

بررسی آزمایشگاهی اثر شرایط هیدرولیکی ورودی بر ساختار جریان‌های گل‌آلود

ماندانا ناجی‌ابهری^۱، مسعود قدسیان^{۲*}، بهار فیروزآبادی^۳

۱- دانشجوی دکتری هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۲۲

چکیده - رسوبات انباشته شده در مخازن سدها، گنجایش مخزن را بسیار کاهش می‌دهد. جریان‌های گل‌آلود در جابه‌جایی و رسوبات ریزدانه در مخازن سدها، نقش مهمی دارند. در این پژوهش، اثر تغییرات شرایط هیدرولیکی ورودی جریان گل‌آلود بر ویژگی‌هایی از پیشانی، بدنه و ساختارهای آشفتگی موجود در جریان گل‌آلود، بررسی آزمایشگاهی شده است. این ویژگی‌ها با یک دوربین فیلم‌برداری و یک دستگاه سرعت‌سنج صوتی، اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، سرعت پیشانی و بیشینه سرعت، در بدنه جریان افزایش می‌یابد. مقادیر مثبت تنش برشی رینولدز نزدیک کف نشان می‌دهد که در این بخش، پدیده حاکم، جاروبی یا بیرون‌رانی است در حالی که در فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، پدیده اندرکنش رو به بیرون یا اندرکنش رو به داخل، حاکم است.

واژگان کلیدی: عدد فرود چگالی ورودی، سرعت پیش‌روی جریان، تنش‌های رینولدز، سرعت بدنه جریان، سرعت میانگین جریان گل‌آلود، ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود.

۱- مقدمه
جریان‌های گل‌آلود^[۱]. این جریان‌ها به‌خاطر توانایی تخریب، حمل رسوب و رسوبگذاری، گسیختن کابل‌های^۶ زیر دریا و پراکندن آلودگی، در طبیعت اهمیت زیادی دارند^[۲]. جریان‌های گل‌آلود، بخشی از زنجیره جریان‌های گرانشی دارای رسوب و یکی از پیچیده‌ترین جریان‌های طبیعی است. این پیچیدگی به‌خاطر تغییر

جریان‌های گرانشی دارای ذرات، می‌تواند انواع گوناگونی از جریان‌ها باشد؛ مانند جریان‌های واریزه‌ای^۱، جریان‌های دانه‌ای^۲، بهمن‌های برفی^۳، جریان‌های آتشفشانی^۴ و جریان‌های

5- Turbidity current
6- Cable

1- Debris flow
2- Granular flow
3- Snow avalanches
4- Pyroclastic flow

نیروی محرک، درون‌آمیختگی در سطح مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، رسوبگذاری و فرسایش در بستر است. این جریان‌ها بیشتر در اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها پدیدار می‌شوند و رسوب را به آب‌های عمیق‌تر انتقال می‌دهند [۳]. بازدیدهای میدانی تصدیق می‌کند که جریان‌های گل‌آلود عامل اصلی انتقال رسوبات ریز ورودی به مخازن سدها است. برخی پیامدهای ته‌نشینی رسوبات در مخازن سدها عبارت است از: کاهش گنجایش مخزن، گرفتگی تخلیه‌کننده‌های پایینی و نامناسب بودن شرایط آب‌گیری [۴]. با توجه به اهمیت جریان گل‌آلود و کاربرد آن در طبیعت، تحقیقات گسترده‌ای درباره‌ی شناخت سازوکار حاکم بر این جریان انجام شده است. Altinakar و همکارانش (۱۹۹۰) اثر شیب بستر و دانه‌بندی رسوب را بر شکل، ارتفاع و سرعت پیشانی در جریان‌های گل‌آلود بررسی کردند و نتایج را در شرایط یکسان با جریان آب‌نمک مقایسه کردند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که در شیب یکسان، نرخ رشد ارتفاع پیشانی در جریان‌های گل‌آلود، سریع‌تر از جریان آب‌نمک است [۵]. Thomas و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از سرعت‌سنج ردیاب ذرات، پارامترهای پیشانی را در جریان آب‌نمک اندازه گرفتند [۶]. Li و همکاران (۲۰۱۲)، اثر تغییرات پهنای مقطع و حجم رسوب ورودی را بر تغییرات ضخامت پیشانی در جریان گل‌آلود به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۷]. Kneller و همکاران (۱۹۹۹) و Buckee و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از سرعت‌سنج لیزری، سرعت میانگین و تنش‌های رینولدز را برای جریان آب‌نمک اندازه‌گیری کردند [۸]. McCaffrey و همکاران (۲۰۰۳)، Gray و همکاران (۲۰۰۵) و Choux و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از سرعت‌سنج فراصوتی^۱، میانگین سرعت طولی جریان و تنش‌های رینولدز را در جریان گل‌آلود، بررسی کردند [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. Kneller و همکاران (۱۹۹۷)، ساختار سرعت، آشفتگی،

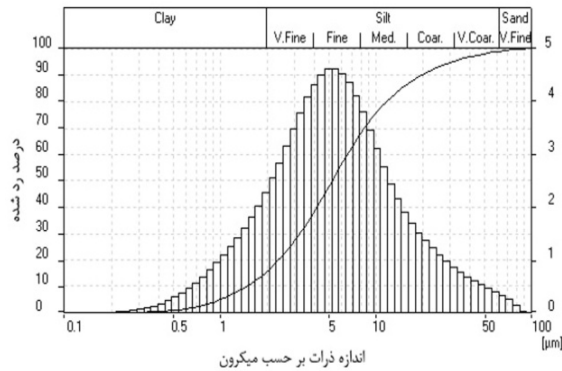
سازوکار جابه‌جایی رسوب و پدیدار شدن شکل‌های بستر را در آب‌های عمیق بررسی کردند [۱۳]. Keshkar و همکاران (۲۰۰۸)، اثر میزان بازشدگی دریچه ورودی بر پروفیل‌های سرعت را در جریان‌های گل‌آلود، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۱۴]. Firoozabadi و همکاران (۲۰۰۹)، پروفیل‌های سرعت، چگالی و ویژگی‌های آشفتگی در جریان‌های گل‌آلود را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند [۱۵]. Gerber و همکاران (۲۰۱۱)، سرعت میانگین و پارامترهای آشفتگی را در جریان آب‌نمک به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که بیشینه تنش رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی، نزدیک بستر و سطح مشترک دو سیال روی می‌دهد [۱۶]. با وجود این بررسی‌ها، پژوهش‌های اندکی برای بررسی اثر شرایط هیدرولیکی ورودی بر سرعت پیشانی، سرعت بدنه و ساختارهای آشفتگی موجود در جریان‌های گل‌آلود، انجام شده است. در این پژوهش، اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی و رینولدز ورودی بر روند تغییرات سرعت پیشانی جریان گل‌آلود، بررسی شده است. از نتایج تجربی، رابطه‌ای بی‌بعد برای به‌دست آوردن سرعت پیشانی جریان، استخراج شده است که همبستگی مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. همچنین اثر عدد فرود چگالی ورودی بر ویژگی‌های میانگین عمقی، پروفیل‌های سرعت بدنه جریان، تنش‌های عمودی و برشی رینولدز بررسی شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در کانالی با ۱۱ متر، پهنای ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شده است. شیب طولی کارنال ۰/۲۵ درصد است. جنس دیواره‌های آن، شیشه و کف آن، سنگ مرمر است. کانال در راستای طولی به دو بخش تقسیم شده است که با دریچه‌ای از جنس پلکسی‌گلاس از یکدیگر جدا می‌شوند. از بخش

1- Ultrasonic

۹ متر از ورودی جریان، برداشت شد. با تغییر مکان عمودی پروب‌ها، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مورد نظر به دست آمد. جدول ۱، شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۲) دانه‌بندی کائولین

