوص آب و g شتاب ثقل می باشد.

$$\frac{U^2}{gH} = 2 \times \frac{(1 - \gamma) \times h \times (H - h)^2}{\gamma \times H^3} \quad (۳)$$

- تئوری Shin [۱]

تحلیلی کامل بر روی جریان های تبدیلی حاصل از سیال دولایه، نیازمند تشریح کامل کل سیستم است که توسط Yin در سال ۱۹۶۵ آغاز شد. در این حالت، ممنتوم و انرژی، امکان این را دارند که در راستای سطح مشترک، توسط امواج درونی منتقل شوند و در نتیجه، مشخصات جریان در ناحیه پیشانی، با این فرضیات اصلاح می گردد. شکل ۳ محدوده بررسی این تئوری را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۳- محدوده بررسی جریان در تئوری Shin

با در نظر گرفتن اصل بقای انرژی و براساس مشخصات شکل ۳، سرعت جریان به صورت عدد بی بعد فروید و از رابطه (۴) حساب می شود.

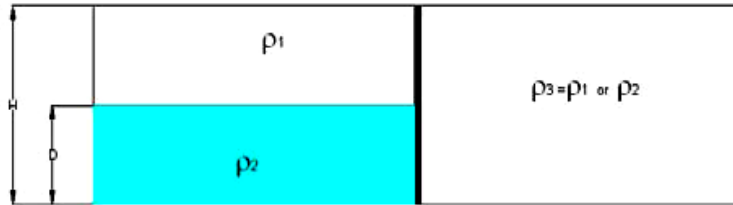
$$\frac{U^2}{gH} = 2 \times \frac{(\rho_2 - \rho_1) \times (D - h) \times (H - h)}{H(\rho_2 \times (H - h) + \rho_1 h)} \quad (۴)$$

هدف از این مطالعه برآورد سرعت افقی در پیشانی جریان سیال چگال با نسبت ارتفاع ها و چگالی های مختلف و مقایسه نتایج به دست آمده آزمایشگاهی با روابط تحلیلی، می باشد. وقتی دو سیال با چگالی های مختلف به صورت ناپایدار از لحاظ ثقلی، در کنار هم قرار می گیرند، به دلیل جریان تبدیلی، جریان سیال چگال پدید می آید. سیال چگال با سرعتی مشخص به سمت سیال با چگالی کمتر در کف حرکت می کند. به لحاظ تئوری، مشابه همین اتفاق در سطح برای حرکت سیال با چگالی کمتر به سمت سیال چگال در خلاف جهت، رخ می دهد.



مدل آزمایشگاهی و سیستم برداشت اطلاعات

مدل آزمایشگاهی شامل یک مخزن شیشه ای با مقطع مستطیلی شکل با طول $b=15\text{ cm}$ ، عرض $c=30\text{ cm}$ و طول محدود $a=70\text{ cm}$ مدرج با دقت میلیمتر در جهت افقی و قائم که یک دریچه شیشه ای کشویی بازشو در وسط طول آن تعبیه شده است، می باشد.

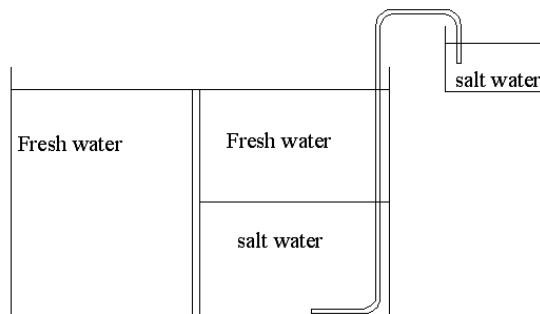


شکل ۴- نمائی از مدل آزمایشگاهی

آزمایش ها، براساس نسبت های مختلف ارتفاع سیال چگال به ارتفاع کل ثابت برابر $H=15\text{ cm}$ انجام شد. پارامترهای مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است. برای سیال سبک، از آب شیرین با چگالی 1001 Kg/m^3 که این چگالی با استفاده از چگالی سنج بدست آمده است، استفاده شد و از آب شور رنگی شده با پودر ماده پرمنگنات و با چگالی 1005 Kg/m^3 و 1008 Kg/m^3 به عنوان سیال چگال استفاده گردیده است و مقدار نمک مورد نیاز (M) برای ساختن سیال چگال با حجم مشخص (V)، در دمای $30\text{ }^\circ\text{C}$ ، از رابطه (۵) بدست آمده است. برای تزریق سیال چگال از تکنیک های آزمایشگاهی، مشابه شکل ۵ استفاده گردید.

