

تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ

فرید کوتی، سید محمود کاشفی پور* و مهدی قمشی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۹/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۳/۱)

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی و تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ تحت شرایط متغیری از شیب کف، دبی و غلظت جریان غلیظ و کشش سیال پیرامون پرداخته شده است. آزمایش‌ها در فلومی شیب‌پذیر با استفاده از محلول آب و نمک به عنوان جریان غلیظ صورت گرفت. نتایج نشان داد که اعمال هر یک از شرایط فوق تأثیر بسزایی بر مشخصه‌های مهم پروفیل‌های سرعت دارد. در ادامه نیز پروفیل‌های بدون بعد جهت بررسی و مقایسه آنها در رژیم‌های زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی استخراج شدند که نتایج نشان داد در حالت فوق بحرانی ضخامت پروفیل‌ها عموماً بیشتر است که به دلیل کشش بیشتر سیال پیرامون می‌باشد. هم‌چنین ضرایب روابط پروفیل‌های سرعت در نواحی جت و دیواره استخراج شدند که تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را نشان دادند. نسبت مشخصه‌های پروفیل‌های سرعت به یکدیگر نیز جهت درک بهتر ساختار پروفیل‌ها در جریان غلیظ محاسبه شدند.

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، مخازن سدها، پروفیل سرعت، کشش آب، جریان کدر

۱. به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشیار و استاد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kashefipour@excite.com

مقدمه

در طبیعت نمونه‌های بسیاری از جریان‌های غلیظ یافت می‌شود که فعالیت انسان نیز بر تنوع آنها افزوده است. مواردی چون سقوط بهمن‌ها، سرازیر شدن گدازه‌های آتشفشان، حرکت جبهه‌های هوای سرد و گرم، تندرهای، گرد و غبار، جریان‌های رسوبی در دریاها و مصب رودخانه‌ها نمونه‌های بارزی از جریان‌های غلیظ در طبیعت می‌باشند. جریان‌های کدر در مخازن سدها نفت ریزی در دریاها، حرکت و پخش گازهای تولید شده از واحدهای صنعتی هدایت فاضلاب‌های شهری و صنعتی به دریاها و رودخانه‌ها مواردی از جریان‌های غلیظ ایجاد شده به دست بشر می‌باشند (۲ و ۲۹). جریان‌های کدر جریان‌های مملو از رسوب می‌باشند که اغلب در اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها و مخازن سدها اتفاق می‌افتد و مکانیزم مهمی در انتقال رسوب در آب‌های عمیق دارد (۲۵). محققین اعتقاد دارند که حتی جریان‌های غلیظ می‌توانند علتی برای ایجاد تنگه‌ها در زیر دریا باشند (۱۹). جریان کدر اغلب پروسه حاکم بر رسوب‌گذاری در مخازن به‌وسیله انتقال ذرات ریز رسوب می‌باشد و باعث کاهش حجم ذخیره و عمر مفید سد، گرفتگی سازه‌های ورودی، صدمه به نیروگاه‌ها و رسوب‌گذاری در پایین دست رودخانه‌ها بر اثر رسوب‌شویی می‌گردد (۶ و ۷). طراحی و ساخت سدها نیاز به پیش‌بینی و تخمین نسبتاً دقیق انتقال رسوب، رسوب‌گذاری و فرسایش دارد و برای مخازن کنونی نیز دانستن این امر جهت درک بهتر و حل مشکلات رسوب‌گذاری و از طرفی برای بهبود بخشیدن به نحوه بهره‌برداری لازم می‌باشد.

اولین مشاهدات جریان غلیظ توسط یک محقق سوئیسی به نام فارل (۷) در دریاچه جنوا در کشور سوئیس گزارش شده است. پس از آن تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی روی جنبه‌های مختلف جریان‌های غلیظ صورت گرفت که به طور مثال می‌توان به مطالعات کولگان (۲۱)، آلتیناکار و همکاران (۲)، فتچی مقدم و همکاران (۱۰) در زمینه نحوه حرکت، شکل و سرعت رأس جریان و مطالعات پارکر و

همکاران (۲۵)، فرناندز و ایمبرگر (۱۱)، کاشفی‌پور و همکاران (۲۰) در زمینه شدت اختلاط رسوب و کشش سیال پیرامون و بررسی پروفیل‌های غلظت و سرعت اشاره نمود. تحقیقات مفیدی نیز در رابطه با نقطه غوطه‌وری توسط سویچ و بریمبرگ (۲۷)، آکیاما و استفان (۱) صورت گرفت. در زمینه فرسایش و رسوب‌گذاری در جریان غلیظ و نحوه کنترل آن نیز افرادی مانند آلتیناکار و همکاران (۲)، گارسیا (۱۴)، باس و همکاران (۴) اوهی و اشلیس (۲۳ و ۲۴) و مطالعات گسترده‌ای انجام دادند. در این بین مدل‌های عددی و کامپیوتری نیز گسترش پیدا کردند که می‌توان به مدل‌های ارائه شده توسط گوتر و جین (۱۵)، گارسیا (۱۲)، بلانچت و همکاران (۵) اشاره نمود.

در رابطه با پروفیل‌های سرعت در بدنه جریان غلیظ مطالعات مفیدی صورت گرفته است. آلتیناکار و همکاران (۳) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت در شرایط جریان کدر با ته‌نشینی رسوب بسیار کم در شیب‌های کم به بررسی نسبت مشخصه‌های جریان غلیظ و روابط تخمین پروفیل‌های بدون بعد سرعت پرداختند. لی و یو (۲۲) نیز در فلومی با استفاده از ذرات کائولین به عنوان ذرات معلق به بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ پرداختند و مشاهده نمودند که ضخامت جریان غلیظ با کاهش سرعت متوسط و غلظت، افزایش می‌یابد و روابطی را نیز برای پروفیل‌های بدون بعد سرعت و غلظت استخراج نمودند. هوانگ و همکاران (۱۷) مدلی عددی را برای جریان‌های غلیظ با بستر فرسایشی توسعه دادند که این مدل براساس معادلات RANS و با استفاده از مدل توربولانسی k-ε پایه‌ریزی گردید. آنها مدل خود را با نتایج آزمایشات گارسیا (۱۳) و پروفیل‌های سرعت و غلظت حاصله مقایسه نمودند که در نهایت از مطابقت خوبی برخوردار بود. حسینی و همکاران (۱۶) با استفاده از دستگاه ADV پروفیل‌های سرعت و غلظت را اندازه‌گیری کرده و با مطالعات پیشین مقایسه

در این رابطه \bar{U} سرعت متوسط جریان غلیظ، h ارتفاع جریان غلیظ و θ زاویه بستر با افق هستند. عوامل ایجادکننده اختلاف چگالی می‌توانند اختلاف در درجه حرارت، اختلاف در مواد معلق یا محلول، اختلاف در مشخصات فیزیکی دو سیال یا ترکیبی از این عوامل باشد. جریان‌های غلیظ در مخازن سدها بر اثر اختلاف در غلظت رسوبات معلق می‌باشد (۲۶). براساس اختلاف چگالی جریان غلیظ ممکن است به صورت زیرگذر، روگذر یا میان‌گذر باشد که جریان‌های غلیظ در مخازن سدها بیشتر از نوع جریان‌های زیرگذر (شکل ۱) می‌باشند (۸).