جدول (۱) شرایط آزمایشگاهی

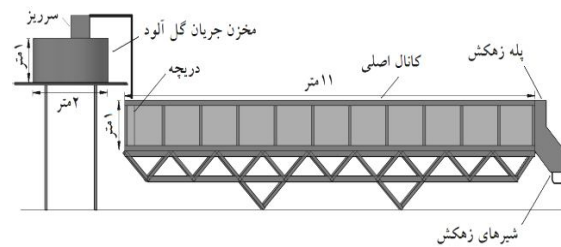
آزمایش	Fr_0	Re_0	T_f (°C)	T_i (°C)
۱	۲/۵۶	۲۷۷۸	۲۲	۲۲
۲	۱/۹۹	۲۷۷۸	۲۱	۲۱
۳	۱/۶۸	۲۷۷۸	۲۲	۲۲
۴	۳/۸۵	۴۱۶۷	۲۲	۲۲
۵	۲/۹۸	۴۱۶۷	۲۱	۲۱
۶	۲/۵۲	۴۱۶۷	۲۲	۲۲
۷	۵/۱۳	۵۵۵۶	۲۲	۲۲
۸	۳/۹۸	۵۵۵۶	۲۱	۲۱
۹	۳/۳۶	۵۵۵۶	۲۲	۲۲

در این جدول، Re_0 ، Fr_0 ، T_f و T_i به ترتیب نشان‌دهنده عدد رینولدز ورودی، عدد فرود چگالی ورودی، دمای سیال گل آلود و دمای سیال محیطی است. عدد رینولدز ورودی و عدد فرود چگالی ورودی با روابط زیر به دست می‌آید:

$$Re_0 = \frac{U_0 h_0}{\nu} \quad (1)$$

$$Fr_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g_0' h_0}} \quad (2)$$

کوچک‌تر به عنوان مخزن سیال گل آلود استفاده می‌شود. ابتدای آزمایش، دریچه باز می‌شود و سیال گل آلود از زیر آب ساکن وارد کانال می‌شود. جهت تأمین جریان گل آلود هنگام آزمایش، مخزنی استوانه‌ای با حجم ۳ متر مکعب در بالادست گذاشته شد. برای جلوگیری از تغییرات هد و دبی هنگام آزمایش، یک مخزن کوچک‌تر داخل مخزن استوانه‌ای گذاشته شد. جریان گل آلود از مخزن استوانه‌ای به داخل مخزن کوچک‌تر پمپ می‌شد؛ بنابراین تا پایان آزمایش، ارتفاع جریان گل آلود در مخزن کوچک‌تر ثابت بود و دبی خروجی تغییری نداشت. برای جلوگیری از برگشت جریان گل آلود، پله‌ای با ۲۰ شیر کوچک زهکش، انتهای کانال گذاشته شد. شکل ۱، نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) نمایی از کانال آزمایشگاهی

از کائولین به عنوان رسوبات معلق موجود در جریان گل آلود استفاده شده است. کائولین استفاده شده، چگالی ویژه ۲/۶۵ و میانگین قطر ۵ میکرون دارد. دانه‌بندی کائولین با دستگاه لیزری انجام شد. نمونه‌ای از پخش دانه‌بندی کائولین در شکل ۲ دیده می‌شود. شکل ۲ نشان می‌دهد که نمونه کائولین استفاده شده در آزمایش‌ها، دامنه‌ی گسترده‌ای از قطر ذرات دارد.

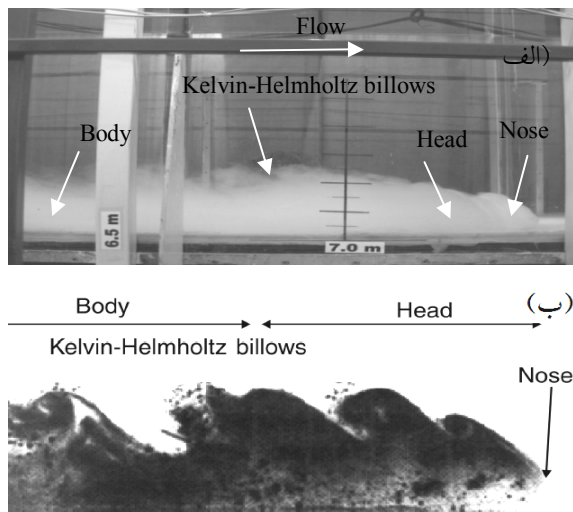
سرعت پیشانی جریان گل آلود با دوربین فیلم‌برداری Canon مدل Power Shot SD790IS به دست آمد. اندازه‌گیری سرعت در بدنه جریان گل آلود با دو سرعت‌سنج صوتی انجام شد که با فاصله یک متر از یکدیگر قرار داشتند. سرعت‌ها در خط مرکزی کانال و در فواصل ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و

$$\frac{U_f}{U_b} = \phi Re_0^\alpha Fr_0^\beta \quad (5)$$

در اینجا θ ، α و A ثابت‌های تجربی است.

۴- اثر شرایط هیدرولیکی ورودی بر پیشانی

۴-۱- اثر عدد فرود چگالی ورودی بر سرعت پیشانی
بخش‌های جریان گرانشی عبارت است از: پیشانی^۱، بدنه^۲ و دم^۳. ساختار دینامیکی پیشانی در جریان‌های گرانشی اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا این بخش از جریان مانند یک شرط مرزی برای کل جریان است [۱۷]. بررسی پیشانی جریان از دیدگاه فرایندهای فرسایش و رسوبگذاری نیز اهمیت دارد زیرا بیشترین فرسایش در جریان‌های گرانشی به وسیله‌ی پیشانی جریان انجام می‌شود. در بخش جلوی پیشانی، نقطه‌ای به نام دماغه^۴ وجود دارد؛ این بخش به خاطر شرط نبود لغزش در مرز پایین جریان و مقاومت اصطکاکی در مرز بالایی جریان شکل می‌گیرد [۱۸]. شکل ۳، بخش‌های جریان گل‌آلود را نشان می‌دهد.



شکل (۳) بخش‌های جریان گل‌آلود الف) این پژوهش ب) مرجع شماره ۱۹

- 1- Head
- 2- Body
- 3- Tail
- 4- Nose

U_0 سرعت متوسط ورودی جریان گل‌آلود به داخل سیال محیطی، ν لزجت سینماتیکی جریان گل‌آلود، h_0 ارتفاع بازشدگی ورودی و g'_0 گرانش کاهش یافته است که این‌گونه تعریف می‌شود: $g'_0 = g \frac{\rho_{mix} - \rho_w}{\rho_w}$ چگالی مخلوط ورودی، ρ_w چگالی آب صاف و g شتاب گرانش زمین است.

۳- ارزیابی ابعادی و رابطه‌ای برای تعیین سرعت پیشانی

متغیرهای مؤثر بر سرعت پیشانی جریان گل‌آلود به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$U_f = f(U_0, \rho_{mix}, \rho_w, g, \mu, h_0, \theta, b_0) \quad (3)$$

b_0 پهنای بازشدگی ورودی، μ لزجت دینامیکی جریان گل‌آلود و θ شیب بستر است. با استفاده از قضیه باکینگهام، ۶ پارامتر بدون بعد به دست می‌آید.

$$\left(\begin{array}{l} \pi_1 = \theta, \pi_2 = \frac{h_0}{b_0}, \pi_3 = \frac{\rho_{mix} - \rho_w}{\rho_w}, \pi_4 = \frac{U_f}{U_0}, \\ \pi_5 = \frac{U_0^2}{gh_0}, \pi_6 = \frac{\rho_{mix} U_0 h_0}{\mu} \end{array} \right)$$

با ترکیب پارامترهای بی‌بعد به دست آمده می‌توان رابطه زیر را برای محاسبه سرعت پیشانی جریان گل‌آلود ارائه داد:

$$\frac{U_f}{U_b} = f\left(\frac{U_0}{\sqrt{g_0 h_0}}, \theta, \frac{h_0}{b_0}, \frac{\rho_{mix} U_0 h_0}{\mu}\right) \quad (4)$$

U_b سرعت شناوری است که به صورت $U_b = \sqrt{g h_0}$ تعریف می‌شود و g' براساس بیشینه و کمینه چگالی مخلوط ورودی، محاسبه شده است. با توجه به شرایط و محدودیت‌های آزمایشگاهی، در این پژوهش پارامترهای بی‌بعد، $\frac{h_0}{b_0} = 0.67$ و $\theta = 0.25$ و تنها اثر تغییر عددهای رینولدز و فرود ورودی، بررسی شده است. رابطه پایانی برای به دست آوردن سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در شرایط تثبیت شده به صورت زیر است:

