



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع متوالی بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی و نمکی

محمد توننده جانی<sup>۱</sup>، امیر حمزه حقی آبی<sup>۲</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۳</sup> و حسن ترابی بوده<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

مقاله برگرفته از پایان نامه مقطع دکتری

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

یکی از مهمترین عوامل کاهش عمر مفید سدها، جریان غلیظ است که عامل اصلی حرکت رسوبات در مخازن سدها، می باشد. لذا شناخت دقیق این پدیده و شناسایی عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای آن می تواند گامی مؤثر در جهت افزایش عمر مفید سدها باشد. در تحقیق حاضر به بررسی اثر ارتفاع و فاصله سه مانع متوالی در شیب ها و غلظت های مختلف و در دو نوع جریان رسوبی و نمکی بر سرعت های پیشانی و بدنه جریان غلیظ پرداخته شده است. در آزمایشهای از ۴ نوع مدل ارتفاعی و نیز ۳ نوع مدل فاصله ای برای موانع استفاده شد. همچنین آزمایشهای در ۳ شیب و ۲ غلظت و در دو نوع رسوبی و نمکی انجام شد. در مجموع ۱۱۷ آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از سه مانع متوالی در جریان غلیظ نمکی می تواند به طور میانگین سرعت پیشانی را ۳۱ درصد و سرعت بدنه را ۲۰ درصد کاهش دهد و در جریان رسوبی هم به طور میانگین ۳۳ درصد سرعت پیشانی و ۱۹/۵ درصد سرعت بدنه را کاهش داد. همچنین ضریب کثولگان با در نظر گرفتن موانع، میانگین ۰/۴۸ برآورد شد که نسبت به حالت بدون مانع ۲۷ درصد کاهش داشت. در انتها با استفاده از آنالیز ابعادی و نرم افزار SPSS روابطی جهت پیش بینی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ بر اساس ارتفاع هر سه مانع و فاصله آنها و نیز شیب و غلظت جریان ارائه شد.

واژه های کلیدی: جریان غلیظ، موانع متوالی، سرعت پیشانی، سرعت بدنه، ضریب کثولگان.

<sup>۱</sup> - دکتری سازه های آبی دانشگاه لرستان، خرم آباد دانشکده کشاورزی گروه مهندسی آب، شماره تماس: ۰۹۱۵۱۵۳۸۱۲۳ .  
toozandeh.m.986@gmail.com

<sup>۲</sup> - استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان. شماره تماس: ۰۹۱۶۱۶۱۰۵۸۰ . haghiahi.a@lu.ac.ir . (نویسنده مسئول).

<sup>۳</sup> - استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز. ۰۹۱۲۱۷۱۵۷۵۲ . kashfipour@excite.com

<sup>۴</sup> - دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان. ۰۹۱۳۲۲۰۵۱۶۹ . torabi.ha@lu.ac.ir



## مقدمه

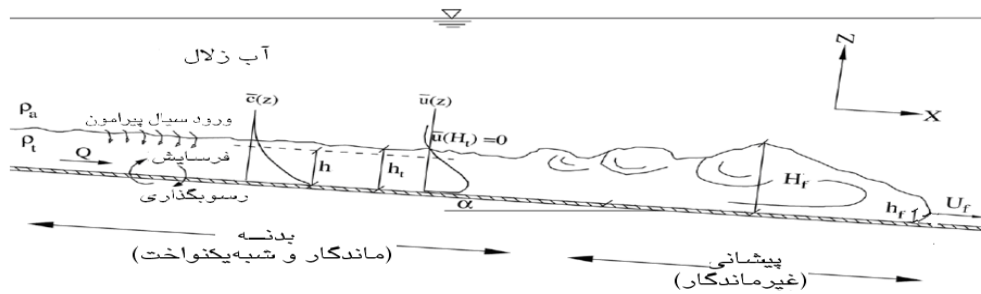
استفاده پایدار از مخازن در امر مدیریت منابع آب مستلزم کنترل رسوبگذاری مخزن و حتی تخلیه رسوب مخزن می باشد. در حال حاضر متوسط سالانه کاهش حجم مفید مخازن در جهان به دلیل رسوبگذاری، بیشتر از تولید سالانه مخازن می باشد (Ohey et al., 2010). هر ساله تقریباً ۲۰ میلیارد تن رسوبات توسط رودخانه های جهان انتقال یافته و در آبهای ساکن ته نشین می گردد (میرباقری، ۱۳۶۸). همچنین کمیسیون بین المللی سدهای بزرگ با در نظر گرفتن حجم موجود تمام سدهای دنیا، اعلام کرده است که سالیانه به طور میانگین، حدود یک درصد از حجم مخازن کاسته شده و پیر از رسوب خواهد شد (ICOLD, 1998). عامل اصلی انتقال این رسوبات تا نزدیکی بدنه سد خصوصاً در مواقع سیلابی که حجم زیادی از رسوبات را به مخازن سدها و دریاچه ها منتقل می کند جریان کدر (Turbidity current) می باشد. جریان غلیظ و یا جریان چگال (Gravity Current) جریانی با چگالی  $\rho_t$  است که ذاتاً به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر روی شتاب جاذبه به وجود می آید. این بدین معنی است که نیروی ثقل به نسبت  $\Delta\rho/\rho_a$  کاهش یافته است. جریان غلیظ شباهت های بسیاری با جریان در مجاری روباز دارد، با این تفاوت که در جریان های غلیظ سیال پیرامون، تأثیر کاهنده ای روی نیروی ثقل داشته و ضریب کاهش به صورت  $\Delta\rho/\rho_a$  می باشد. بنابراین شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می باشد به صورت رابطه (۱) بیان می گردد.