در بدنه جریان غلیظ به دلیل وجود هاله‌ای از جریان در مرز مشترک دو سیال حاصل از اختلاط سیال پیرامون با جریان غلیظ از روابط زیر برای محاسبه ارتفاع و سرعت متوسط در بدنه استفاده می‌گردد (۹):

$$\bar{U}h = \int_0^{\infty} u dz \cong \int_0^{h_t} u dz \quad [3]$$

$$\bar{U}^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz \cong \int_0^{h_t} u^2 dz \quad [4]$$

شکل عمومی پروفیل‌های سرعت در بدنه جریان غلیظ به صورتی است که در شکل ۲ نشان داده شده است مشخصه‌های مهم موجود در این پروفیل‌ها، سرعت ماکزیمم (u_{max}) و ارتفاع مربوط به آن (h_{max})، ارتفاعی که در آن سرعت صفر می‌شود (h_t)، سرعت متوسط (\bar{U}) و ضخامت بدنه (h) می‌باشند (۱۶).

در تحقیقات صورت گرفته، پروفیل‌های سرعت را به دو بخش ناحیه دیواره ($z < h_{max}$) و ناحیه جت ($z > h_{max}$) تقسیم‌بندی می‌کنند که ناحیه دیواره تحت تأثیر زبری کف بوده و از روابط لگاریتمی (رابطه ۵) یا نمایی (رابطه ۶) تبعیت می‌کند و ناحیه جت تحت تأثیر کشش سیال پیرامون بوده و از رابطه شبه گوسی (رابطه ۷) پیروی می‌کند (۳، ۶ و ۱۶).

$$\frac{u_z}{u_a} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{h_a}\right) + cte \quad [5]$$

$$\frac{u_z}{u_b} = \alpha \left(\beta \frac{z}{h_b} \right)^n \quad [6]$$

نمودند، در نهایت نیز روابطی را برای پروفیل‌های حاصله ارائه نموده و نسبت مشخصه‌های پروفیل سرعت را به دست آوردند. سیکه روز و همکاران (۲۸) با استفاده از جریان نمکی، رسوبی و هیبریدی (تلفیقی از نمک و رسوب) پروفیل‌های سرعت و غلظت را در بستر فرسایشی با در نظر گرفتن فرم بستر بررسی نمودند. آنها پی بردند که وجود فرم بستر تأثیر بسزایی بر پروفیل‌های سرعت و غلظت خواهد داشت، به گونه‌ای که فرم بستر در جریان فوق بحرانی باعث بالا بردن نقطه ماکزیمم سرعت در پروفیل سرعت شده و مرز مشترک دو سیال را در نزدیکی کف یکنواخت‌تر می‌سازد. در جریان زیر بحرانی فرم بستر تأثیر چندانی روی مرز مشترک دو سیال نداشته و ارتفاع نقطه ماکزیمم سرعت را افزایش و مقدار آن را کاهش می‌دهد. از آنجا که در پیشینه تحقیق، مطالعات چندانی در زمینه تأثیر عوامل محیطی مانند شیب، دبی، غلظت و کشش سیال پیرامون بر پروفیل‌های سرعت صورت نگرفته، لذا هدف از این مقاله بررسی این عوامل روی پروفیل‌های سرعت جهت شناخت جامع‌تری از جریان‌های غلیظ است.

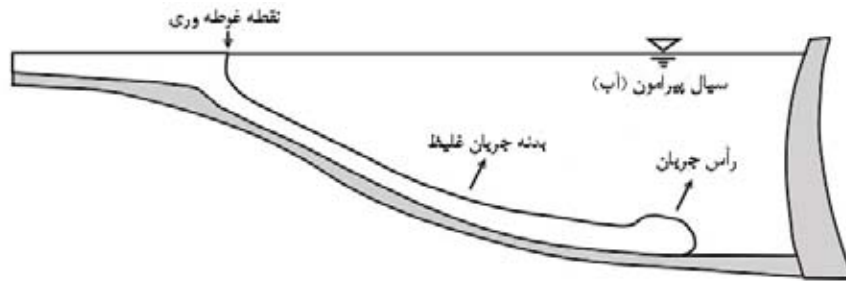
معادلات حاکم بر جریان غلیظ

در تعریفی ساده جریان غلیظ به جریانی گفته می‌شود که سیالی درون سیال دیگر با چگالی متفاوت حرکت کند، عامل حرکت این گونه جریان‌ها نیروی ثقل می‌باشد که شتابی کمتر از شتاب ثقل داشته و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۲۶):

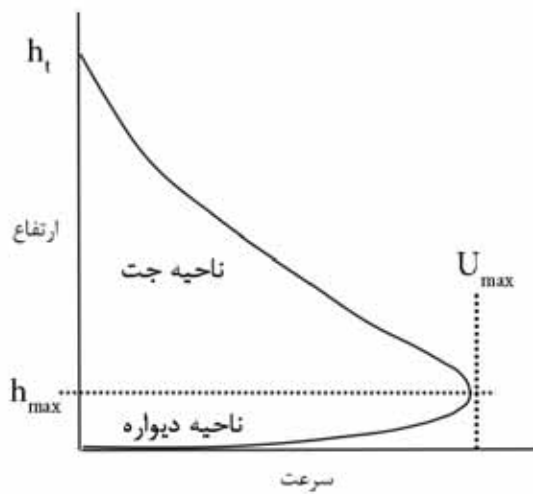
$$g' = g \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad [1]$$

در این رابطه g' شتاب ثقل کاهش یافته، g شتاب ثقل زمین، ρ_d, ρ_a به ترتیب دانسیته سیال غلیظ و سیال پیرامون هستند. عدد فرود دنسیومتری که بیان‌کننده حالت جریان غلیظ است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr_d = \frac{\bar{U}}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad [2]$$



شکل ۱. جریان غلیظ زیرگذر در مخزن سد



شکل ۲. پروفیل سرعت در جریان غلیظ

آنکه می‌توان از این نسبت‌ها در رابطه (۷) استفاده نمود. در جریان‌های غلیظ شار رسوبی یا فلاکس شناوری به صورت رابطه (۸) تعریف می‌گردد:

$$B = g' h U \quad (8)$$

در این رابطه h, U سرعت متوسط و ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌باشند که از روابط ۳ و ۴ حاصل می‌شوند. براساس شار رسوبی جریان‌ها به دو دسته تجزیه‌پذیر و تجزیه‌ناپذیر تقسیم‌بندی می‌شوند، بدین صورت که اگر شار رسوبی متغیر باشد (مانند جریان‌های رسوبی)، نوع جریان تجزیه‌پذیر و اگر ثابت باشد (مانند جریان‌های نمکی)، نوع جریان تجزیه‌ناپذیر است. رابطه پیوستگی در جریان‌های غلیظ تجزیه‌ناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود (۲۰):

$$\frac{u_z}{u_b} = f \exp \left[-\alpha_c \left(\frac{z - h_{\max}}{h - h_{\max}} \right)^m \right] \quad (7)$$