ثابت فرض کرد. این تغییرات ناگهانی در سرعت پیش روی جریان گل آلود، ناشی از تغییرات نیروهای وارد بر آن است. پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی Alavian و Tsihrintzis (۱۹۹۶) نشان می‌دهد جریان چگال، به دنبال تعادل چهار نیروی گرانش، شناوری، اینرسی و اصطکاک، گسترش طولی پیدا می‌کند. آن‌ها این نیروها را در امتداد بستر به صورت زیر مشخص کردند [۲۰]:

$$F_g \sim \Delta \rho g b h l \sin \theta \quad (۶)$$

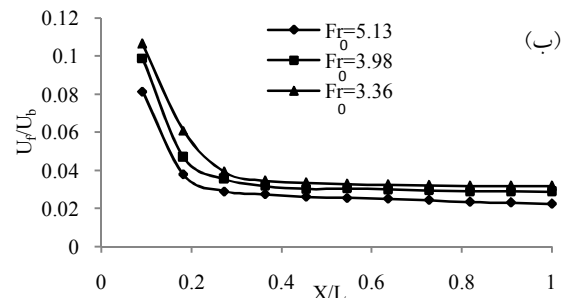
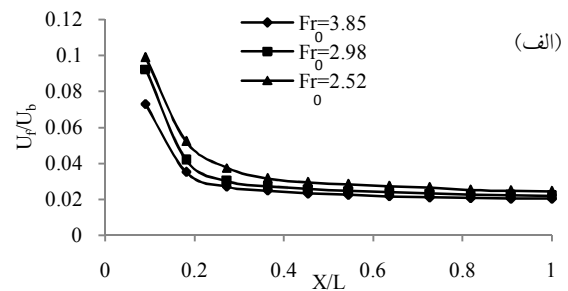
$$F_{bx} \sim \Delta \rho g b h^2 \cos \theta \quad (۷)$$

$$F_{ix} \sim \frac{\rho b h l^2}{t^2} \quad (۸)$$

$$F_{dx} \sim \frac{\rho v b l^2}{h t} \quad (۹)$$

F_g نیروی گرانش، F_{bx} نیروی شناوری، F_{ix} نیروی اینرسی، F_{dx} نیروی اصطکاک، $\Delta \rho$ اختلاف چگالی بین جریان چگال و سیال محیطی، h ارتفاع جریان، b عرض جریان، t زمان سپری شده، l طول پیش روی از منبع، v لزجت سینماتیکی جریان چگال و θ شیب بستر است. با توجه به شیب ملایم کانال ($h > l \tan \theta$) و شرایط فرا بحرانی جریان گل آلود در محل ورودی، در بازه‌ی $0 < \frac{x}{L} < 0.3$ ، نیروهای رانش، نیروی اینرسی و نیروی گرانش است و نیروی اصطکاک ناچیز است. با دور شدن از ورودی کانال، تشکیل پرش هیدرولیکی و تبادل مومتمی که جریان چگال با سیال ساکن محیطی انجام می‌دهد، از نیروی رانش کاسته شده و سرانجام تنها نیروی رانش، نیروی گرانش است که باعث حرکت جریان چگال می‌شود. بنابراین، در آغاز، به خاطر وجود نیروی رانش بزرگ‌تر، سیال گل آلود شتاب و سرعت می‌گیرد و در بخش‌های دورتر از ورودی، بازه $0 < \frac{x}{L} < 0.3$ ، از شتاب و سرعت جریان گل آلود، کاسته خواهد شد.

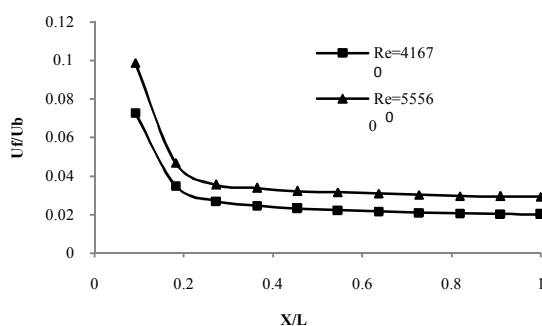
تنش‌های برشی لزج در مرز بالایی پیشانی، گردابه‌های عرضی و ناپایداری کلون هلمهلتز^۱ را پدید می‌آورند. در شکل ۳، ناپایداری کلون هلمهلتز نشان داده شده است. با توجه به اهمیت پیشانی در جریان‌های گرانشی، در این پژوهش تلاش شده اثر پارامترهای گوناگون بر رفتار پیشانی جریان گل آلود، بررسی شود. شکل ۴، اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر سرعت پیشانی را نشان می‌دهد.



شکل (۴) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر سرعت پیشانی:

(الف) $Re_0 = 5556$ و (ب) $Re_0 = 4167$

در این شکل، X فاصله تا ورودی جریان گل آلود، L طول کانال و U_f سرعت پیشانی جریان است. در همه‌ی آزمایش‌ها، ارتفاع بازشدگی ورودی، ثابت برابر ۴ سانتی‌متر نگه داشته شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که سرعت پیشانی جریان گل آلود در طول کانال، به صورت نمایی تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که بیشترین افت سرعت پیشانی در بازه $0 < \frac{x}{L} < 0.3$ اتفاق می‌افتد و در بازه $0.3 < \frac{x}{L} < 1$ تغییرات سرعت پیشانی بسیار ناچیز است و می‌توان حرکت آن را



شکل (۵) اثر تغییرات عدد رینولدز و ورودی بر سرعت پیشانی

این شکل نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات سرعت پیشانی جریان گل‌آلود به دنبال تغییر عدد رینولدز ورودی و عدد فرود چگالی ورودی، یکسان است. با تغییرات عدد رینولدز ورودی، بیشترین افت سرعت پیشانی، در بازه $0.3 < \frac{X}{L} < 1$ اتفاق می‌افتد و در بازه $0.3 < \frac{X}{L} < 1$ تغییرات سرعت پیشانی بسیار ناچیز است و می‌توان حرکت آن را مستقل از مسافت طی شده فرض کرد؛ این شکل نشان می‌دهد که گرانش کاهش یافته نیروی اصطکاکی را جبران می‌کند. همچنین به دنبال افزایش عدد رینولدز ورودی، نیروی اینرسی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش عدد رینولدز ورودی، سرعت پیشانی جریان گل‌آلود نیز افزایش یابد.

بنابراین ثابت‌های تجربی α ، β و φ در رابطه ۵ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روش کمینه مربع‌های خطا، به صورت زیر تعیین می‌شوند:

جدول (۲) ثابت‌های تجربی رابطه ۵

φ	α	β	R^2
$9/18 \times 10^{-6}$	0/981	-0/264	0/85

ضریب همبستگی R^2 ، نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول مقادیر به دست آمده از آزمایش و مقادیر محاسبه شده است. پژوهشگران دیگری مانند Middleton (۱۹۶۶) و Turner (۱۹۷۹)، معادله زیر را برای تعیین سرعت پیشانی

سرعت پیشانی جریان گل‌آلود، به اندازه‌ی ثابتی میل می‌کند که نشان از تغییر نکردن نیروهای رانش و مقاوم دارد و به حالتی می‌رسد که به آن جریان تثبیت‌شده^۱ گویند.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود چگالی ورودی، سرعت پیشانی جریان گل‌آلود کاهش می‌یابد. عدد فرود چگالی ورودی به دنبال کاهش اختلاف چگالی جریان گل‌آلود با سیال محیطی، افزایش می‌یابد و بنابراین نیروی گرانش کاهش می‌یابد که یکی از پیامدهای آن، کاهش سرعت پیشانی جریان است.

۴-۲- اثر عدد رینولدز ورودی بر سرعت پیشانی

میزان اختلاط در پیشانی جریان‌های گرانشی، تابعی از عدد رینولدز جریان است. اگرچه عدد رینولدز کاهش یابد میزان اختلاط در پیشانی جریان گرانشی نیز کاهش خواهد یافت [۲۱ و ۲۲]. در جریان‌هایی با اعداد رینولدز بالا ($Re > 2000$) که میدان جریان کاملاً آشفته است، درون‌آمیختگی در فصل مشترک جریان چگال و سیال محیطی، به دنبال ناپایداری‌های دومین، مانند شکست گردابه‌های کلونین- هلمهولتز، اتفاق می‌افتد. اما در جریان‌هایی با اعداد رینولدز پایین ($Re < 2000$) که همه پدیده‌های آشفته‌گی اتفاق نمی‌افتد، درون‌آمیختگی به دنبال ناپایداری دومین، نسبت به آثار لزجت، اهمیت کمتری خواهد داشت [۱۸]. در همه‌ی آزمایش‌های این پژوهش، عدد رینولدز ورودی بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ بوده و بنابراین در سازوکار حاکم بر پیشانی جریان، ناپایداری‌های ثانویه بسیار مهم‌تر از آثار لزجت است. شکل ۵ نشان‌دهنده روند تغییرات سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در پی تغییر عدد رینولدز ورودی است. در این شکل، اندازه عدد فرود چگالی ورودی، ۳/۸۵ است.