(۱)

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} = g C_s \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

در این رابطه،  $C_s$ : غلظت حجمی متوسط رسوبات غیر چسبنده،  $\rho_a$ : دانسیته سیال پیرامون،  $\rho_t$ :

دانسیته سیال غلیظ،  $\rho_w$ : دانسیته آب می باشد. جریان گل آلود در مخزن سدها اغلب در هنگام سیلاب بوجود آمده و اگر شیب کف زیاد باشد (بیشتر از ۰/۰۰۱) یا پهنای آن کم باشد به حرکت خود ادامه می دهد در این حرکت ذرات درشت تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و فقط جریان ذرات ریزدانه باقی می ماند که می تواند به انتهای مخازن و ساختمان سد برسد (Morris and Alexander, 2003). (Firoozabadi, 2003) تغییر در جهت جریان را در اثر یک مانع گوه ای شکل با دیواره قائم را با جریان نمکی و رسوبی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که یک مانع نسبتاً کوچک می تواند بر الگوی جریان و ضخامت رسوبگذاری تا فاصله قابل ملاحظه ای از مانع تأثیر بگذارد. Piper and Normark (2009) بر روی فرآیندهایی که منجر به ایجاد جریان غلیظ میشوند مطالعاتی انجام دادند. (Islam and Imran, 2010) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرعت متوسط و ساختار تلاطم جریان کدر پایستار انجام دادند. آنها در انجام آزمایشها از سرعت سنج آکوستیک استفاده نمودند و با استفاده از نتایج حاصل سرعت متوسط، انرژی جنبشی توربولانت و تنشهای رینولدزی را استخراج نمودند. Wells et al. (2010) در مورد معادله بین ضریب ورود رسوبات به جریان غلیظ و ضریب سرعت جریان غلیظ مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند. شکل (۱) شماتیکی از جریان غلیظ را نشان می دهد (دریایی ۱۳۹۲)



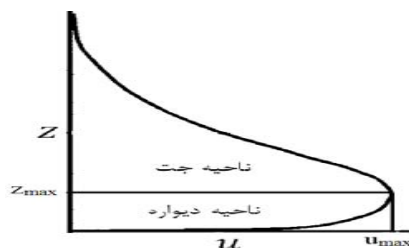
شکل (۱): شماتیکی از یک جریان غلیظ

جریان غلیظ در آزمایش های آنها به صورت زیر بحرانی از طریق رهاشدن ناگهانی ۱ سیال غلیظ در سیال پیرامون ایجاد شده است. آنها به این نتیجه رسیدند که نسبت فاصله بین کف و سرعت حداکثر به ضخامت جریان حدود ۰/۲ می باشد. آنها بدنه جریان غلیظ را با توجه به شکل پروفیل سرعت به دو محدوده دیواره و اختلاط تقسیم نمودند که معادله بخش دیواره همان معادله (۲) می باشد و معادله بخش اختلاط آن به قرار زیر ارائه دادند:

(۳)

$$\frac{u_z}{u_{max}} = \exp\left(-\alpha_c \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}}\right)^m\right)$$

که در آن  $u$ : سرعت متوسط زمانی در فاصله  $z$  از بستر،  $u_{max}$ : سرعت حداکثر،  $h_m$ : فاصله سرعت حداکثر از کف،  $h$  ارتفاع بدنه جریان که از رابطه ۶ به دست می آید.  $m$  و  $\alpha_c$  ضرایب معادله می باشند.



شکل (۲): تفکیک ناحیه جت و دیواره با توجه به پروفیل سرعت در جریان غلیظ

(Altinakar et al. (1996) جریان غلیظ رسوبی را با دو نوع رسوب به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها پروفیل های سرعت و غلظت را در سه مقطع مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توزیع بدون بعد سرعت نسبتاً به تغییرات غلظت غیر حساس می باشد. آنها بدنه جریان غلیظ را به دو قسمت تقسیم کردند. قسمت اول از کف بستر تا ارتفاعی که سرعت جریان غلیظ در آن حداکثر می شود (ناحیه دیواره) و قسمت دوم از جایی که سرعت جریان غلیظ حداکثر می باشد تا انتهای ارتفاع بدنه جریان غلیظ (ناحیه جت). آنها معتقد بودند آشفتگی جریان در ناحیه دیواره ناشی از تأثیر بستر می باشد. همچنین رسوبگذاری در این ناحیه صورت می پذیرد. در صورتی که آشفتگی در ناحیه جت ناشی از اصطکاک جریان با سیال پیرامون می باشد (شکل ۲). آنها معادله زیر را برای بخش دیواره پروفیل سرعت ارائه دادند:

(۲)

$$\frac{u_z}{u_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}}\right)^n$$

که در آن  $u$ : سرعت متوسط زمانی در فاصله  $z$  از بستر،  $u_{max}$ : سرعت حداکثر،  $h_m$ : فاصله سرعت حداکثر از کف و  $n$  ضریب معادله می باشد. نلر و همکاران به بررسی جریان غلیظ به صورت آزمایشگاهی پرداختند.

$$\overline{C_s} = \frac{\int_0^{h_t} C_s u dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (7)$$