در این روابط $k, cte, \alpha, \beta, n, f, \alpha_c, m$ ضرایب ثابت، u_z سرعت نقطه‌ای در ارتفاع z ، ضخامت بدنه جریان، u_a در اکثر تحقیقات سرعت برشی، u_b و h_b در برخی از تحقیقات سرعت متوسط بدنه و ارتفاع آن و در برخی دیگر سرعت ماکزیمم و ارتفاع سرعت ماکزیمم می‌باشند. جدول ۱ مقادیر پیشنهاد شده ضرایب روابط اشاره شده را توسط برخی از محققین نشان می‌دهد: مشخصه‌های پروفیل سرعت $(h_t, h_{\max}, u_{\max}, h, \bar{U})$ را می‌توان به صورت بدون بعد و کسری از یکدیگر بیان نمود. جدول ۲ تعدادی از این نسبت‌ها را که توسط محققین ارائه شده است، نشان می‌دهد. قابل توجه

جدول ۱. ضرایب ارائه شده توسط محققین برای روابط ۶ و ۷

| محقق | u_b | h_b | α | β | n | f | α_c | m |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|---------|-------|------|------------------|-----|
| آلتیناکار و همکاران (۳) | u_{max} | h_{max} | ۱ | ۱ | ۰/۱۶۶ | ۱ | $1/42 \pm 0/065$ | ۲ |
| لی و یو (۲۲) | \bar{U} | h | ۱/۱۵ | ۳ | ۰/۰۵ | ۱/۱۵ | ۱/۵۲ | ۴ |
| حسینی و همکاران (۱۶) | u_{max} | h_{max} | ۱ | ۱ | ۰/۳۴ | ۱ | ۱/۳ | ۲/۲ |

جدول ۲. مقادیر نسبی مشخصه‌های اصلی پروفیل‌های سرعت ارائه شده توسط محققین

| محقق | h_{max}/h | u_{max}/\bar{U} | h_i/h | h_{max}/h_i |
|-------------------------|-------------|-------------------|---------|---------------|
| آلتیناکار و همکاران (۳) | ۰/۳ | ۱/۳ | ۱/۳ | — |
| لی و یو (۲۲) | ۰/۳۳۳ | — | — | — |
| حسینی و همکاران (۱۶) | ۰/۳۸۴ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۰/۳ |
| هوانگ و همکاران (۱۷) | — | ۱/۵ | — | — |
| سیکه روز و همکاران (۲۸) | ۰/۲۲ | ۱/۴۵ | ۱/۴۵ | — |
| | ۰/۳۶* | ۱/۳* | ۱/۳۵* | — |

* : اعداد ستاره‌دار با در نظر گرفتن اثر فرم بستر به دست آمده‌اند.

طول ۷/۸ متر و به عرض ۳۵ سانتی‌متر و به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر که قابلیت تغییر شیب تا ۴٪ را دارا می‌باشد، انجام شد. شکل‌های ۳ و ۴ نمایی از فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

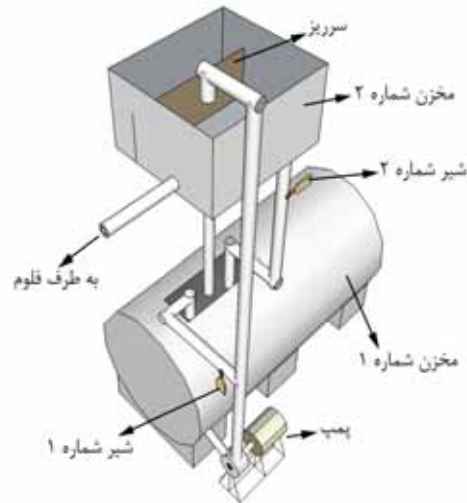
جریان غلیظ به کمک محلول آب و نمک و ماده رنگی و توسط پمپ اختلاط در مخزن شماره ۱ تهیه می‌گشت (شکل ۳) و سپس جهت ایجاد ارتفاع ثابت به مخزن شماره ۲ منتقل می‌شد. فلوم آزمایشگاهی (شکل ۴) توسط دریچه‌ای به دو قسمت تقسیم شده که قسمت اول به طول ۰/۸ متر و محل ورود محلول آب و نمک و قسمت دوم به طول ۷ متر محل ورود آب تمیز است. همچنین فلوم دارای سرریزی به ارتفاع ۶۶ سانتی‌متر در انتها جهت ثابت نگه داشتن ارتفاع آب تمیز بود. قبل از ورود محلول آب و نمک در ابتدا شیب فلوم تنظیم

$$\frac{\partial}{\partial x}(Uh) = -w_{hi} = E_w U \quad [9]$$

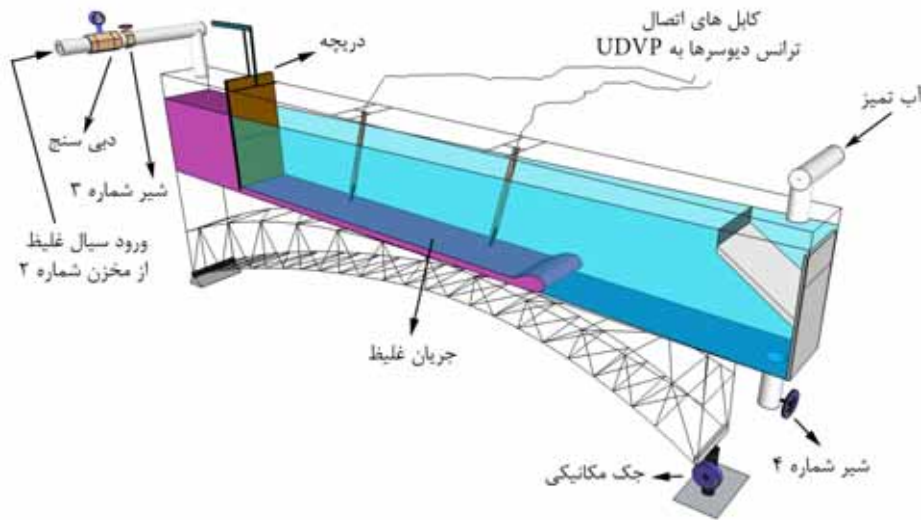
در این رابطه $-w_{hi}$ سرعت عمودی سیال پیرامون به درون جریان غلیظ می‌باشد که محققین آن را ضریبی از سرعت متوسط در بدنه معرفی می‌نمایند. که به این ضریب (E_w)، ضریب شدت اختلاط گفته می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه معادله پیوستگی برابر با صفر نشده است لذا می‌توان، تفاوت میان پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف در طول جریان غلیظ را ناشی از کشش سیال پیرامون دانست.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلومی شیب‌پذیر به



شکل ۳. سیستم اختلاط و پمپاژ



شکل ۴. فلوم و تجهیزات آن

تخلیه (شیر شماره ۴) گشوده شده و رأس و تلاطم‌های آن تخلیه می‌گشت، سپس پروفیل‌های سرعت در بدنه جریان در ۲ مقطع $2/5$ و $3/5$ متر از دریچه توسط سرعت سنج صوتی (UDVP) با فرکانسی برابر با ۴ مگا هرتز اندازه‌گیری می‌شد. آزمایش‌ها با ۳ دبی جریان غلیظ شامل $0/9$ ، $1/0$ و $1/4$ لیتر بر ثانیه و دو غلظت ۲۰ و ۴۰ گرم در لیتر و در ۴ شیب $1/1$ ، $2/1$ ، $3/1$ ، $4/1$ که مجموعاً ۲۴ آزمایش می‌باشند، صورت گرفت و ۴۸ پروفیل اندازه‌گیری گردید.