۵- اثر عدد فرود چگالی ورودی برویگی های

میانگین عمقی جریان گل آلود

بدنه جریان چگال یکی از بخش های مهم آن است. سرعت در این بخش، همیشگی است و جریان با حرکت به سمت پایین دست، با سیال محیطی در مرز بالایی درون آمیخته می شود. بدنه جریان نقش مهمی در درون آمیختگی رسوبات دارد. اگر سرعت در بدنه جریان افزایش یابد، تنش های رینولدز نیز افزایش می یابد و نرخ فرسایش رسوبات بستر بیشتر می شود [۱۳]. معمولاً تشخیص فصل مشترک جریان چگال و سیال محیطی در بخش بدنه آسان نیست؛ بنابراین لازم است با اندازه گیری پروفیل سرعت، ارتفاع متوسط لایه ای (\bar{h}) و سرعت متوسط لایه ای (\bar{U})، محاسبه شود [۲۵ و ۲۶]:

$$\bar{h} = \frac{\int_0^{\delta} U dz}{U} \quad (11)$$

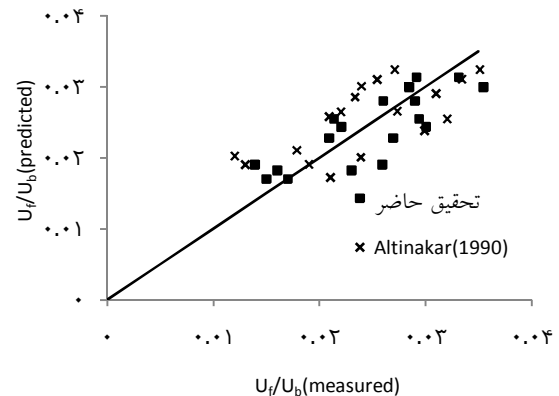
$$\bar{U} = \frac{\int_0^{\delta} U^2 dz}{\int_0^{\delta} U dz} \quad (12)$$

U سرعت جریان در نقاط محلی به فاصله z از بستر و δ ارتفاع جایی است که U در آن صفر است. درون آمیختگی در فصل مشترک جریان چگال و سیال محیطی سبب می شود که سیال چگال، سیال محیطی را داخل خود بکشد که این پدیده، نتیجه حرکت نسبی دو سیال کنار یکدیگر است. تغییرات ارتفاع میانگین جریان گل آلود (شکل ۷) نشان می دهد که نرخ افزایش ارتفاع میانگین جریان گل آلود در ابتدای مسیر با سرعت بیشتری رشد می کند زیرا هنگام ورود جریان گل آلود به داخل سیال محیطی، مرز مشترک دو سیال ناپایدارتر است و میزان درون آمیختگی بیشتر خواهد بود؛ اما به دنبال شکل گیری پرش هیدرولیکی و تغییر رژیم جریان از حالت فرابحرانی به زیرحرائی، کم کم شرایط تثبیت می شود؛ در این حالت، نیروی گرانش، تنش برشی بستر، نیروی فشار و مومنتوم ناشی از درون آمیختگی، در تعادل است. در این شرایط، افزایش ارتفاع

جریان گل آلود روی شیب های کم ارائه کردند [۲۳ و ۲۴]:

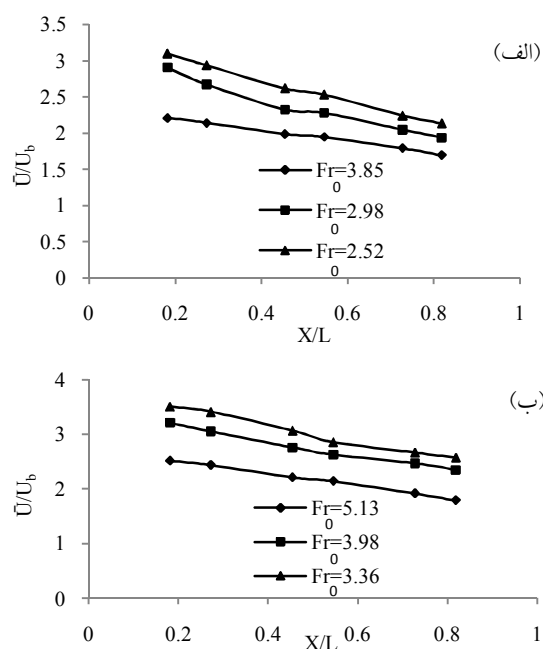
$$U_f = 0.75 \sqrt{g_0 h_f} \quad (10)$$

h_f ارتفاع پیشانی جریان گل آلود است. Altinakar و همکاران (۱۹۹۰) پیشنهاد کردند که در این رابطه، ضریب 0.75 به جای ضریب 0.75 استفاده شود. مشاهدات آن ها نشان داد که در جریان های گل آلود، سرعت پیشانی، نزدیک به ثابت است. رابطه به دست آمده در این پژوهش و نتایج Altinakar و همکاران (۱۹۹۰)، گویای آن است که پس از کاهش چشم گیر نیروی اینرسی، سرعت پیشانی جریان در سرتاسر طول کانال، ثابت است و تغییرات نسبی آن کمتر از ۱ درصد خواهد بود. شکل ۶ نشان می دهد که رابطه ۵، هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی Altinakar و همکاران (۱۹۹۰) دارد.



شکل (۶) مقایسه داده های آزمایشگاهی و روابط به دست آمده

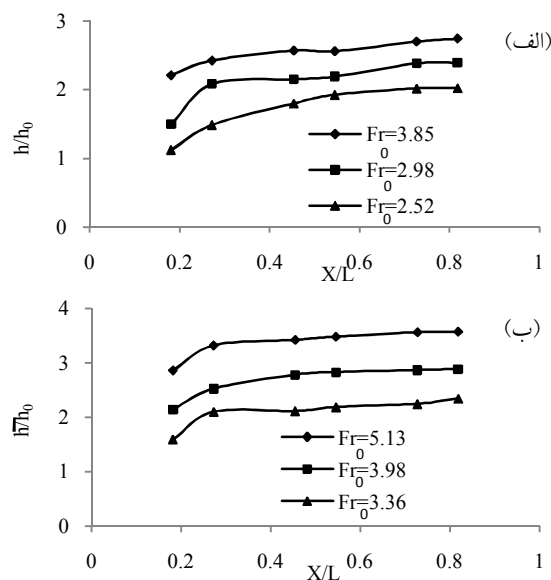
رابطه ۵ نشان می دهد که سرعت پیشانی جریان گل آلود با عدد رینولدز ورودی، رابطه مستقیم و با عدد فرود چگالی ورودی، رابطه عکس دارد (شکل های ۴ و ۵). توان های به دست آمده برای عدد رینولدز و فرود چگالی ورودی نشان می دهد که تغییرات عدد رینولدز ورودی بر سرعت پیشانی جریان گل آلود، موثرتر از تغییرات عدد فرود چگالی ورودی است.



شکل ۸) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر سرعت متوسط جریان گل‌آلود: الف) $Re_0 = 4167$ و ب) $Re_0 = 5556$

در این شکل، سرعت میانگین جریان گل‌آلود، هنگام حرکت در طول کاریز، کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دنبال کاهش نیروهای اینرسی و گرانش در نتیجه ته‌نشینی ذرات موجود در جریان و خروج آن‌ها از جریان اتفاق بیفتد. همچنین درون‌آمیختگی در سطح مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی از اختلاف چگالی دو سیال کم کرده و نیروی شناوری نیز کاهش می‌یابد. مقایسه شکل‌های ۸-الف و ۸-ب نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز ورودی، سرعت میانگین جریان گل‌آلود افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش عدد رینولدز، آشفتگی پدید آمده به وسیله‌ی جریان، برای حفظ ذرات رسوب به صورت معلق، افزایش می‌یابد و به دنبال آن، کاهش اختلاف چگالی ناشی از وجود ذرات معلق که محرک اصلی رانش در این جریان‌ها است، در طول مسیر، افت کمتری خواهد داشت؛ افزون بر این، شکل ۸ نشان می‌دهد که در شرایطی که رینولدز ورودی جریان ثابت باشد، با افزایش عدد فرود

میانگین جریان گل‌آلود، و یا تغییرات شیب در طول، ناچیز است. مقایسه نمودارهای ۷-الف و ۷-ب نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز ورودی، ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود، افزایش می‌یابد زیرا با افزایش عدد رینولدز ورودی، میزان درون‌آمیختگی در سطح مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی افزایش می‌یابد و از آن‌جاکه نرخ درون‌آمیختگی در سطح مشترک دو سیال، در افزایش ضخامت جریان، نقش مستقیم دارد، با افزایش عدد رینولدز ورودی، ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود نیز افزایش می‌یابد. افزون بر این، شکل ۷ نشان می‌دهد که در شرایطی که عدد رینولدز ورودی ثابت باشد، با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود نیز کاهش می‌یابد؛ زیرا با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، اثر گرانش و گرانروی، افزایش یافته و مرز مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، پایدارتر می‌شود. بنابراین میزان درون‌آمیختگی در مرز مشترک و ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود، کاهش خواهد یافت. شکل ۸، نشان‌دهنده تغییرات سرعت میانگین جریان گل‌آلود در ایستگاه‌های اندازه‌گیری است.