که در این روابط،  $U$ : سرعت متوسط بدنه جریان،  $h$ : ارتفاع متوسط بدنه،  $u$ : سرعت بدنه در هر فاصله از کف و  $h_t$  ارتفاعی از بدنه است که سرعت جریان غلیظ صفر می شود، می باشد.  $\overline{C_s}$  غلظت متوسط جریان غلیظ و  $C_s$  غلظت سیال در هر نقطه می باشد. Asghari Pari et al. (2017) در مطالعه ای به بررسی اثر ارتفاع مانع بر رسوب گذاری در مخازن سدها در جریان غلیظ پرداخت. اهداف اصلی و مهم این تحقیق بررسی و شناخت جریان غلیظ رسوبی و نمکی در شرایط مختلف ورودی با در نظر گرفتن اثر شیب، دبی و غلظت و بدون اثر مانع و سپس تعیین ارتفاع نسبی مانع برای توقف جریان غلیظ در شرایط زیر بحرانی و فوق بحرانی می باشد. همچنین در این تحقیق به بررسی شرایط رسوب گذاری در جریان غلیظ رسوبی و اثر کنترلی آن با مانع و مقایسه آن جریان غلیظ نمکی پرداخته شد. در نهایت برای ارتفاع مانع برای کنترل جریان غلیظ نمکی و رسوبی روابطی ارائه شد. زینیوند و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی استفاده از صفحات مشبک برای کنترل جریان غلیظ نمکی پرداخت. در این مطالعه به برداشت و محاسبه دبی و غلظت جریان غلیظ در بالادست و پایین دست صفحه مشبک و بررسی تغییر این دو پارامتر، به همراه بررسی بار رسوبی، پرداخته شد و در ادامه عبور جریان غلیظ از صفحه مشبک و تشکیل مجدد ساختار آن و حجم سیال ورودی بررسی گردید.

مطالعاتی که تاکنون در مورد کنترل جریان غلیظ در مخازن سدها صورت گرفته عمدتاً با در نظر گرفتن یک پارامتر بوده است. به عنوان مثال تنها با ایجاد مانع، پرده حباب، جت قائم و یا مایل اقدام به کنترل این پدیده نموده اند. در مواردی نیز تأثیر توأم دو پارامتر در کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است.

(2014) Daryaei و Kashefipour در مطالعه ای به بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ پرداختند. این مطالعه در چهار ارتفاع زبری و چهار شیب و دو غلظت انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش ارتفاع زبری، سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ کاهش و با افزایش شیب بستر افزایش می یابد. همچنین افزایش شیب باعث کاهش تأثیر زبری در کم کردن سرعت بدنه و پیشانی می شود. رابطه ای نیز براساس مشخصات زبری و شیب برای پیش بینی سرعت جریان غلیظ ارائه دادند. کنولگان (۱۹۵۷ و ۱۹۵۸) در مطالعه ای به بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ در آزمایشگاه پرداخت و نتایج حاصل از آن را به شکل رابطه (۴) بیان نمود.

$$U_f = C_c \sqrt{g' H_f} \quad (4)$$

که در آن  $U_f$  سرعت دماغه جریان،  $C_c$  ضریب تجربی که به ضریب کنولگان معروف است،  $g'$  شتاب ثقل موثر و  $H_f$  ارتفاع پیشانی جریان غلیظ می باشد. کنولگان با انجام آزمایش های مختلف مقدار  $0.7$  را برای  $C_c$  پیشنهاد کرد. حد فاصل مابین جریان غلیظ و سیال پیرامون به آسانی قابل تشخیص نیست لذا برای بدست آوردن عمق و سرعت جریان نیاز به انتگرال گیری در عمق جریان است. Turner (1973) روابط (۷و۶،۵) را برای بدست آوردن عمق و سرعت و غلظت متوسط جریان غلیظ در بخش بدنه آن ارائه نمود.

$$\overline{U} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (5)$$

$$\overline{h} = \frac{(\int_0^{h_t} u dz)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \quad (6)$$

به درون فلوم کنترل می‌شود. در آزمایشهای جریان غلیظ نمکی برای مشاهده و بررسی رفتار این جریان و فیلم برداری از آن، از ماده رنگی پرمگنات پتاسیم به منظور رنگی کردن جریان استفاده شد. در کلیه آزمایشات دبی جریان غلیظ یک لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. فلوم مورد استفاده با یک دریچه در ابتدا به دو قسمت تقسیم و بدین وسیله جریان غلیظ از سیال پیرامون جدا شده و در هنگام شروع آزمایش با استفاده از یک اهرم این دریچه تا ارتفاع مشخص بالا رفته و جریان غلیظ وارد سیال پیرامون می‌شود. در جریان رسوبی که پودر سنگ استفاده می‌شد اندازه متوسط ذرات  $D_{50}$  در حدود ۱۷ میکرومتر،  $D_{84}$  در حدود ۶۳ میکرومتر، و  $D_{16}$  در حدود ۳ میکرومتر می‌باشد. شیب‌های مورد استفاده ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ درصد بوده اند. غلظت‌های مورد استفاده ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر هم در آزمایشهای نمکی و هم در آزمایشهای رسوبی بودند. برای موانع ۳ ارتفاع ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر بدنه جریان غلیظ در نظر گرفته شد. در بحث فواصل موانع نیز ۳ فاصله  $D_1 = D_2$  و  $\frac{D_1}{D_2} = 0.81$  و  $\frac{D_1}{D_2} = 1.23$  در نظر گرفته شد. که  $D_1$  فاصله مانع اول و دوم و  $D_2$  فاصله بین مانع دوم و سوم بود. در تمامی آزمایشهای با توجه به عدد فرود دانسیتمتریک (رابطه ۸) جریان غلیظ در حالت زیربحرانی قرار داشت.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h\cos\theta}} \quad (8)$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه شیب کف،  $U$  سرعت بدنه،  $h$  ارتفاع بدنه و  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته می‌باشد. در ابتدا ۹ آزمایش شاهد شامل ۶ آزمایش نمکی با ۳ شیب و دو غلظت و ۳ آزمایش رسوبی با یک غلظت و ۳ شیب انجام شد تا ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ با استفاده از رابطه‌های (۶ و ۵) محاسبه شود و بر