شده و سپس از آب تمیز پر می‌شد و پس از آن محلول آب و نمک از مخزن ۲ به محوطه پشت دریچه با هد ثابت و دبی تنظیم شده منتقل می‌گشت و بعد از رسیدن به تراز برابر با تراز آب مخزن، دریچه به ارتفاع ۳ سانتی‌متر گشوده می‌شد. بدین ترتیب جریان غلیظ وارد فلوم می‌گشت. تنظیم دبی از طریق دبی‌سنج الکترومغناطیس و شیر فلکه‌ای که در مسیر خط لوله از مخزن ۲ به فلوم قرار داشت، انجام می‌گرفت. پس از رسیدن رأس جریان به انتهای مخزن، شیر فلکه

نتایج و بحث

بررسی توصیفی و کمی اثر متغیرها بر پروفیل سرعت

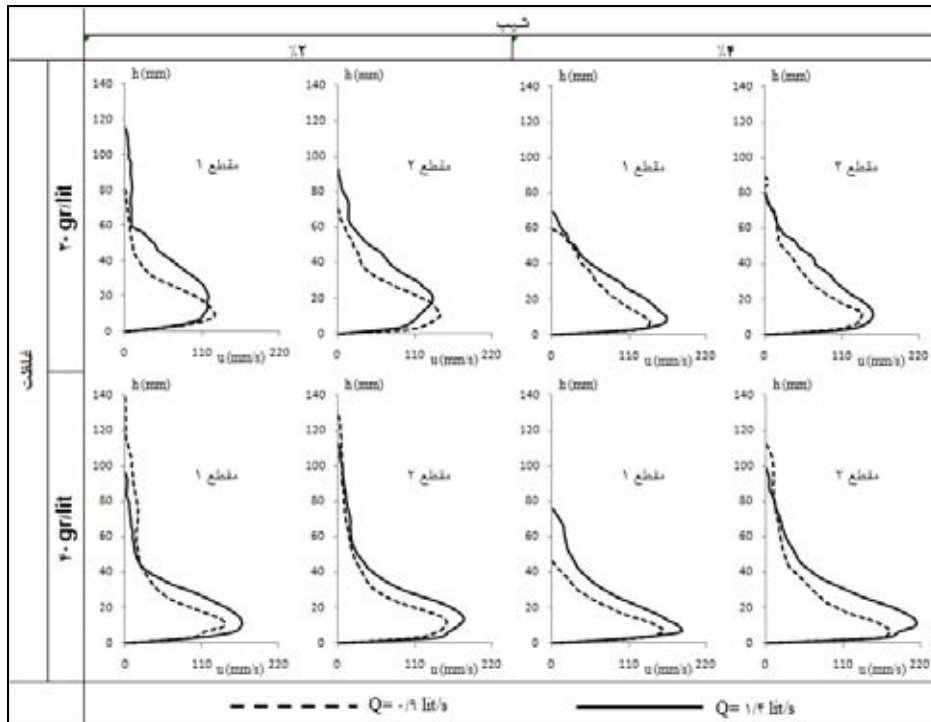
در این قسمت به بررسی پروفیل‌های سرعت در بدنه جریان غلیظ و تأثیر شیب، دبی، غلظت و هم‌چنین کشش سیال پیرامون بر آنها پرداخته می‌شود. شکل ۵ به عنوان نمونه، نشان‌دهنده تأثیر تغییر دبی از ۰/۹ لیتر بر ثانیه به ۱/۴ لیتر بر ثانیه بر پروفیل‌های سرعت در شرایط یکسان می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش دبی، پروفیل‌های سرعت ضخیم‌تر شده و سرعت ماکزیمم (U_{max}) به طرف بالا و جلو پیش می‌رود و ارتفاع h_f (ارتفاعی که در آن سرعت صفر است) نیز به‌طور تقریبی بالاتر می‌رود. شکل ۶ نیز به عنوان نمونه بیان‌کننده تأثیر تغییر شیب کف از ۲٪ به ۴٪ بر پروفیل‌های سرعت است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در شیب‌های بالاتر موقعیت سرعت ماکزیمم به طرف جلو و پائین رفته و ارتفاع h_f در شیب‌های کمتر، بالاتر می‌رود.

شکل ۷ تأثیر غلظت بر پروفیل‌های سرعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، موقعیت سرعت ماکزیمم در غلظت بیشتر به طرف جلو رفته و از لحاظ ارتفاعی تغییرات قابل توجهی ندارد. ارتفاع نقطه صفر سرعت (h_f) نیز در غلظت بیشتر تقریباً بالاتر می‌باشد. با فرض بی‌نهایت بودن ارتفاع سیال پیرامون، اختلاف در پروفیل‌های سرعت در دو مقطع ۲/۵ و ۳/۵ متر از دریچه را می‌توان در اثر کشش سیال پیرامون دانست. شکل ۸ به عنوان نمونه، اثر اختلاط سیال پیرامون بر پروفیل‌های سرعت را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که موقعیت نقطه ماکزیمم سرعت بر اثر کشش سیال پیرامون به طرف جلو و اندکی بالاتر می‌رود. هم‌چنین ارتفاع h_f نیز افزایش می‌یابد. جهت کمی نمودن میزان تأثیر هر یک از متغیرهای شیب، دبی، غلظت و کشش سیال پیرامون بر مشخصه‌های پروفیل سرعت، جدول ۳ که متوسط تغییرات نسبی مشخصه‌های پروفیل سرعت در جریان غلیظ را نشان می‌دهد، استخراج گردید. از جدول ۳، همانند شکل‌های ۵ الی ۸ نتیجه می‌شود که h_f با افزایش دبی، غلظت و کشش سیال