شکل ۷) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر ارتفاع میانگین جریان گل‌آلود: الف) $Re_0 = 4167$ و ب) $Re_0 = 5556$

چگالی ورودی، سرعت میانگین جریان گل آلود کاهش می‌یابد که نتیجه کاهش اختلاف چگالی جریان گل آلود و سیال محیطی است. لازم است گفته شود که شیب کاهش سرعت میانگین جریان گل آلود با پیش‌روی در طول کانال، ملایم‌تر می‌شود اما هیچ‌گاه به صفر نخواهد رسید زیرا جریان گل آلود نوعی جریان غیر پایستار است [۲۷].

۶- اثر عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت بدنه جریان گل آلود

۶- اثر عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت بدنه جریان گل آلود

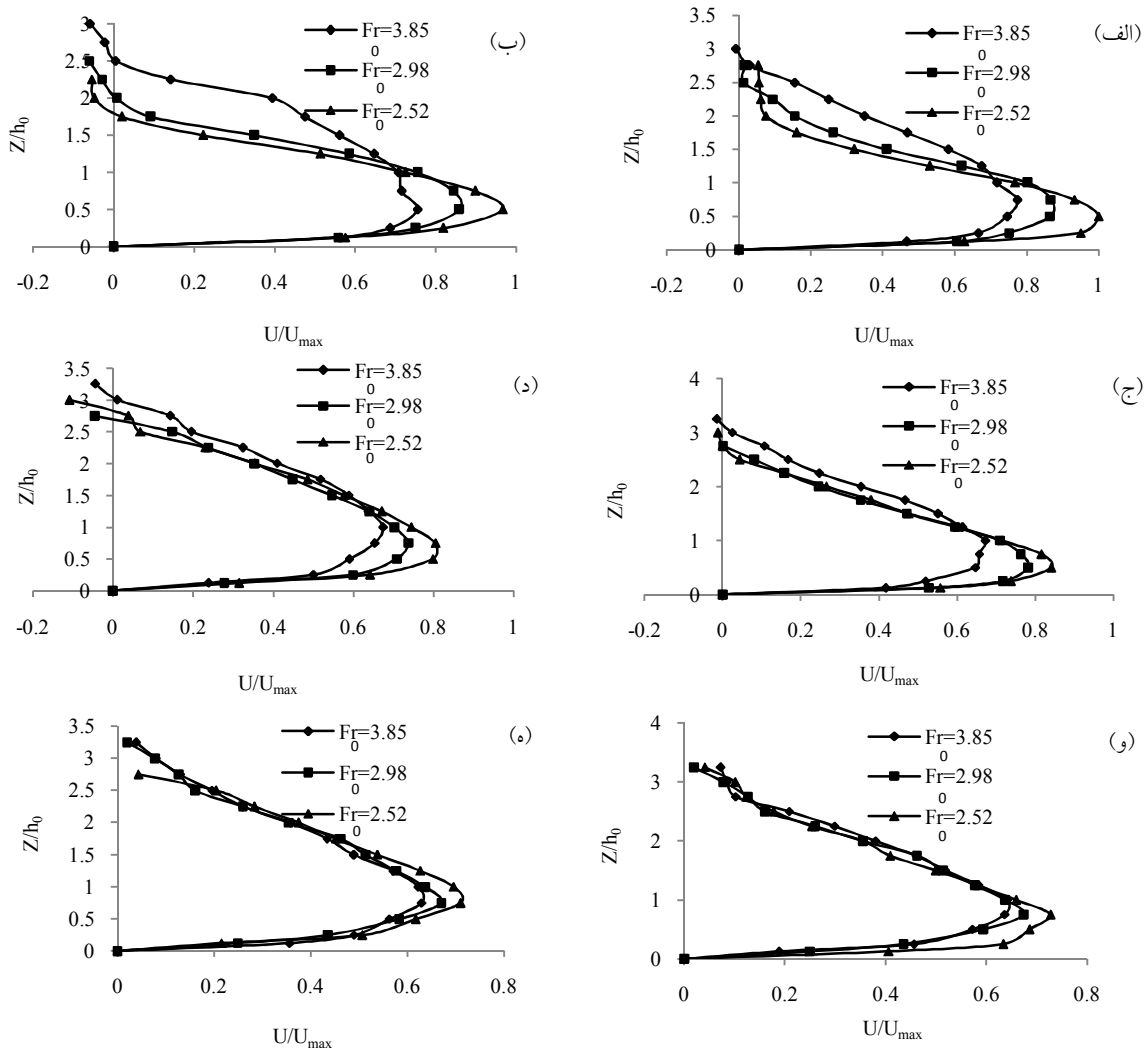
پروفیل سرعت در بدنه جریان‌های گل آلود را می‌توان با جت‌های دیواره‌ای مقایسه کرد. در کل، پروفیل سرعت در بدنه جریان‌های گل آلود به‌وسیله‌ی خط سرعت بیشینه به دو بخش دیواره^۱ و بخش جت^۲ تقسیم می‌شود. در بخش دیواره، آشفتگی در دیواره پدید می‌آید و ممکن است درون‌آمیختگی رسوبات نیز اتفاق بیفتد. در این بخش، شیب سرعت، مثبت است و ارتفاع این بخش کمتر از نصف ارتفاع بخش جت است. در بخش جت، آشفتگی در نتیجه اصطکاک و درون‌آمیختگی سیال محیطی اتفاق می‌افتد. در این بخش شیب سرعت، منفی خواهد بود [۲۸]. لازم است گفته شود که در ادامه برای بررسی اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر پارامترهای گوناگون در این پژوهش، عدد رینولدز ورودی، ثابت، ۴۱۶۷ در نظر گرفته شده است. شکل ۹، اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت جریان گل آلود در طول کانال را نشان می‌دهد. در این شکل، اندازه‌های سرعت نسبت به سرعت بیشینه در طول مسیر، بی‌بعد شده است. شکل ۹ نشان می‌دهد که با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، سرعت جریان گل آلود افزایش می‌یابد زیرا با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، چگالی حجمی

۷- اثر عدد فرود چگالی ورودی بر آشفتگی بدنه

۷-۱- تنش عمودی رینولدز

تنش‌های رینولدز بیانگر این واقعیت است که بخش نوسانی جریان، در اندرکنش با بخش متوسط جریان است و نیرویی برابر $-\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_i}$ بر واحد جرم به جریان متوسط وارد می‌کند [۲۹]. شکل ۱۰، اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر تنش عمودی رینولدز در طول کانال را نشان می‌دهد. در این شکل، تنش عمودی رینولدز نسبت به بیشینه سرعت در شرایط گوناگون فرود ورودی، بی‌بعد شده است.