مانند استفاده از زبری و مانع در کنترل جریان غلیظ. با بررسی مطالعات انجام شده مشاهده می‌شود که در خصوص تغییر فاصله، تغییر ارتفاع و نیز آرایش برای موانع متوالی هم اندازه و تغییر اولویت قرارگیری برای موانع متوالی غیرهم اندازه در بحث تغییر خصوصیات جریان غلیظ هم از نوع رسوبی و هم از نوع نمکی بررسی آزمایشگاهی صورت نگرفته است، بنابراین با توجه به بالا بودن هزینه ناشی از خسارت حاصل از رسوبگذاری در مخازن لازم است در این خصوص بررسی‌های دقیقتری صورت گیرد. همچنین شناخت و بررسی مؤلفه‌های جریان غلیظ در برخورد موانع متوالی و آگاهی درست از وضعیت آنها می‌تواند در کنترل و مهار جریان‌های غلیظ و جلوگیری از خسارات و مشکلات ناشی از این جریان‌ها کمک زیادی بنماید. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر مشترک شیب کف، ارتفاع هر یک از موانع و فاصله موانع از یکدیگر بر روی تغییرات سرعت پیشانی و پروفیل‌های سرعت بدنه جریان غلیظ رسوبی و نمکی و نیز ارائه روابطی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی به منظور تخمین سرعت پیشانی و بدنه در شرایط مختلف می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و روی یک فلوم با عرض ۳۵ سانتی‌متر و طول کلی ۷/۸۱ متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر انجام شد. در این تحقیق از دو نوع جریان غلیظ نمکی و رسوبی استفاده شد. جهت انجام آزمایشات ابتدا جریان غلیظ با مخلوط کردن آب و نمک برای جریان غلیظ نمکی و آب و پودر سنگ برای جریان رسوبی به غلظت دلخواه درون مخزن تهیه و توسط پمپ به یک مخزن به منظور رسیدن به هد ثابت منتقل شد، سپس با استفاده از یک شیر و دبی‌سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی

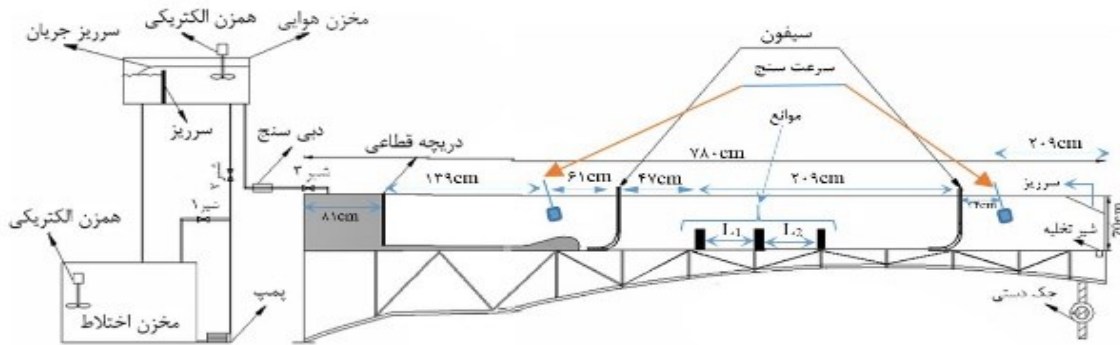


گرفته شد. با توجه به ۴ نوع چیدمان ارتفاعی و ۳ نوع چینش فاصله ای موانع و نیز ۲ غلظت و ۳ شیب و دو نوع جریان رسوبی و نمکی در مجموع ۱۰۸ آزمایش به همراه ۹ آزمایش شاهد انجام شد. لازم به ذکر است آزمایشهای رسوبی تنها با یک غلظت انجام شد. در کلیه آزمایشهای دمای مخزن جریان غلیظ در فلوم و دمای آب ساکن اندازه گیری گردید تا اطمینان حاصل شود که جریان غلیظ تنها ناشی از تفاوت غلظت میان جریان رسوبی و آب شفاف باشد. تفاوت دما حداکثر در حد ۱ درجه سانتی گراد باقی می ماند. چگالی جریان غلیظ و آب ساکن با هیدرومتر اندازه گیری گردیده است. جهت دقت بیشتر در آزمایشهای خصوصاً محاسبه سرعت پیشانی جریان، دریچه به گونه ای طراحی و اجرا گردید، که به طور آبی به اندازه مورد نظر باز گردد. سرعت و ارتفاع پیشانی با استفاده از تکنیک فیلم برداری و علامت گذاری فلوم تعیین شد. برای کنترل دبی ورودی به فلوم از دبی سنج الکترومغناطیسی استفاده شد و شیر خروجی با توجه به تراز آب کالیبره گردید. در جدول شماره (۱) جزئیات ارتفاع و فواصل موانع بیان شده است. در شکل (۳) نیز شماتیک کلی از فلوم و سایر تاسیسات مربوطه آزمایشگاهی و محل نصب موانع و پروب ها آمده است.

اساس آن ارتفاع موانع مشخص شود (Turner, 1973). پروفیل سرعت در دو مقطع، یکی در بالادست موانع و دیگری در پایین دست موانع و با استفاده از سرعت سنج اکوستیک DOP2000 اندازه گیری گردید. در نهایت با این شیب ها و غلظت ها ارتفاع متوسط بدنه برای جریان غلیظ نمکی ۵/۳ سانتی متر و ارتفاع متوسط بدنه در جریان رسوبی ۶/۱ سانتی متر محاسبه شد و بر این اساس و ۴ ارتفاع مورد نیاز موانع لازم از جنس پلاکسی گلاس برش خورد. ارتفاع موانع بدین صورت انتخاب شد که در نوع H1 ارتفاع هر سه مانع ۰/۵ برابر ارتفاع بدنه ( $H_m = 0.5h$ )، در نوع H2 ارتفاع هر ۳ مانع ۰/۷۵ برابر ارتفاع بدنه ( $H_m = 0.75h$ )، در نوع H3 ارتفاع هر ۳ مانع یک برابر ارتفاع بدنه ( $H_m = h$ ) و در نوع H4 ارتفاع مانع اول نیم مانع دوم ۰/۷۵ و مانع سوم نیز یک برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ باشند. با طول مفید فلوم یعنی ۷ متر فواصل موانع به گونه ای در نظر گرفته شد که در بیشترین فاصله موانع بازهم طول کافی برای تشکیل جریان غلیظ بعد از موانع جهت اندازه گیری ها وجود داشته باشد در عین حال قبل از موانع نیز بتوان قبل از رسیدن موج برگشتی حاصل از برخورد با موانع پروفیل سرعت و غلظت را بر داشت نمود. برای فاصله موانع نیز ۳ چینش در نظر