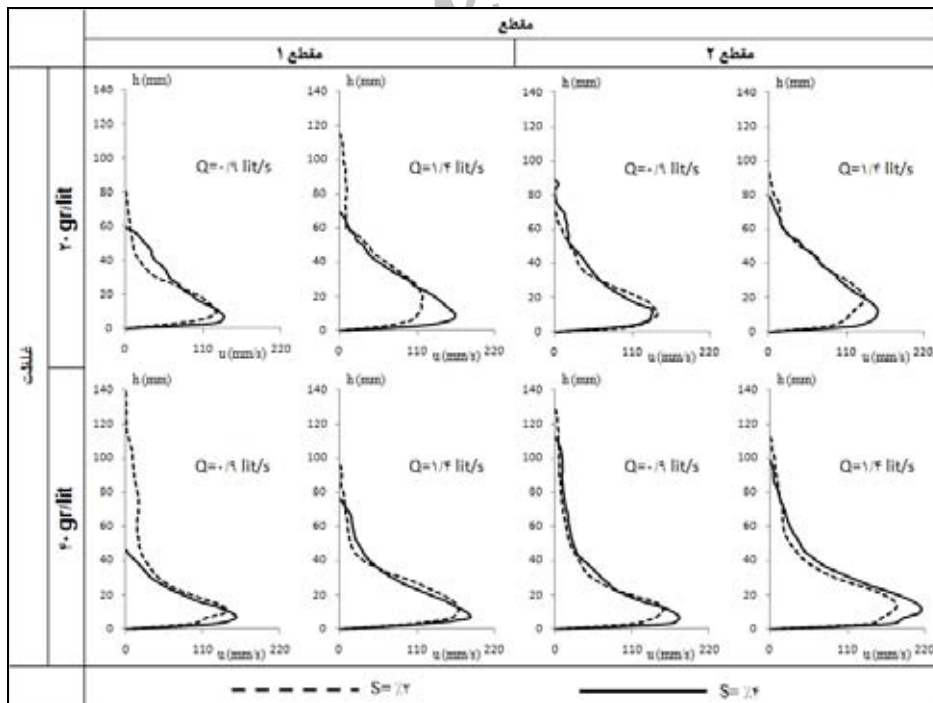
پیرامون افزایش و با افزایش شیب کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین h_{max} و h با افزایش دبی و کشش سیال پیرامون افزایش و h_{max} با افزایش غلظت و شیب کاهش پیدا می‌کند ولی h تغییرات قابل توجهی ندارد. u_{max} و \bar{U} نیز با افزایش هر یک از متغیرهای اشاره شده، افزایش می‌یابند.

پروفیل‌های بدون بعد سرعت

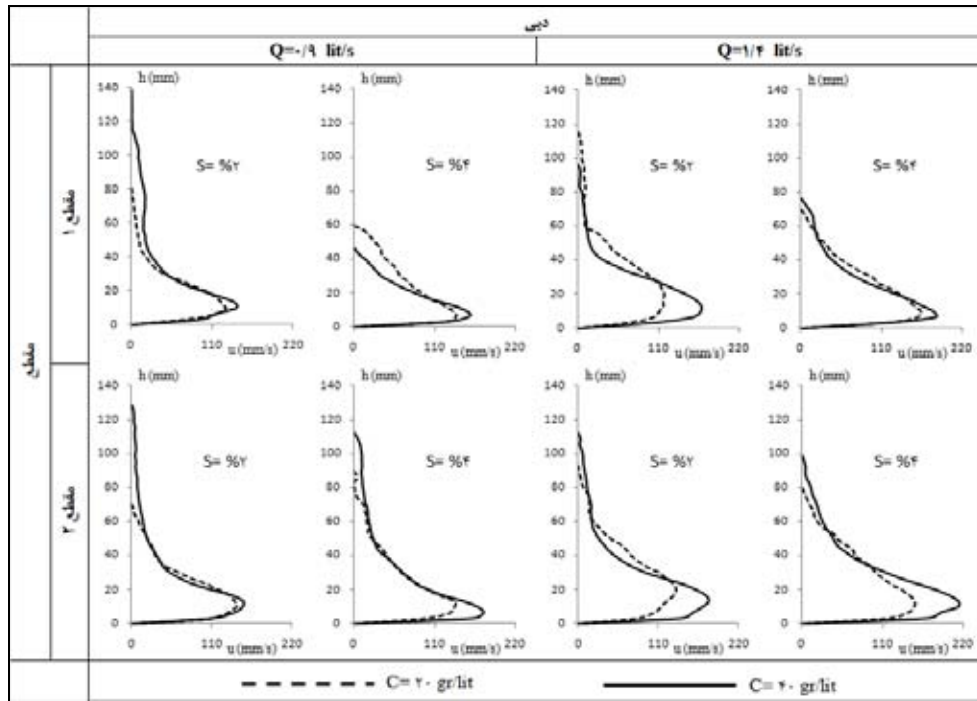
در پیشینه تحقیق برخی از محققین از جمله آلتیناکار و همکاران (۳) و حسینی و همکاران (۱۶) از سرعت ماکزیمم و ارتفاع آن برای بدون بعد ساختن پروفیل‌های سرعت استفاده نمودند. برخی دیگر نیز مانند هوانگ و همکاران (۱۷)، لی و یو (۲۲) و سیکه روز (۲۸) از سرعت متوسط و ضخامت بدنه جریان (روابط ۳ و ۴) استفاده نمودند. در تحقیق حاضر از سرعت ماکزیمم و ارتفاع h_f برای بدون بعد ساختن پروفیل‌های سرعت استفاده شده است، که در این حالت سرعت‌های نقطه‌ای نسبی و ارتفاع نسبی آنها در فاصله ۰ تا ۱ تغییر خواهد نمود. از پروفیل‌های بدون بعد حاصله، سه ناحیه زیر مقایسه آنها در رژیم‌های مختلف جریان براساس عدد فرود دنسیومتریکی استفاده نمود. محدوده اعداد فرود دنسیومتریکی به‌دست آمده در آزمایشات بین ۰/۶ الی ۱/۴۱ می‌باشند. با تجزیه و تحلیل پروفیل‌های بدون بعد حاصله، سه ناحیه زیر بحرانی ($Fr < 0/9$)، بحرانی ($0/9 < Fr < 1/1$) و فوق بحرانی ($Fr > 1/1$) را می‌توان برای مقایسه پروفیل‌ها در رژیم‌های مختلف جریان در نظر گرفت (شکل ۹). شکل ۹ نشان‌دهنده شباهت‌ها و تفاوت‌های کلی میان مجموعه‌ای از پروفیل‌ها در یک رژیم با مجموعه‌ای دیگر در رژیمی متفاوت می‌باشد. نکته قابل توجه آنکه عدد فرود بحرانی به دلیل تلاطم‌های موجود در مرز مشترک دو سیال بر اثر تنش برشی و کشش سیال پیرامون، به خصوص در ناحیه جت لزوماً ۱ نمی‌باشد (۱۸). لذا با مقایسه پروفیل‌های سرعت، محدوده ($0/9 < Fr < 1/1$) به عنوان محدوده بحرانی به دلیل