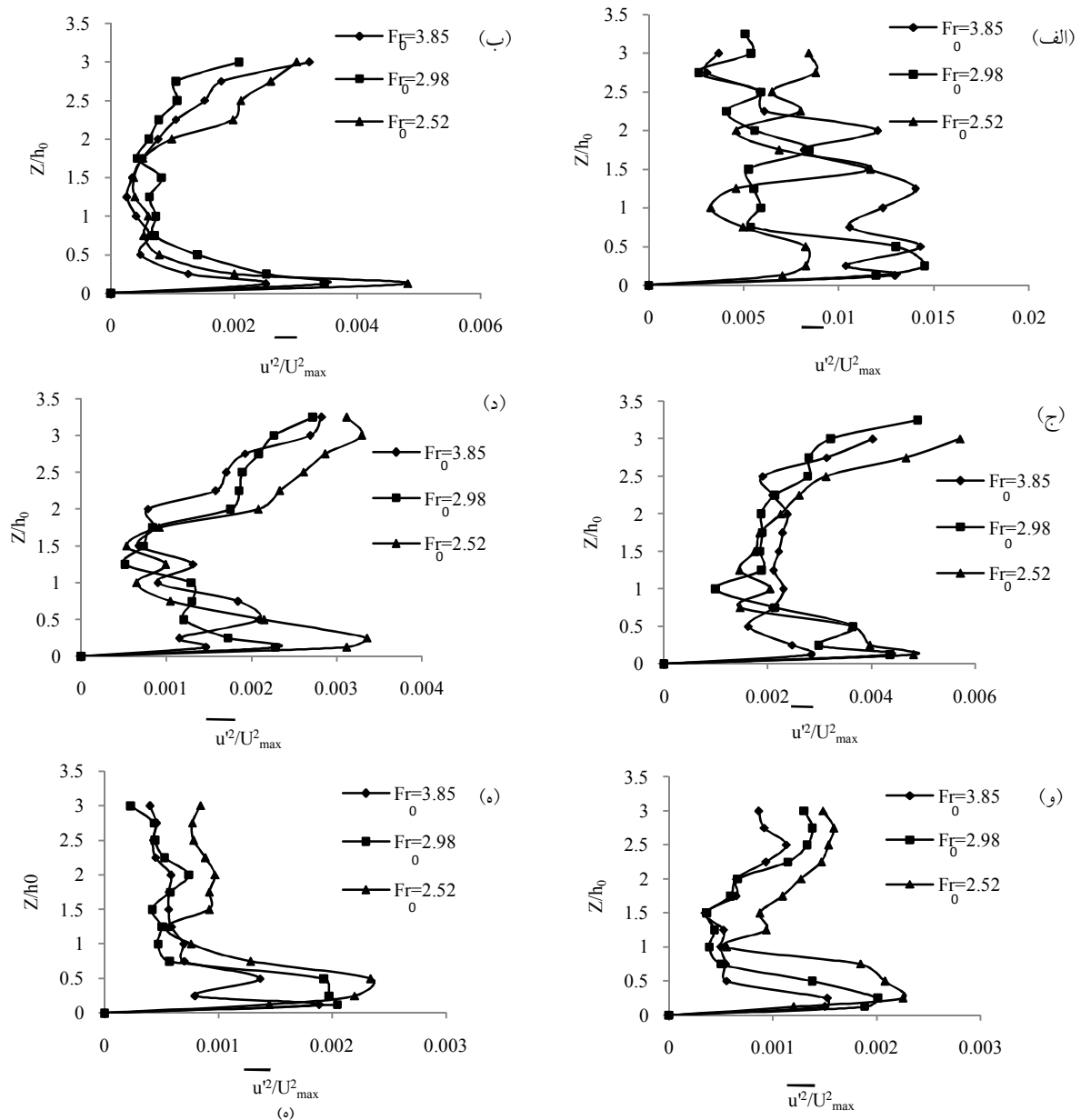
1- Wall region
2- Jet region



شکل (۹) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت: الف) $x/L = 0.18$ ب) $x/L = 0.27$ ج) $x/L = 0.45$ د) $x/L = 0.54$ و) $x/L = 0.73$ ه) $x/L = 0.82$

ب تا ۱۰-، نشان می‌دهد که تغییرات تنش عمودی رینولدز در عمق جریان، روند ویژه‌ای دارد؛ به گونه‌ای که بیشینه اندازه‌های تنش عمودی، نزدیک بستر و فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی و اندازه کمینه آن در بخشی نزدیک تراز سرعت بیشینه، اتفاق می‌افتد. مقادیر بیشینه تنش عمودی رینولدز نزدیک بستر و فصل مشترک، نشان می‌دهد که لایه مرزی کف و لایه برشی شکل گرفته در سطح مشترک دو سیال اثر بسیار مهمی بر شکل‌گیری گردابه‌ها و میزان آشفتگی میدان جریان دارد.

شکل ۱۰-الف، تنش رینولدز را در فاصله $x/L = 0.18$ از ورودی نشان می‌دهد. در این شکل با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، اندازه‌های تنش عمودی رینولدز کاهش می‌یابد، زیرا در جریان‌هایی با اعداد فرود چگالی ورودی کمتر، به خاطر افزایش ذرات رسوب، جریان پایدارتر شده و مقادیر تنش‌های عمودی رینولدز نیز کاهش می‌یابد. در این شکل، روند تغییرات تنش عمودی در عمق جریان، بسیار متغیر است که به خاطر آشفتگی بالا در بخش‌های نزدیک ورودی است. شکل‌های ۱۰-



شکل (۱۰) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر تنش عمودی رینولدز: الف) $Fr_0 = 0.18$ ب) $Fr_0 = 0.27$ ج) $Fr_0 = 0.45$ د) $Fr_0 = 0.54$ و) $Fr_0 = 0.73$ ه) $Fr_0 = 0.82$

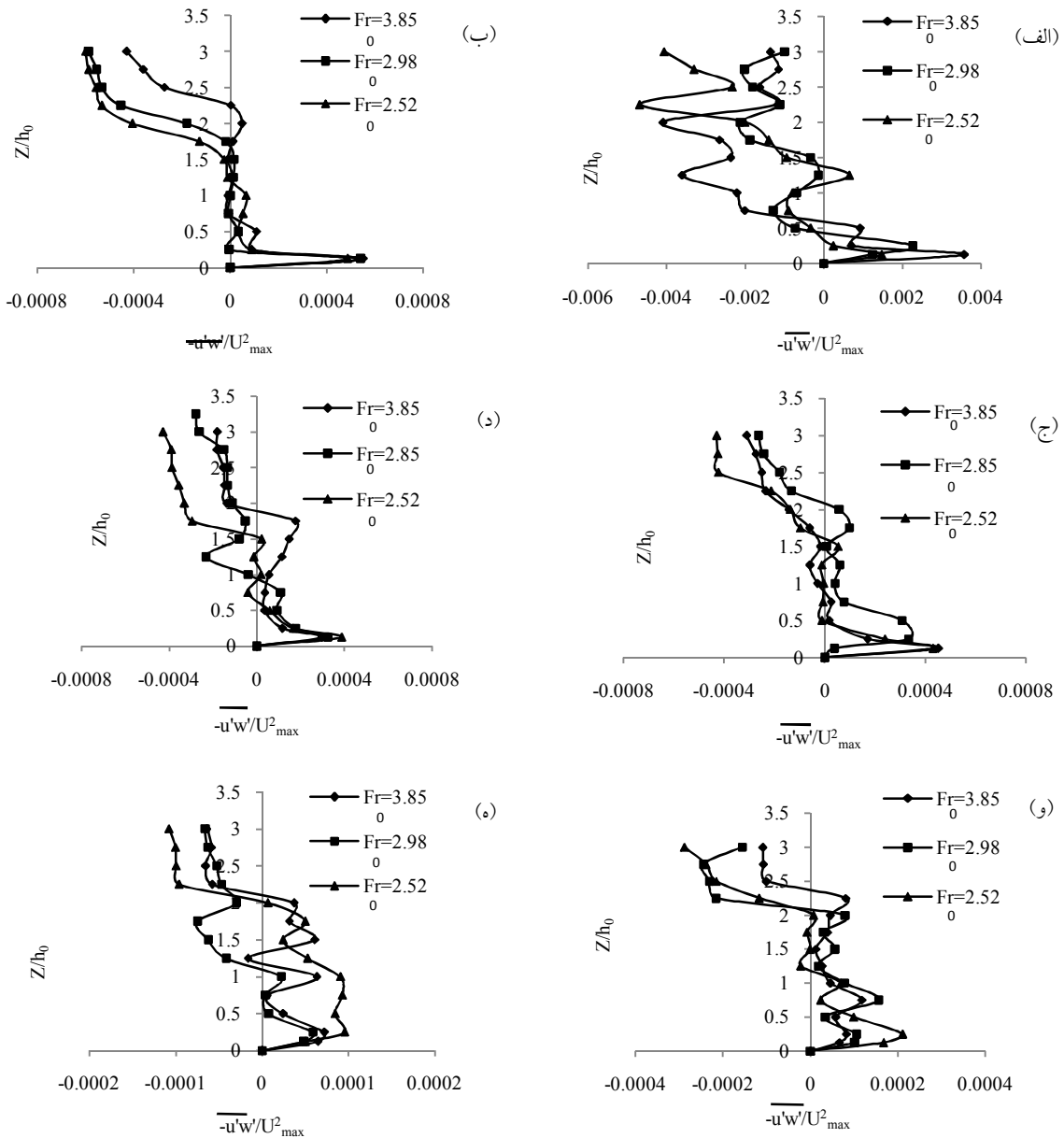
۷-۲- تنش برشی رینولدز

تنش‌های آشفتگی $-\overline{u'w'}$ ، برآوردی از شار عمودی مومنتوم جریانی است که به سمت پایین دست حرکت می‌کند و در واقع نقش آشفتگی را در جابه‌جایی انرژی جریان، آشکار می‌کند [۳۰]. تنش‌های رینولدز، نرخ جابه‌جایی مومنتوم سیال به وسیله‌ی گردابه‌ها به سمت مرزها را بیان می‌کند. این تنش‌ها