نوع فاصله	فاصله مانع اول و دوم (cm)	فاصله مانع دوم و سوم (cm)	نسبت فواصل (D1/D2)	نوع ارتفاع	ارتفاع نسبی مانع اول ( $H_{m1}$ )	ارتفاع نسبی مانع دوم ( $H_{m2}$ )	ارتفاع نسبی مانع سوم ( $H_{m3}$ )
L1	۵۰	۵۰	۱	H1	۰/۵	۰/۵	۰/۵
L2	۶۵	۸۰	۰/۸۱	H2	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
L3	۸۰	۶۵	۱/۲۳	H3 H4	۱ ۰/۵	۱ ۰/۷۵	۱ ۱

جدول (۱): ارتفاع و فواصل موانع در آرایش های مختلف



کل (۳): شماتیکی از نمای کلی تاسیسات آزمایشگاهی و محل قرارگیری پروب ها و سیفون ها

پس از در نظر گرفتن متغیرهای تکراری و انجام تحلیل ابعادی با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام معادله های (۱۱) و (۱۲) به شرح زیر حاصل شد.

$$(11)$$

$$U_f = f(Hm_1, Hm_2, Hm_3, D_1, D_2, S) \sqrt{g' H_f}$$

$$(12)$$

$$U = f(Hm_1, Hm_2, Hm_3, D_1, D_2, S) \sqrt{g' h}$$

### نتایج و بحث

در کلیه آزمایشهای نمکی محدوده اعداد رینولدز بین ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ و در جریانهای رسوبی بین ۳۱۰۰ تا ۳۹۰۰ بود. همچنین محدوده اعداد فرود دانسی متریک نیز در جریان نمکی بین ۰/۵۱ تا ۰/۷۶ و در جریان رسوبی بین ۰/۵۶ تا ۰/۷۷ بود. بنابراین تمامی آزمایشهای در حالت زیربحرانی و آشفته قرار داشتند. در شکل (۴) نمونه ای از پروفیل های سرعت بدنه قبل و بعد از موانع برای یکی از آزمایش ها نشان داده شده است. هر آزمایش با  $\delta$  حرف مشخص می شد. حرف G غلظت، حرف S شیب، حرف L نوع فاصله، حرف H نوع چیدمان ارتفاعی موانع و حرف R در انتهای نام آزمایش

به منظور ارائه معادله هایی جهت پیش بینی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ با در نظر گرفتن تأثیر همزمان ارتفاع و فاصله موانع و شیب، آنالیز ابعادی صورت پذیرفت. متغیرهای موجود در تحلیل ابعادی برای سرعت پیشانی جریان مطابق معادله (۹) و برای سرعت بدنه جریان مطابق معادله (۱۰) می باشد. از آنجا که دبی در آزمایشهای ثابت بود به عنوان متغیر در نظر گرفته نشد.