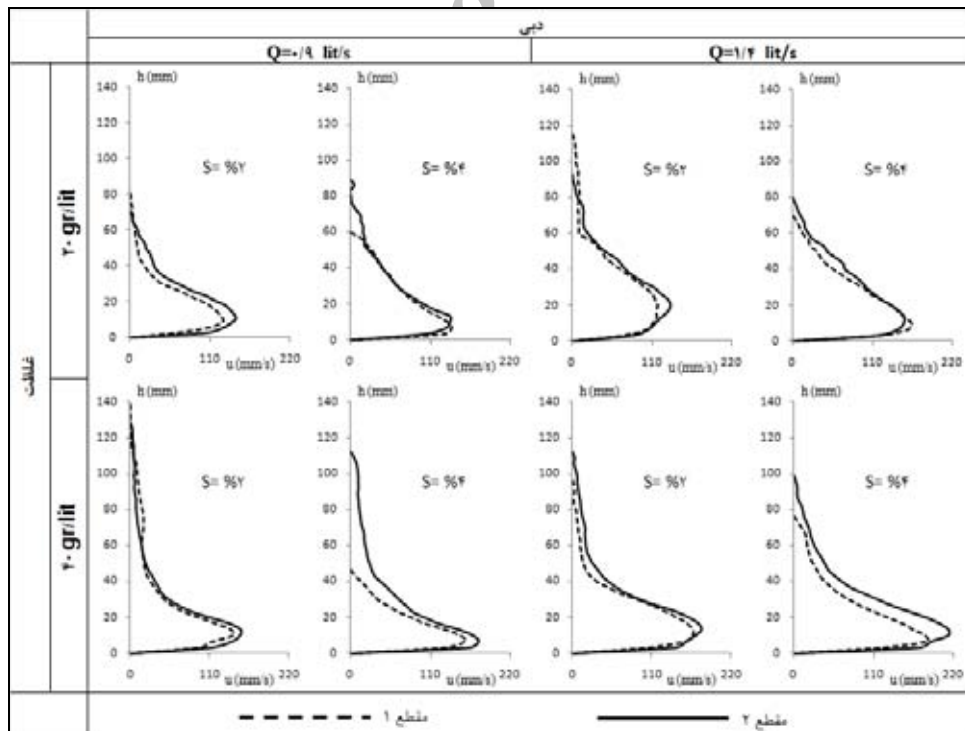
شکل ۵. تأثیر دبی بر پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ



شکل ۶. تأثیر شیب بر پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ



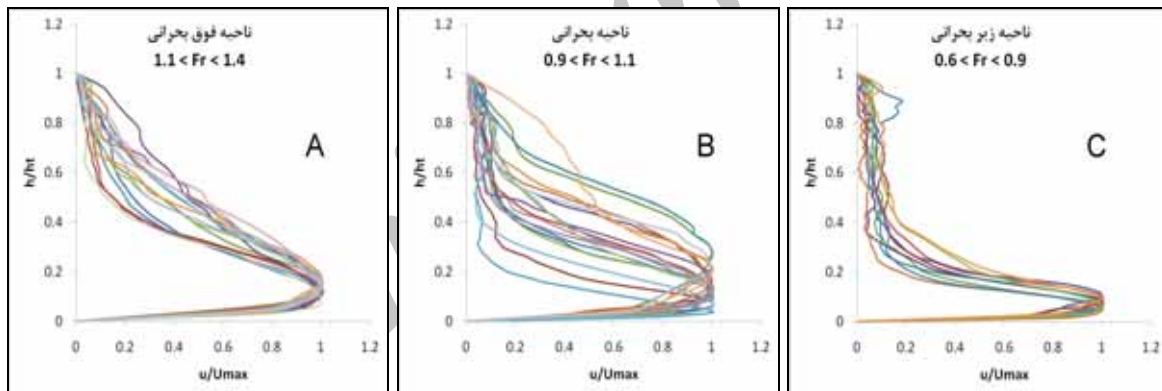
شکل ۷. تأثیر غلظت بر پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ



شکل ۸. تأثیر کشش سیال پیرامون بر پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ

جدول ۳. نسبت‌های اندازه‌گیری شده مشخصه‌های پروفیل سرعت

| نام متغیر | میزان تغییرات | $h_{t(i+1)}/h_{t(i)}$ | $h_{\max(i+1)}/h_{\max(i)}$ | $u_{\max(i+1)}/u_{\max(i)}$ | $\bar{U}_{(i+1)}/\bar{U}_{(i)}$ | $h_{(i+1)}/h_{(i)}$ |
|------------------|--|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| شیب کف | $i = 1, i+1 = 2$ | ۰/۸۹ | ۰/۹۱ | ۱/۱۷ | ۱/۱۳ | ۰/۸۸ |
| | $i = 1, i+1 = 3$ | ۰/۸۴ | ۰/۷۶ | ۱/۲۷ | ۱/۱۷ | ۰/۸۸ |
| | $i = 1, i+1 = 4$ | ۰/۷۴ | ۰/۶۱ | ۱/۳۵ | ۱/۲۷ | ۰/۸۷ |
| دبی | $i = 0.9 \text{ lit/s}, i+1 = 1.2 \text{ lit/s}$ | ۱/۲۸ | ۱/۱۸ | ۱/۱۰ | ۱/۱۴ | ۱/۱۰ |
| | $i = 0.9 \text{ lit/s}, i+1 = 1.4 \text{ lit/s}$ | ۱/۳۵ | ۱/۴۱ | ۱/۱۵ | ۱/۲۴ | ۱/۱۸ |
| غلظت | $i = 20 \text{ gr/lit}, i+1 = 40 \text{ gr/lit}$ | ۱/۴۲ | ۰/۹۳ | ۱/۲۳ | ۱/۱۳ | ۰/۹۸ |
| کشش سیال پیرامون | $i = \text{section 1}, i+1 = \text{section 2}$ | ۱/۰۳ | ۱/۴۱ | ۱/۰۵ | ۱/۰۶ | ۱/۱۵ |



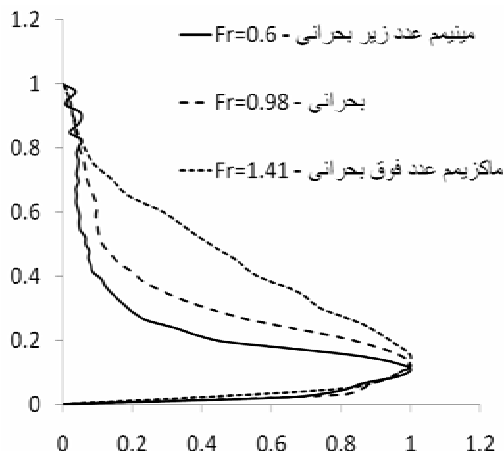
شکل ۹. پروفیل‌های بدون بعد سرعت در اعداد فرود فوق بحرانی (A)، بحرانی (B) و زیر بحرانی (C)

جریان وجود ندارد. ولی در ناحیه جت، از آنجا که با افزایش عدد فرود میزان شدت اختلاط و تلاطم نیز افزایش می‌یابد، پروفیل سرعت در این ناحیه ضخیم‌تر می‌شود.

روابط پروفیل‌های سرعت و مشخصه‌های نسبی جریان غلیظ با استفاده از نرم‌افزار SPSS و کلیه پروفیل‌های به دست آمده در آزمایشگاه، ضرایب مربوط به معادلات ۵ و ۶ در ناحیه

پراکندگی پروفیل‌ها در این بازه (همان‌طور که در شکل ۹-B ملاحظه می‌شود) انتخاب شده است.