$$\rho \left(\text{gr/cm}^3 \right) = 1 + 0.7 \times \frac{M \left(\text{gr} \right)}{V \left(\text{cm}^3 \right)} \quad (5)$$

لایه دیفیوز تشکیل شده بین سیال چگال و آب شیرین با استفاده علمی اصل تخلیه گزینشی، خارج شد. با خارج کردن دریچه کشویی میان دو سیال و استفاده از تکنیک پیشرفته عکسبرداری با فواصل زمانی ثابت 0.8 Sec ، عملیات ثبت پدیده جریان تبدیلی انجام گردید.

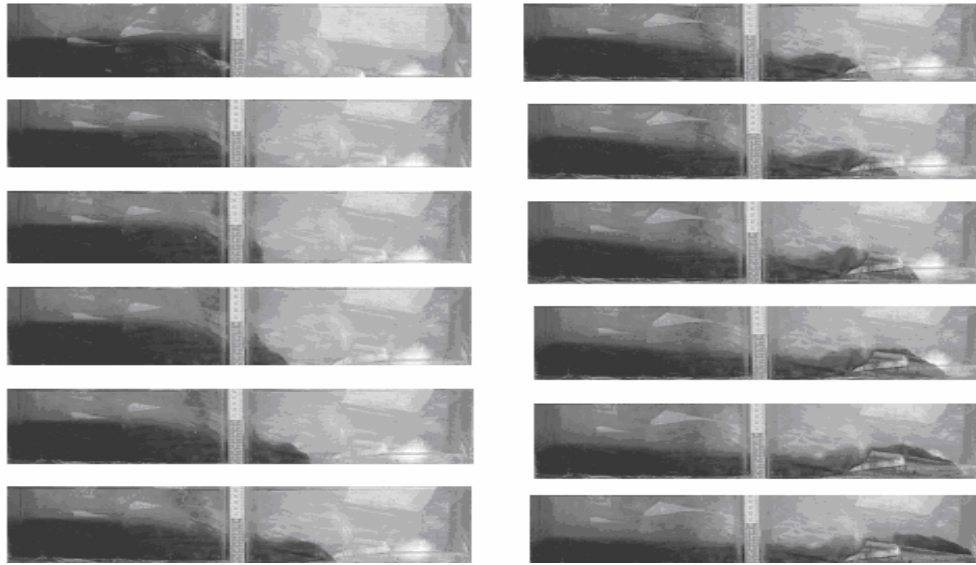


شکل ۵ - نمای شماتیک نحوه وارد کردن سیال چگال

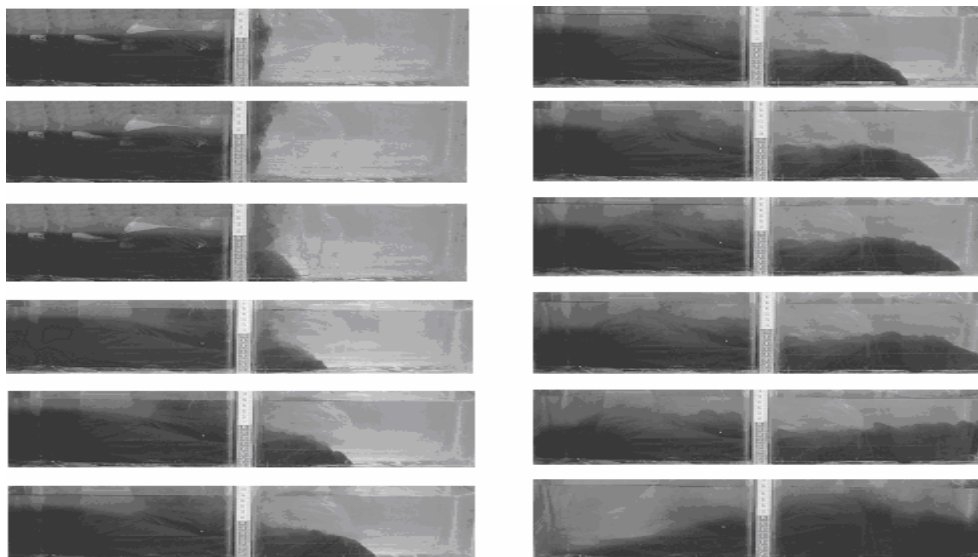
نتایج آزمایشگاهی

نتایج تصویری برداشت شده با تکنیک پیشرفته عکسبرداری با فواصل زمانی ثابت، مورد بررسی و پردازش قرار گرفت و سپس تحلیل منابع خطا و حذف برداشت های دارای خطای غیرمجاز انجام گردید. ۱۲ عکس متوالی از پدیده جریان تبدیلی برای نسبت های مختلف ارتفاع سیال چگال و با چگالی های