$$(9)$$

$$f(U_f, H_f, Hm_1, Hm_2, Hm_3, D_1, D_2, S, g, \rho_a, \rho_f, \nu_s) = 0$$

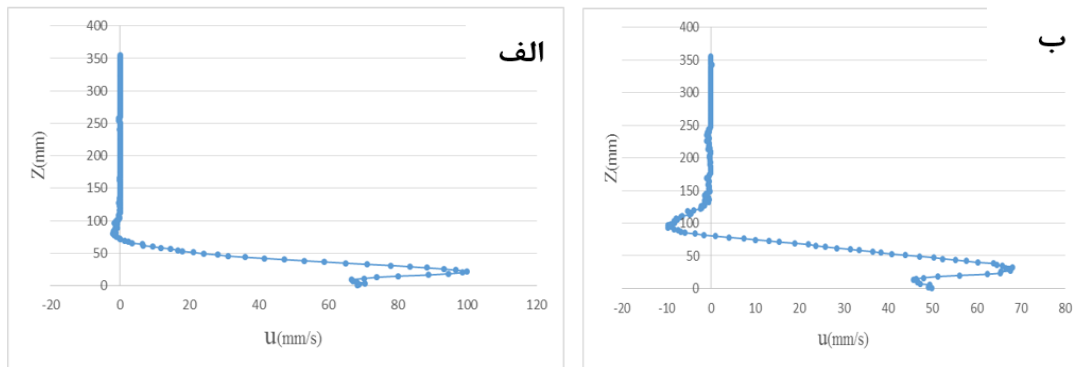
$$(10)$$

$$f(U, h, Hm_1, Hm_2, Hm_3, D_1, D_2, S, g, \rho_a, \rho_f, \nu_s) = 0$$

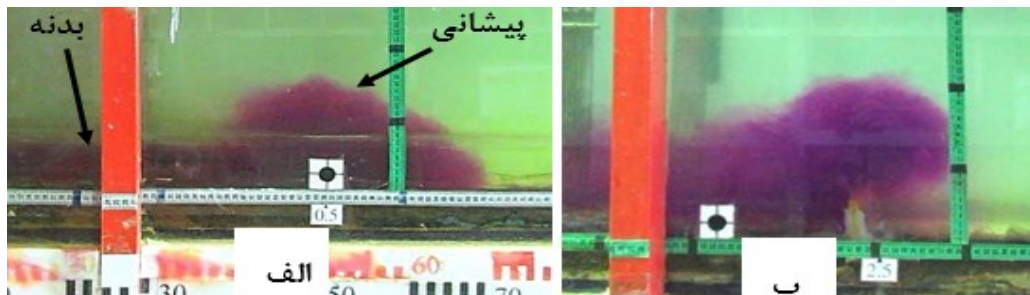
در این معادله ها  $Hm_i$  ها ارتفاع نسبی موانع ۱ تا ۳ (برای پیشانی:  $Hm_i = \frac{H_i}{H_f}$  و برای بدنه  $Hm_i = \frac{H_i}{h}$ )،  $D_1$  و  $D_2$  فواصل نسبی موانع همانند  $Hm_i$ ، S شیب کف،  $H_f$  و  $U_f$  ارتفاع و سرعت پیشانی و  $U$  و  $h$  هم سرعت و ارتفاع بدنه می باشد.

فاصله شماره ۱ و نوع ارتفاع هم شماره ۴ می باشد. در شکل شماره (۵) تصویری از پیشانی و بدنه این آزمایش قبل و بعد از موانع نشان داده شده است.

که در صورت وجود، مشخص کننده رسوبی بودن آزمایش می باشد. به عنوان مثال آزمایش G2S3L1H4 یعنی آزمایش نمکی که غلظت آن شماره ۲ یعنی ۲۰ گرم بر لیتر، شیب آن شماره ۳ یعنی ۲/۵ درصد، نوع



شکل (۴): پروفیل سرعت بدنه آزمایش G2S3L1H4 الف) قبل موانع ب) بعد از موانع



شکل (۵): تصویر آزمایش G2S3L1H4 الف) قبل از موانع ب) بعد از برخورد با موانع

پارامتر برای دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر و در دو نوع رسوبی و نمکی در شکلهای (۶) تا (۸) نشان داده شده است.

#### بررسی تأثیر ارتفاع موانع بر تغییرات سرعت

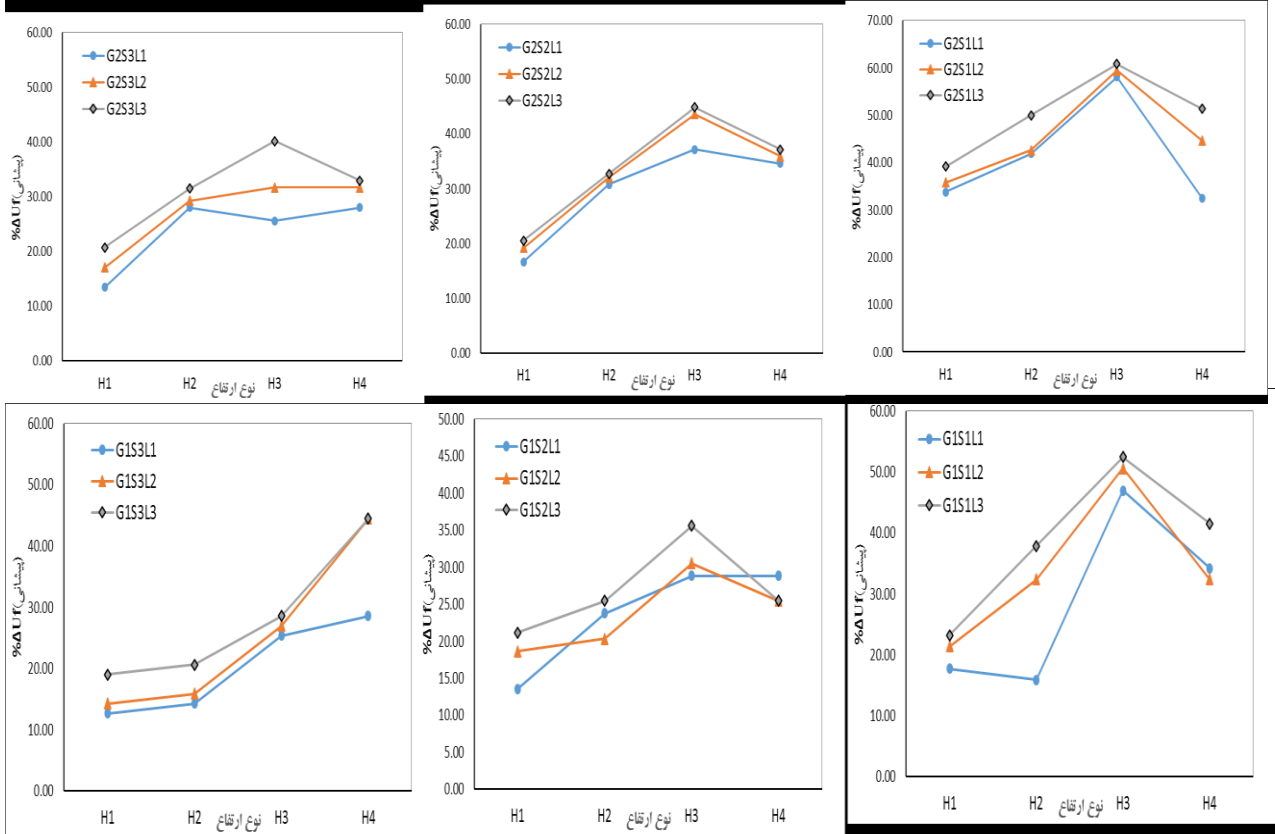
همان طور که از اشکال (۶) تا (۸) دریافت می شود استفاده از ۳ مانع تأثیر زیادی در کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ دارد. به طوری که در مدل ارتفاعی H3 و در شیب S1 و غلظت G2 (۲۰ گرم در لیتر) و چینش فاصله ای L3 در جریان نمکی ۶۰/۸۱ و