شکل ۱۰ پروفیل‌های سرعت در حداقل و حداکثر اعداد فرود دنیومتریکی حاصله در آزمایشات این تحقیق و حالت بحرانی را نسبت به هم نشان می‌دهد. از شکل‌های (۹ و ۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه دیواره به دلیل اثر دیواره و لایه مرزی تفاوت چندانی میان پروفیل‌ها در رژیم‌های مختلف



شکل ۱۰. مقایسه پروفیل‌های سرعت در حداقل و حداکثر عدد فرود و در حالت بحرانی

جدول ۴. ضرایب به دست آمده برای روابط ۵ و ۶

| رابطه توانی (۶) | | | | | | رابطه لگاریتمی (۵) | | | | | ردیف | |
|-----------------|-------|---------|----------|-----------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-------|
| R^2 | n | β | α | h_b | u_b | ردیف | R^2 | cte | k | h_a | | u_a |
| ۰/۹۲ | ۰/۲۳۸ | ۱ | ۱/۶۰۶ | h_t | u_{max} | ۷ | ۰/۹۴ | ۱/۱۴۹ | ۰/۱ | h_t | u_{max} | ۱ |
| ۰/۹۵ | ۰/۲۶۱ | ۱ | ۱/۴۷۲ | h | u_{max} | ۸ | ۰/۹۵ | ۱/۰۸ | ۰/۰۹۵ | h | u_{max} | ۲ |
| ۰/۹۷ | ۰/۲۷۳ | ۱ | ۱/۰۳۱ | h_{max} | u_{max} | ۹ | ۰/۹۵ | ۰/۹۴ | ۰/۰۸۳ | h_{max} | u_{max} | ۳ |
| ۰/۸۵ | ۰/۲۱۸ | ۱ | ۲/۲۲۴ | h_t | \bar{U} | ۱۰ | ۰/۸۹ | ۱/۶۷۱ | ۰/۱۴۵ | h_t | \bar{U} | ۴ |
| ۰/۹۰ | ۰/۲۴۶ | ۱ | ۲/۰۸۵ | h | \bar{U} | ۱۱ | ۰/۹۱ | ۱/۵۷۴ | ۰/۱۳۸ | h | \bar{U} | ۵ |
| ۰/۹۵ | ۰/۲۸۳ | ۱ | ۱/۵۱۴ | h_{max} | \bar{U} | ۱۲ | ۰/۹۲ | ۱/۳۷۳ | ۰/۱۲۱ | h_{max} | \bar{U} | ۶ |

سرعت مربوط به آن نتایج بهتری دارد. در ناحیه جت ($z \geq h_{max}$) نیز ضرایب رابطه ۷ محاسبه شد که در جدول ۵ ملاحظه می‌شوند:

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، هر دو معادله نسبتاً R^2 مناسبی دارند، ولی در معادله‌ای که از \bar{U} به عنوان u_b استفاده شده است میزان R^2 کمی بالاتر می‌باشد. در مقایسه ضرایب به دست آمده با ضرایب محققین دیگر (جدول ۱)، تفاوت‌هایی ملاحظه می‌گردد که می‌توان علت آن را اختلاف در شرایط آزمایشگاهی دانست. به طور کلی در حالتی که از (u_{max}, h_{max}) در محاسبه ضرایب رابطه ۶ استفاده شود، ملاحظه می‌شود که میزان α به دست آمده از محققین با

دیواره ($z \leq h_{max}$)، با در نظر گرفتن حالات مختلفی از اعداد بدون بعد حاصل گردید که در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، با توجه به R^2 به دست آمده، تقریباً همه روابط به نحو مناسبی پروفیل سرعت در ناحیه دیواره را برآورد می‌نمایند، لیکن در این بین ردیف‌های (۲ و ۳) در رابطه لگاریتمی، با در نظر گرفتن (u_{max}, h_{max}, h) جهت بدون بعد ساختن رابطه، از R^2 مناسب‌تری برخوردار می‌باشند. هم‌چنین در روابط توانی، ردیف (۹) با استفاده از (u_{max}, h_{max}) به عنوان پارامترهای بدون بعدکننده، R^2 بالاتری دارد. بنابراین به طور کلی استفاده از (u_{max}, h_{max}) جهت بدون بعد ساختن ارتفاع نقطه‌ای و

جدول ۵. ضرایب به دست آمده برای رابطه (۷)

| R^2 | m | α_c | f | u_b |
|-------|-------|------------|------|------------|
| ۰/۹۴ | ۱/۳۶۴ | ۱/۹۱۴ | ۱ | u_{\max} |
| ۰/۹۵ | ۱/۲۸۴ | ۱/۹۳۳ | ۱/۵۲ | \bar{U} |

جدول ۶. مشخصه‌های نسبی پروفیل‌های سرعت جریان غلیظ

| h_{\max}/h | u_{\max}/\bar{U} | h_t/h | h_{\max}/h_t |
|--------------|--------------------|---------|----------------|
| ۰/۲۳۲ | ۱/۴۸۶ | ۱/۹۵۱ | ۰/۱۳۱ |

پیرامون افزایش و با افزایش شیب کاهش پیدا می‌کند. ارتفاع سرعت ماکزیمم و ضخامت بدنه جریان (h و h_{\max}) با افزایش دبی و کشش سیال پیرامون افزایش و با افزایش غلظت و شیب کاهش پیدا می‌کنند. سرعت ماکزیمم و سرعت متوسط (u_{\max} و \bar{U}) نیز با افزایش هر یک از متغیرها افزایش می‌یابند. در بررسی پروفیل‌های بدون بعد سرعت نیز مشاهده شد که در ناحیه دیواره تفاوت چندانی میان پروفیل‌ها در رژیم‌های مختلف جریان وجود ندارد. ولی در ناحیه جت، از آنجا که با افزایش عدد فرود میزان شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد، پروفیل‌های سرعت در این ناحیه ضخیم‌تر می‌شوند. در ادامه نیز ضرایب مربوط به روابط لگاریتمی و توانی در ناحیه دیواره و رابطه شبه گوسی در ناحیه جت، جهت تخمین پروفیل‌های سرعت استخراج گردید که این روابط تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. هم‌چنین نسبت مشخصه‌های پروفیل سرعت به یکدیگر جهت درک بهتر ساختار پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ به دست آورده شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران و دانشکده مهندسی علوم آب تشکر و قدردانی می‌شود. هم‌چنین لازم است از سازمان آب و برق خوزستان به دلیل تقبل بخشی از هزینه‌های این پروژه تشکر و قدردانی شود.