شکل ۱۰-ب تا ۱۰-ه نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از ورودی جریان، در نتیجه تعادل بین نیروهای حاکم بر جریان، ذرات معلق به یک حالت تعادل نسبی رسیده و فرایند رسوبگذاری کمتر شده است؛ بنابراین با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، افزایش اندکی در تنش‌های عمودی رینولدز دیده می‌شود.

نزدیکی فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی. لازم است گفته شود که اندازه‌های بیشینه تنش برشی رینولدز در نزدیکی کف مثبت است در حالی که این مقادیر در نزدیکی فصل مشترک دو جریان، منفی است.

هم‌ارز با تنش برشی و نشان‌دهنده انرژی آشفتگی در جریان است [۳۱]. شکل ۱۱، اثر تغییرات فرود چگالی ورودی بر تغییرات تنش برشی رینولدز در طول کانال را نشان می‌دهد. روند کلی تغییرات نشان می‌دهد که تنش‌های برشی رینولدز دو اندازه‌ی بیشینه دارد؛ یکی در نزدیکی کف و دیگری در



شکل (۱۱) اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر تنش برشی رینولدز: الف) $\frac{X}{L} = 0.18$ ب) $\frac{X}{L} = 0.27$ ج) $\frac{X}{L} = 0.45$ د) $\frac{X}{L} = 0.54$ و) $\frac{X}{L} = 0.73$ ه) $\frac{X}{L} = 0.82$

بیرون^۳ نامیده می‌شود، در بخش ۲ یا (Q_2) ، $u'(t) < 0$ و $w'(t) > 0$ است و بخش بیرون‌رانی^۴ نامیده می‌شود؛ در این بخش، آشفتگی سیال با سرعت پایین به سمت لایه‌های بالا جابه‌جا می‌شود. در بخش ۳ یا (Q_3) ، $u'(t) < 0$ و $w'(t) < 0$ است و بخش اندرکنش رو به داخل^۵ نامیده می‌شود. در بخش ۴ یا (Q_4) ، $u'(t) > 0$ و $w'(t) < 0$ است و بخش جاروبی^۶ نامیده می‌شود؛ در این بخش، سیال با سرعت بالا به سمت لایه‌های مجاور جابه‌جا انجام می‌شود. ارزیابی چهاربخشی، امکان تعیین سهم هریک از پدیده‌های چهارگانه را در تنش رینولدز میانگین $(\tau_{xz} = -\rho u'w')$ فراهم می‌کند. اگر اندازه $u'(t)w'(t)$ منفی باشد، اندازه تنش رینولدز (τ_{xz}) مثبت خواهد بود و اثر بخش‌های Q_4 و Q_2 ، یعنی پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی، بیشتر است. در حالی که اگر تنش رینولدز منفی باشد، اثر بخش‌های Q_3 و Q_1 ، یعنی پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون و اندرکنش رو به داخل، بیشتر خواهد بود. در شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-و مشاهده می‌شود که مقادیر تنش‌های رینولدز بی‌بعد شده، در بخش‌های نزدیک بستر، مثبت است؛ یعنی در این بخش، پدیده جاروبی یا بیرون‌رانی حاکم است. از آن‌جاکه این پدیده‌ها باعث افزایش تنش رینولدز می‌شوند، می‌توان انتظار داشت که پدیده جاروبی باعث جابه‌جایی ذرات به صورت بار بستر و پدیده بیرون‌رانی باعث جابه‌جایی ذرات به صورت بار معلق شود که با نتایج Mianaei و Keshavarzy (۲۰۰۸) و Nezu و Nakagawa (۱۹۹۳) نیز سازگار است [۳۳ و ۳۴]. در بخش‌های نزدیک به فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، مقادیر تنش‌های رینولدز بی‌بعد شده،

مقادیر منفی $-\overline{u'w'}$ ، نشان‌دهنده وجود جریان برش و درون‌آمیختگی در فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی است؛ افزون بر این، نشان می‌دهد که نوسان‌های طولی و عمقی سرعت در فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، پادهمبسته^۱ است. در همه پروفیل‌ها یک اندازه کمینه در بخش‌ای نزدیک تراز سرعت بیشینه اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد در این بخش، هیچ تنش برشی وجود ندارد. شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد که در مناطق نزدیک ورودی جریان گل‌آلود، به خاطر آشفتگی زیاد جریان و نرخ بالای درون‌آمیختگی، اندازه‌های بیشینه نزدیک بستر و فصل مشترک، به صورت واضح تشخیص داده نمی‌شود و با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، میزان شار عمودی جریان طولی کاهش می‌یابد. با پیش‌روی در طول کانال و رسیدن به شرایط تثبیت‌شده، اندازه‌های تنش برشی رینولدز و اثر تغییرات عدد فرود چگالی ورودی بر آن‌ها، کاهش چشم‌گیری خواهند داشت که نتیجه کاهش میزان آشفتگی در بخش‌ها دور از ورودی است (شکل ۱۱-ه).

۷-۳- ارزیابی چهاربخشی^۲

از ابزارهای مهم برای بررسی پدیده‌های آشفتگی، ارزیابی چهاربخشی است [۳۲]. در این روش با استفاده از مؤلفه‌های نوسان‌های سرعت در راستای جریان و در راستای عمود بر جریان، پدیده‌های آشفتگی به چهار بخش تقسیم می‌شوند و نوسان‌های لحظه‌ای سرعت آشفتگی $u'(t)$ و $w'(t)$ به هر یک از این بخش‌های چهارگانه اختصاص داده می‌شوند. بخش‌های چهارگانه با علامت Q_{1-4} نمایش داده می‌شوند. در بخش ۱ یا (Q_1) ، $u'(t) > 0$ و $w'(t) > 0$ است^۱ که بخش اندرکنش رو به

3- Outward interactions
4- Ejections
5- Inward interactions
6- Sweeps

1- Anti- correlated
2- Quadrant

کاهش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز ورودی، سرعت متوسط جریان گل‌آلود افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود چگالی ورودی، سرعت متوسط جریان گل‌آلود کاهش می‌یابد. در بخش‌های نزدیک ورودی، روند تغییرات تنش عمودی رینولدز در عمق جریان، متغیر است؛ اما در بخش‌ها دور از ورودی، بیشینه تنش عمودی رینولدز نزدیک بستر و فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی و کمینه آن در بخش‌های نزدیک تراز سرعت بیشینه، اتفاق می‌افتد. در بخش‌ها نزدیک بستر، پدیده جاروبی یا بیرون‌رانی حاکم است. در بخش‌ها نزدیک فصل مشترک جریان گل‌آلود و سیال محیطی، پدیده اندرکنش رو به بیرون یا اندرکنش رو به داخل اهمیت بیشتری دارد. در این بخش، شار عمودی مومنتوم جریان طولی به سمت پایین خواهد بود که تأییدکننده پدیده درون‌آمیختگی در فصل مشترک دو سیال است.