وجود موانع باعث ایجاد آشفتگی در پیشانی و بدنه جریان غلیظ و همچنین کاهش غلظت و سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ در هر دو حالت رسوبی و نمکی در برخورد با موانع علی رغم کاهش سرعت افزایش می یافت. این موضوع برای نمونه در آزمایش G2S3L1H4 در پروفیل های سرعت شکل(۴) و نیز تصویر انجام آن در شکل(۵) به خوبی مشخص است. به منظور بررسی تاثیر ارتفاع و فاصله موانع و شیب بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ روند تغییرات این

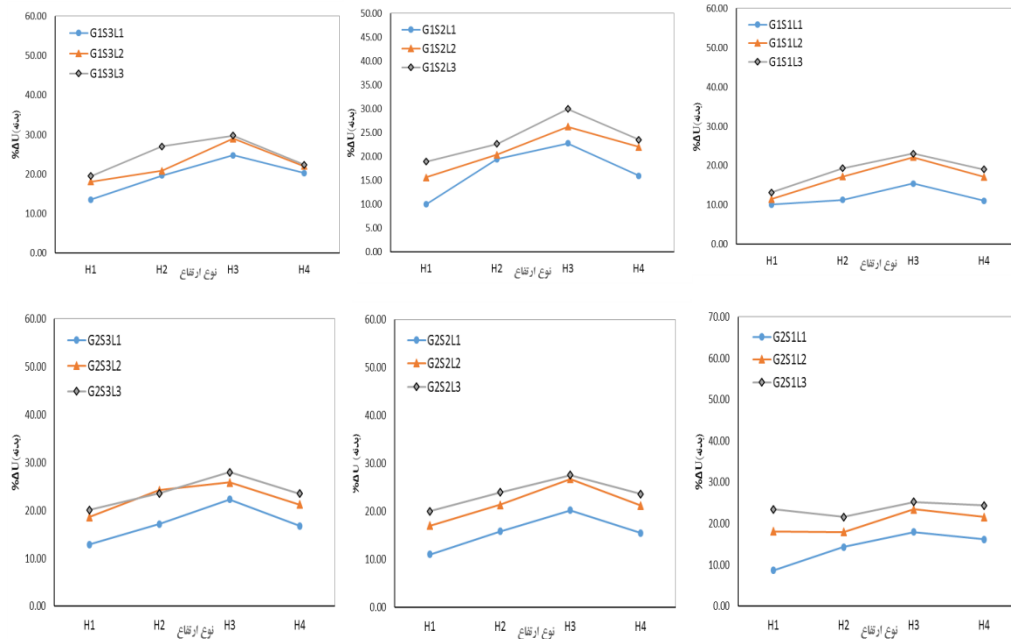


درصد کارایی داشته است. کارایی این نوع مدل از مدل H2 که در آن ارتفاع هر سه مانع  $0/75$  ارتفاع بدنه جریان غلیظ است نیز بیشتر است. در هر دو نوع آزمایشهای رسوبی و نمکی نتایج مشابهی هم در کنترل بدنه و هم در کنترل پیشانی حاصل شد. در تمامی آزمایشهای ابتدا مدل H3 و سپس H4 و بعد H2 و H1 به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ داشته است. به منظور درک بهتر تأثیر سایر پارامترها مانند شیب، غلظت و فاصله موانع بر کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ، نتایج این آزمایشهای در جداول ۲ تا ۴ بیان شده است. آنچه از این جداول دریافت می شود این است که مدل H3 از مدل H4 از مدل H2 از مدل H1 کارآمدتر است. از نتایج مدل H4 می شود اینگونه بیان کرد که چنانچه موانع متوالی غیر هم اندازه به فرم این مدل استفاده شود یعنی از کوچک به بزرگ راندمان آن از اینکه سه مانع با ارتفاع  $0/75$  برابر ارتفاع بدنه استفاده نمود بیشتر است.