مختلف، با فواصل ثابت، به دست آمد. شکل ۶ نمونه هایی از این تصاویر را برای دو حالت (الف) $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ و $\frac{D}{H} = \frac{1}{2}$ و (ب) $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ و $\frac{D}{H} = \frac{2}{3}$ ، $H = 15\text{ cm}$ ارائه می دهد.



شکل ۶- الف: ۱۲ عکس متوالی با فاصله زمانی ثابت با مشخصات $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ، $\frac{D}{H} = \frac{1}{2}$ و $H = 15 \text{ cm}$



شکل ۶- ب: ۱۲ عکس متوالی با فاصله زمانی ثابت با مشخصات $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ، $\frac{D}{H} = \frac{2}{3}$ و $H = 15 \text{ cm}$

تحلیل و بررسی نتایج

۱۲ عکس متوالی پردازش شده برای تعیین سرعت جریان سیال چگال مورد استفاده قرار می گیرد. از ۲ عکس ابتدایی به دلیل تأثیرات باز شدن دریچه و آشفتگی پدید آمده صرف نظر می شود و در بقیه عکس ها ، با بزرگنمایی عکس های اصلی مقدار حرکت جریان از روی خط کش مدرج نصب شده بر روی مخزن و بر حسب cm خوانده می شود و سپس سرعت متوسط پیشانی جریان از رابطه (۶) به دست می آید.

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) \quad (6)$$

که در آن Δt برابر 0.8 ثانیه و Δx برابر فاصله جابه جا شده توسط پیشانی جریان در این فاصله زمانی می باشد. در نهایت از سرعت های به دست آمده از رابطه فوق، متوسط گیری شده، و این سرعت به عنوان سرعت پیشانی جریان در آن آزمایش در نظر گرفته می شود.



برای نمونه، در آزمایش با مشخصات $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ، $\frac{D}{H} = \frac{1}{2}$ و $H = 15 \text{ cm}$ نتایج حاصل از قرائت Δx بر اساس خط کش مدرج در جدول ۱ آمده است که با متوسط گیری خطی، سرعت متوسط آزمایشگاهی برابر $4.02 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ به دست می آید.

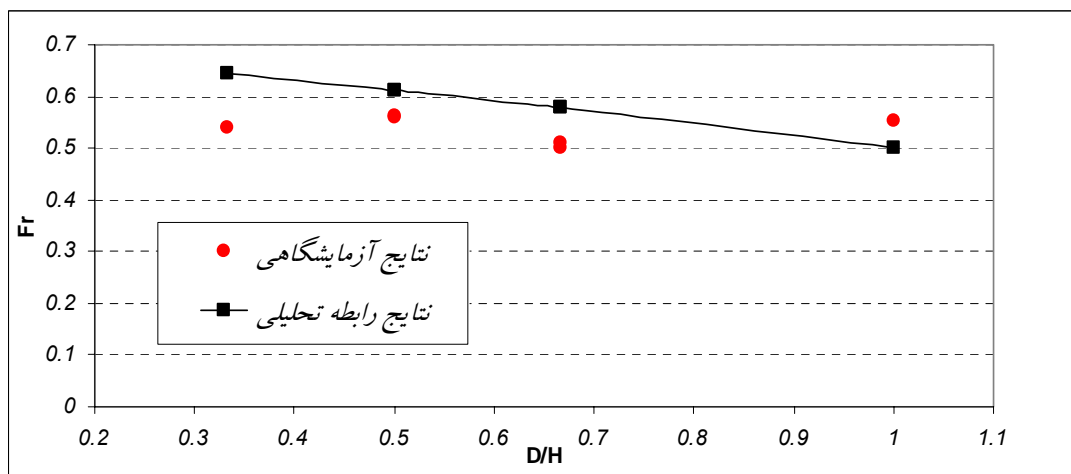
جدول ۱- نتایج قرائت Δx بر اساس خط کش مدرج در نمونه آزمایش $\rho = 1008 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ، $\frac{D}{H} = \frac{1}{2}$ و $H = 15 \text{ cm}$