اختلاف بسیار کمی بیشتر، میزان β برابر و مقدار توان n تقریباً نزدیک به متوسط مقادیر ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. در مقایسه ضرایب رابطه شبه گوسی (رابطه ۷) با جدول ۱ در ناحیه جت نیز در حالتی که از u_{\max} برای پارامتر u_b استفاده شود، ضریب f برابر با دیگران، میزان α_c بیشتر و توان m کمتر می‌باشد. در حالتی که از \bar{U} برای پارامتر u_b استفاده گردد، در مقایسه ضرایب حاصله با لی و یو (۲۲) ملاحظه می‌شود که مقدار f و α_c بیشتر و توان m کمتر می‌باشند. در جدول ۶ نیز مشخصه‌های نسبی پروفیل سرعت جریان غلیظ ارائه شده است. در مقایسه مشخصه‌های نسبی ارائه شده توسط برخی از محققین (جدول ۲) با مقادیر به دست آمده در این تحقیق (جدول ۶)، مشخصه‌های نسبی h_{\max}/h و u_{\max}/\bar{U} تقریباً نزدیک به مقادیر ارائه شده توسط سیکه روز (۲۸) می‌باشند. ولی مقادیر h_t/h و h_{\max}/h_t به دست آمده از اعداد ارائه شده توسط سایر محققین به ترتیب بیشتر و کمتر هستند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر شیب، دبی، غلظت و کشش سیال پیرامون بر پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهند که به طور کلی ارتفاعی که در آن سرعت صفر می‌باشد (h_t)، با افزایش دبی، غلظت و کشش سیال

1. Akiyama, J. and H. G. Stefan. 1984. Plunging flow into a reservoir: Theory. *J. Hydraul. Eng.* 110(4): 484-499.
2. Altinakar, S., W. H. Graf and E. J. Hopfinger. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *J. Hydraul. Res.* 28: 55-80.
3. Altinakar, M.S., W.H. Graf and E.J. Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity currents. *J. Hydraul. Res.* 34: 713-718.
4. Baas, J. H., W. V. Kesteren and G. Postma. 2004. Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture. *Intl. Assoc. Sedimentol.* 51: 1053-1088.
5. Blanchette, F., V. Piche, E. Meiburg and M. Strauss. 2005. Evaluation of a simplified approach for simulating gravity currents over slopes of varying angles. *J. Computers & Fluids.* 35: 492-500.
6. De Cesare, G. and A. Schleiss. 1999. Turbidity current monitoring in a physical model flume using ultrasonic Doppler method. 2nd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering.
7. De Cesare, G., A. Schleiss and F. Hermann. 2001. Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. *J. Hydraul. Eng.* 27(1): 6-16.
8. De Cesare, G., J. L. Boillat and A. Schleiss. 2006. Circulation in Stratified Lakes due to Flood-Induced Turbidity Currents. *J. Environ. Eng.* 132(11): 1508-1517.
9. Ellison, T. H. and J.S. Turner. 1959. Turbulent Entrainment in Stratified Flow. *J. Fluid Mech.* 6(3): 423-448.
10. Fathi-Moghadam, M., H. Torabi Poudeh, M. Ghomshi and M. Shafaei. 2008. The density current head velocity in expansion reaches. *J. Lakes & Reservoirs.* 13: 63-68.
11. Fernandez, R.L. and J. Imberger. 2006. Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow. *J. Hydraul. Res.* 44(6): 725-738.
12. Garcia, M. H. 1992. Turbidity Currents. *Encyclopedia of Earth System Science.* Academic Press, San Diego, 4: 399-408.
13. Garcia, M. H. 1993. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. *J. Hydraul. Res.* 119(10): 1094-1117.
14. Garcia, M. H. 1994. Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *J. Hydraul. Eng.* 120(11): 1240-1263.
15. Guetter, A. K. and S. C. Jain. 1991. Analytical solution for density currents in settling basins. *J. Hydraul. Eng.* 117(3): 324-345.
16. Hosseini, S. A., A. Shamsai and B. Ataie-Ashtiani. 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *J. Flow Measurement and Instrument.* 17: 59-68.
17. Huang, H., J. Imran and C. Pirmez. 2005. Numerical Model of Turbidity Currents with a Deforming Bottom Boundary. *J. Hydraul. Eng.* 131(4): 283-293.
18. Huang, H., J. Imran, C. Pirmez, Q. Zhang and G. Chen. 2009. The critical densimetric Froude number of subaqueous gravity currents can be non-unity or non-existent. *J. Sedimentary Res.* 79: 479-485.
19. Inman, D. L., C. E. Nordstrom and R. E. Flick. 1976. Currents in Submarine Canyons: An Air-Sea-Land Interaction. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 275-310.
20. Kashefipour, S. M., F. Kooti and M. Ghomeshi. 2010. Effect of reservoir bed slope and density current discharge on water entrainment. 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, Greece.
21. Keulegan, G. H. 1958. The motion of saline fronts in still water. 12th Progress Report on model laws for density currents. US National Bureau of Standards Report No. 5831, 29 pp.
22. Lee, H.Y. and W.S. Yu. 1997. Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *J. Hydraul. Eng.* 123(6): 520-528.
23. Oehy, C. D. and A. Schleiss. 2004. Management of reservoir sedimentation due to turbidity currents by technical measures. *Hydraulics of Dams and River Structures.* Taylor & Francis Group, London.
24. Oehy, C. D. and A. Schleiss. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *J. Hydraul. Eng.* 133(6): 637- 648.
25. Parker, G., Y. Fukushima and H. M. Pantin. 1986. Self-accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech.* 171: 145-181.
26. Prastowo, T. 2009. On the Nature of Gravity Currents. *J. Matematika Dan Sains.* 14(3): 76-80.
27. Savage, S. B. and J. Brimberg. 1975. Analysis of plunging phenomena in water reservoirs. *J. Hydraul. Res.* 13(2): 187-204.

28. Sequeiros, O. E., B. Spinewine, R. T. Beaubouef, T. Sun, M. H. Garcia and G. Parker. 2010. Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing Over a Mobile Bed. *J. Hydraul. Eng.* 136(7): 412-433.
29. Simpson, J. E. 1997. Gravity currents *In: The Environment and The Laboratory*. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Analyzing Velocity Profiles in Density Current

F. Kooti, S. M. Kashefipour* and M. Ghomeshi¹

(Received: Nov. 27-2010 ; Accepted: May 22-2011)

Abstract

In this paper, velocity profiles were analyzed under different conditions such as bed slope, discharge and concentration of density current, and water entrainment. Experiments were carried out in a tilting flume with the density currents being provided using salt and water solution. Results showed that the above mentioned factors have significant effects on the velocity profile characteristics. Dimensionless velocity profiles were also provided and compared for sub-critical, critical and supercritical flow conditions and the results showed that for super critical conditions the velocity profiles are generally thicker due to the more ambient water entrainment. The coefficients of velocity profile equations were also derived for the jet and wall zones, which showed good agreements with the experimental measurements. Relative values of the velocity profile characteristics were also calculated in order to have a better understanding about the velocity profile structure.

Keywords: Density current, Dams reservoirs, Velocity profile, Water entrainment, Turbidity current.

1. Grad. MSc., Assoc. Prof. and Prof. of Water Instruct., College of Water Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: kashefipour@excite.com