۹- مراجع

- [1] Peakall, J; McCaffery, W. D. and Keneller, B. C; "A process model for the evaluation morphology architecture of sinuous submarine channels."; *Journal of Sediment Research*; 53(6), 2001, 130-151.
- [2] Middleton; G. H; "Sediment deposition from turbidity currents."; *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21, 1993, 89-114.
- [3] Parker, G; Fukushima, Y. and Pantin, H.M; "Self-accelerating turbidity currents." *Journal of Fluid Mechanics*; 171, 1986, 145-181.
- [4] Alves, Elsa; Ferreira, Rui M. L. and Cardoso, António H; "One-dimensional numerical modeling of turbidity currents: hydrodynamics and deposition."; *River Flow*; 2010, 1097-1104.
- [5] Altinakar, S; Graf, W. H. and Hopfinger, E. J; "Weakly depositing turbidity current on a small slope."; *Journal of Hydraulic Research*; 28(1), 1990, 55-80

منفی است؛ یعنی در این بخش، پدیده اندرکنش رو به بیرون یا اندرکنش رو به داخل اهمیت بیشتری دارد. در این بخش، شار عمودی مومنتوم جریان طولی به سمت پایین خواهد بود که تأییدکننده پدیده درون‌آمیختگی در فصل مشترک دو سیال است. ترکیب این پدیده‌ها نشان می‌دهد که تهنشینی رسوبات، درون‌آمیختگی رسوبات به داخل جریان گل‌آلود و درون‌آمیختگی در فصل مشترک دو سیال، هم‌زمان اتفاق می‌افتد ولی همواره یک شار خالص از جریان به سمت بستر (جریان رسوبگذار) یا از بستر به سمت جریان (جریان فرساینده) وجود دارد. اگر جریان رسوبگذار باشد، با تهنشین شدن همه‌ی مواد معلق، جریان ناپدید می‌شود؛ اگر جریان فرساینده باشد، هر چه ذرات بیشتری از روی بستر به داخل جریان کشیده شود، جریان رشد می‌کند و شتاب می‌گیرد. هر چه جریان رسوبات بیشتری به داخل خود بکشد، بر میزان شتاب جریان افزوده می‌شود و هر چه شتاب جریان بیشتر شود، رسوبات بیشتری به داخل جریان کشیده می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت حرکت جریان‌های گل‌آلود در مخازن سدها، سازوکار حرکت این جریان‌ها به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سرعت پیشانی جریان گل‌آلود در مقاطع نزدیک ورودی بیشتر است و در مناطق دور از ورودی، به‌خاطر کم شدن نیروی رانش، کاهش یافته و به یک اندازه ثابت میل می‌کند. با افزایش عدد فرود چگالی ورودی، سرعت پیشانی جریان گل‌آلود کاهش و با افزایش عدد رینولدز ورودی، سرعت پیشانی جریان گل‌آلود، افزایش می‌یابد. با کاهش عدد فرود چگالی ورودی، ارتفاع متوسط جریان نیز

- [14] Keshtkar, S; Ayyoubzadeh, A; Firoozabadi, B; Afshin, H. "Experimental study of opening height of entrance gate effect on vertical distribution velocity in a turbidity current." International conference of fluvial hydraulics, Izmir, Turkey, September 3-5, 2008.
- [15] Firoozabadi, B; Afshin, H. and Bagherpour, A. "Experimental Investigation of Turbulence Specifications of Turbidity Currents." Journal of Applied Fluid Mechanics; 3(1), 2009, 63-73.
- [16] Gerber, G; Diedericks, G and Basson, G. R; "Particle Image Velocimetry Measurements and Numerical Modeling of a Saline Density Current" Journal of Hydraulic Engineering; 137(3), 2011, 333-342.
- [17] Simpson, J.E. and Britter, R.E; "The dynamics of the head of gravity current advancing over a horizontal surface." Journal of Fluid Mechanics; 94(3), 1979, 477-495.
- [18] Britter, R.E. and Simpson, J.E; "Experiments on the dynamics of gravity current head." Journal of Fluid Mechanics; 88(2), 1978, 223-240
- [19] Simpson, J.E; "A comparison between laboratory and atmospheric density currents." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 95(406), 1969, 758-765.
- [20] Tsihrintzis, V. A. and Alavian, V; "Spreading of Three-Dimensional Inclined Gravity Plumes." Journal of Hydraulic Research; 34(5), 1996, 695-711.
- [21] Garcia, M.H. and Parsons, J.D; "Mixing at the front of gravity currents." Dynamics of Atmospheres and Oceans; 24, 1996, 197-205.
- [22] Parsons, J.D; "Mixing mechanisms in density intrusion." PhD Thesis; 1998; University of Illinois at Urbana-Champaign
- [23] Middleton, G. V; "Experiments on Density and Turbidity Currents: I. Motion of the Head"; Canadian Journal of Earth Sciences; 3(4), 1966, 523-546.
- [24] Turner, J. S; Buoyancy Effects in Fluids; Cambridge Univ. Press; 1979.
- [25] Ellison, T. H. and Turner, J. S; "Turbulent entrainment in stratified flows." Journal of Fluid Mechanics; 6(3), 1959, 423-448.
- [6] Thomas, L. P; Dalziel, S. B and Marino, B. M; "The structure of the head of an inertial gravity current determined by particle-tracking velocimetry." Experiments in Fluids; 34, 2003, 708-716.
- [7] Li, Tao; Zhang, Jun Hua; Tan, Guang Ming; Ma, Huai Bao and Li, Shu Xia; " Study on turbidity current head going through the changing width section." The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling; 2012, 214-220.
- [8] Kneller, B. C; Bennett, S. J. and McCaffrey, W. D; "Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents." Journal of Geophysical Research; 104(C3), 1999, 5381-5391.
- [9] Buckee, C; Kneller, B. and Peakall, J; "Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents." Particulate gravity currents; W. McCaffrey, B. Kneller, and J. Peakall, eds., Blackwell, Oxford, UK, 2009, 173-187.
- [10] McCaffrey, W. D; Choux, C. M; Baas, J. H. and Haughton, P. D. W; "Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain-size stratification within experimental particulate gravity currents." Marine and Petroleum Geology; 20(6-8), 2003, 851-860.
- [11] Gray, T. E; Alexander, J. and Leeder, M. R; "Quantifying velocity and turbulence structure in depositing sustained turbidity currents across breaks in slope." Sedimentology; 52(3), 2005, 467-488.
- [12] Choux, C. M. A; Baas, J. H; McCaffrey, W. D. and Haughton, P. D. W; "Comparison of spatio-temporal evolution of experimental particulate gravity flows at two different initial concentrations, based on velocity, grain size and density data." Sedimentary Geology; 179, 2005, 49-69.
- [13] Kneller, B.C; Bennett, S.J; McCaffrey, W.D; "Velocity and turbulence structure of density currents and internal solitary waves: potential sediment transport and the formation of wave ripples in deep water." Sedimentary Geology; 112, 1997, 235-250.

- [31] Middleton, G.V; Southard, J.B; Mechanics of sediment movement. Sponsored by the Eastern Section of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists; Short Course 3; SEPM; 1984.
- [32] Lu, S. S. and Willmarth, W. W; "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer." Journal of Fluid Mechanics; 60(30), 1973, 481-511.
- [33] Mianaei, S.J. and Keshavarzi, A.R; "Spatio-temporal variation of transition probability of bursting events over the ripples at the bed of open channel."; Stochastic Environmental Research and Risk Assessment; 22(2), 2008, 257-264.
- [34] Nezu, I. and Nakagawa, H; Turbulent in open channel flow; Balkema; Rotterdam; The Netherlands; 1993.
- [26] Parker, G; Garcia, M; Fukushima, Y. and Yu, W; "Experiments on turbidity currents over an erodible bed." Journal of Hydraulic Research; 25(1), 1987, 123-147.
- [27] Alavian, V; Jirka, G; Deton, R; Johnson, M. and Stefan, H; "Density entering lakes and reservoirs" Journal of Hydraulic Engineering; 118(11), 1992, 1464-1489.
- [28] Altinakar, M.S; Graf, W.H. and Hopfinger, E.J; "Flow structure in turbidity currents." Journal of Hydraulic Research; 34(5), 1996, 713-718.
- [۲۹] فرهانی، ب؛ «فیزیک جریان‌های آشفته»؛ تهران، دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی، ص ۱۳۸۷؛ ۲۹۰.
- [30] Maltese, A; Cox, E; Folkard, A. M; Ciraolo, G; Loggia, G. La. and Lombardo G; "Laboratory Measurements of Flow and Turbulence in Discontinuous Distributions of Ligulate Seagrass" Journal of Hydraulic Engineering; 133(7), 2007, 750-760.