فاصله زمانی بر حسب ثانیه	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
زمان از ابتدا بر حسب ثانیه	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8	8.8
فاصله قرائت شده بر حسب cm	1.4	3.7	6.9	10.1	13.8	17	20.2	23.4	26.5	29.8

با استفاده از تئوری *Shin* ، و رابطه تحلیلی (۴) مقدار سرعت پیشانی جریان به دست می آید و سپس مقایسه سرعت های به دست آمده از آزمایش و رابطه تحلیلی انجام می گیرد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، از عدد بی بعد سرعت به صورت عدد فرورد استفاده می گردد.

$$FD = \frac{U}{\sqrt{g'D}} \quad (7)$$

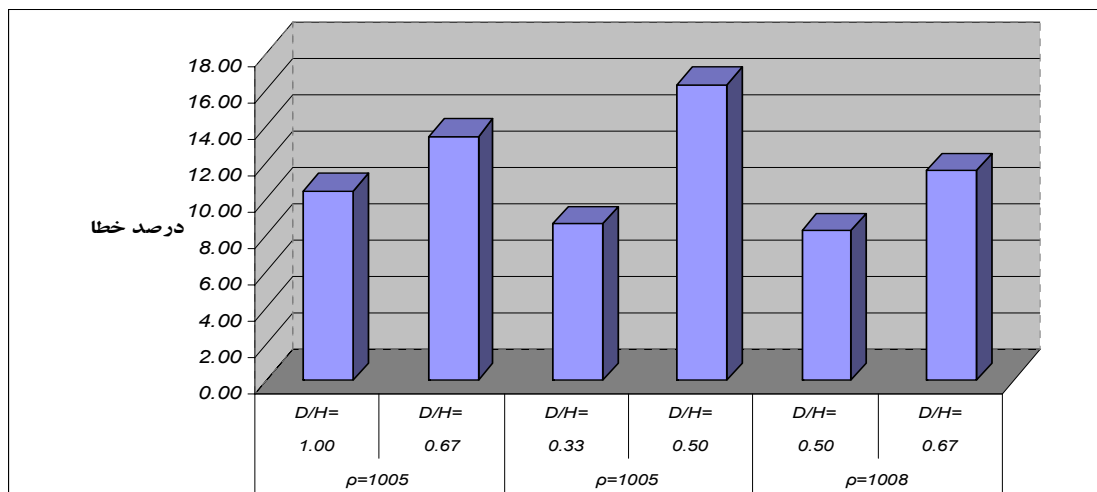
که در آن g' شتاب جاذبه کاهش یافته می باشد. برای نمونه، در حالت بررسی شده فوق، سرعت بی بعد پیشانی جریان بر اساس رابطه تئوری *Shin* ، 0.6129 به دست می آید، در حالی که سرعت بی بعد آزمایشگاهی 0.5624 می باشد که خطایی حدود 8% را دارد. نتایج این بررسی ها در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن عدد فرود بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای شش آزمایش صورت گرفته ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود توافق نسبی بین داده های آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد.



شکل ۷ - نمودار عدد فرود به D/H برای داده های آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی

شکل ۸، نمودار درصد خطای سرعت پیشانی جریان است که برای آزمایشات با چگالی مختلف و D/H های متفاوت ترسیم شده است. درصد خطای سرعت پیشانی جریان براساس داده های آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی مطابق زیر به دست می آید.

$$\text{ErrorRatio} = \frac{|U_{\text{Analytical}} - U_{\text{Experimental}}|}{U_{\text{Analytical}}} \times 100 \quad (8)$$



شکل ۸- نمودار درصد خطای سرعت پیشانی جریان برای آزمایشات مختلف

در رابطه با علت اختلاف مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر تئوری که در نمودار های فوق مشهود است، می توان به فرضیات ساده کننده تئوری، لایه دیفیوز تشکیل شده بین سیال دولایه، آشفتگی هایی پدید آمده در سیال در اثر باز کردن دریچه کشویی و ... را اشاره نمود.

نتیجه گیری

در این مطالعه، تحلیلی از حرکت جریان ثقلی ناشی از جریان تبدالی بررسی شد. این جریان ها، از جریان های مرتبط با چگالی سیال می باشد که در شرایط طبیعی و یا در مصنوعات ساخته بشر به وجود می آید. از آشنا ترین انواع جریان های ذکر شده، ریختن آب شیرین یک رودخانه به یک دریا یا اقیانوس با آب شور و یا جریان های پدید آمده در اتمسفر ناشی از جابه جایی هوای سرد و گرم و بسیاری موارد دیگر می باشد. تئوری استفاده شده در بررسی های تحلیلی، بر پایه کاری بود که *Shin* و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از اطلاعات پیشین و نیز مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند و روابط جریان تبدالی در محیط محدود شده با سیال دولایه که جریان، بسیار کم عمق تر از نصف عمق کانال می باشد را بررسی کردند. روابط ارائه شده توسط این محققین تعمیمی بر کار *Yih* در سال ۱۹۶۵ می باشد که جریان را در حالت تمام عمق (سیال واحد) بر اساس اصل بقای انرژی در یک جریان تبدالی متقارن و محدود شده محاسبه نمود.

در مطالعه حاضر، در یک آزمایش برای به وجود آوردن جریان تبدالی در محیط محدود شده، سیال هایی با چگالی های مختلف ابتدا به صورت ساکن در کنار هم قرار گرفت، به طوری که توسط یک مانع قائم (دریچه بازشوی کشویی) در مخزن آرمایش از هم جدا شده بودند. زمانی که دریچه باز شد، اختلاف فشارهای هیدرواستاتیک سبب شد که سیال چگال در خلاف جهت و در راستای مرز فوقانی مخزن حرکت نماید. عکسبرداری با فواصل زمانی ثابت 0.8 Sec با دوربین عکسبرداری دیجیتال برای ثبت پدیده جریان به وجود آمده، پس از باز شدن دریچه به کار رفت. ۱۲ عکس پشت سرهم پس از باز شدن دریچه کشویی ثبت گردید، از ۲ عکس ابتدائی به دلیل تاثیرات باز شدن دریچه و آشفتگی پدید آمده صرف نظر شد و بقیه برای تحلیل جریان به کار گرفته شد. بر اساس مشخصات جریان، سرعت جریان آزمایشگاهی و تئوری محاسبه شد و مقایسه بین نتایج انجام گرفت. بر طبق مشاهدات، سیال چگال از کف به سمت سیال با چگالی کمتر حرکت نموده و به صورت مشابه سیال با چگالی کمتر در جهت عکس در سطح به سمت سیال چگال جابه جا می گردد و سرعت جریان در این دو قسمت تقریباً مساوی و خلاف جهت هم می باشد. در این پدیده جریان به وجود آمده روی سطح تحتانی گسترده شده و اختلاط شدیدی بین قسمت پنجه جریان و سیال اطرافش رخ می دهد و جریان در قسمت بالای پیشانی دارای حرکت های چرخشی و آشفته بوده و بسیار پیچیده می باشد.

قدردانی

از راهنمایی های سودمند آقای دکتر میرمصدق جمالی عضو هیئت علمی و دانشیار دانشگاه صنعتی شریف و آقای مهندس فاضلی دانشجوی مقطع دکتری این دانشگاه، قدردانی می گردد. از آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف نیز که در انجام آزمایش های این مطالعه همکاری صمیمانه داشته است، کمال تشکر می شود.



مراجع

- 1) Shin.J.O , Dalziel.S.B , Linden. P. F, " Gravity currents produced by lock exchange", *J. Fluid Mech.* (2004), vol. 521, 1–34.
- 2) Turner.J.S , " buoyancy effects of fluids ", *Cambridge university press*, 1973
- 3) Necker.F. , Hartel.C , Kleiser.L , Meiburg.E , " High-resolution simulations of particle-driven gravity currents ", *International Journal of Multiphase Flow* (2002), 279–300
- 4) Mok.K.M. , Jeong.K.K , Yeh.H , " Experimental Observations of the Flow Structures at Gravity Current Front ", *International Conference on Estuaries and Coasts*, November 9-11, 2003, Hangzhou, China
- 5) Rabe.B , Smeed.D.A. , Dalziel.S.B. , Lane-Serff. G.F. , " Experimental studies of rotating exchange flow " , *Deep-Sea Research I* 54 (2007) , 269–291