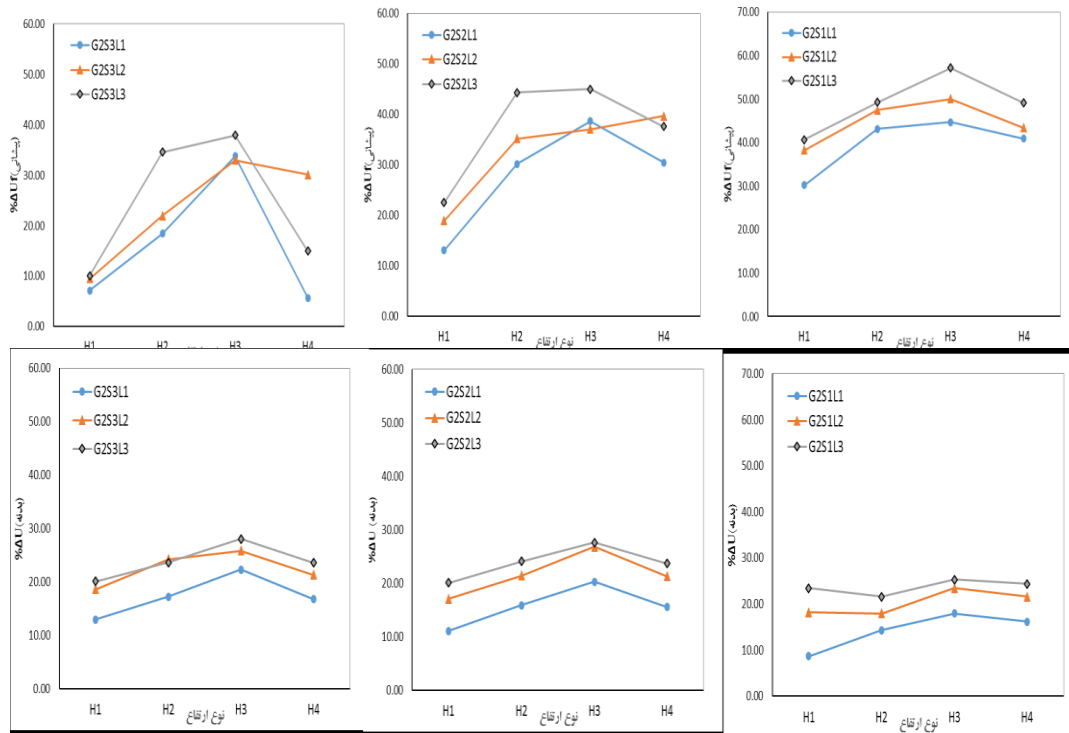
در جریان رسوبی  $57/14$  درصد سرعت پیشانی کاهش یافته است. آنچه که از این اشکال دریافت می شود این است که در بین ۴ مدل ارتفاعی برای موانع، بیشترین کاهش را مدل H3 که در آن هر سه مانع، ارتفاعی برابر با بدنه جریان غلیظ داشتند، داشته که در بحث کاهش سرعت پیشانی جریان نمکی به طور میانگین  $40/41$  درصد و کاهش سرعت پیشانی جریان رسوبی  $41/89$  درصد کارایی داشته است. در کاهش سرعت بدنه نیز به کار بردن سه مانع با ارتفاع برابر بدنه جریان غلیظ یعنی مدل H3 در جریان نمکی به طور میانگین  $24/47$  و در جریان رسوبی  $23/55$  درصد کارایی داشته است. بعد از مدل H3 بیشترین تأثیر را در کاهش سرعت پیشانی و بدنه هم در جریان نمکی و هم در جریان رسوبی مدل H4 داشته است. در این مدل ارتفاع مانع اول  $0/5$ ، مانع دوم  $0/75$  و مانع سوم نیز یک برابر بدنه جریان غلیظ می باشد. این مدل در بحث کاهش سرعت پیشانی جریان نمکی به طور میانگین  $35/22$  درصد و کاهش سرعت پیشانی جریان رسوبی  $32/42$



شکل (۶): تغییرات درصد کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ در انجام آزمایشهای نمکی



شکل (۷): تغییرات درصد کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ در انجام آزمایشهای نمکی



شکل (۸): تغییرات درصد کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ در انجام آزمایشهای رسوبی

۳۱/۵۱ درصد و مدل L3 به طور میانگین ۳۴/۸۸ درصد در کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ مؤثر بوده اند. در کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ نمکی نیز به طور میانگین مدل L1: ۱۵/۹۶ درصد، مدل L2: ۲۰/۸۲ درصد و مدل L3 هم ۲۳/۰۶ درصد کارایی داشته اند. در کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ رسوبی نیز مدل L1: ۲۸/۰۲ درصد، مدل L2: ۳۳/۶۹ درصد و مدل L3 نیز به طور میانگین ۳۶/۹۲ درصد مؤثر بوده است. در کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ رسوبی مدل L1: ۱۵/۷ درصد، مدل L2: ۱۹/۰۲ درصد و مدل L3 هم ۲۳/۹۸ درصد کارایی داشته اند. همان طور که از اشکال ۶ تا ۸ نیز دیده می شود در تمامی آزمایشهای در ارتفاع و شیب و غلظت ثابت هم در کاهش سرعت پیشانی و هم در سرعت بدنه مدل L3 از L2 و L1

#### بررسی تأثیر فاصله موانع بر تغییرات سرعت

در این تحقیق ۳ مدل برای فواصل موانع در نظر گرفته شد. در مدل L1 فاصله ی بین مانع اول و دوم ۵۰ سانتی متر (D1) و فاصله بین مانع دوم و سوم نیز ۵۰ سانتی متر بود (D2). یعنی  $D_1 = D_2$ . در مدل L2 فاصله مانع اول و دوم ۶۵ و مانع دوم و سوم هم ۸۰ سانتی متر بود. یعنی  $\frac{D_1}{D_2} = 0.81$ . در مدل L3 فاصله مانع اول و دوم ۸۰ و فاصله مانع دوم و سوم هم ۶۵ سانتی متر بود یعنی  $\frac{D_1}{D_2} = 1.23$ . با توجه به جداول ۲ تا ۴ و نیز اشکال ۶ تا ۸ مشاهده می شود که در تمام آزمایشهای کارایی مدل L3 از مدل L2 و از مدل L1 بیشتر است. در آزمایشهای نمکی مدل L1 به طور میانگین ۲۷/۹۷ درصد، مدل L2 به طور میانگین



جریان غلیظ رسوبی در کاهش سرعت پیشانی شیب صفر، ۴۴/۵ درصد، در شیب ۱/۵، ۳۲/۷۱ درصد و در شیب ۲/۵ درصد، ۲۱/۴۱ درصد کارایی داشته اند. از نظر سرعت بدنه جریان غلیظ رسوبی این موانع در شیب صفر ۲۵/۸۷ درصد، در شیب ۱/۵، ۱۶/۲۳ درصد و در شیب ۲/۵ درصد هم ۱۶/۷ درصد تأثیر داشته اند. مشاهده می شود که هم در آزمایشهای نمکی و هم در آزمایشهای رسوبی افزایش شیب در تمام ارتفاع ها و فاصله ها و غلظت ها باعث کاهش عملکرد موانع در کنترل بار رسوبی پیشانی و بدنه جریان غلیظ می شوند. دلیل این پدیده را می توان کاهش سرعت در شیب صفر درصد و افزایش میزان ته نشینی رسوبات از جریان غلیظ و به تبع آن کاهش 'g' (عامل حرکت جریان غلیظ) نسبت به شیب ۲/۵ درصد دانست. دریایی و همکاران (۱۳۹۲) نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با افزایش شیب تأثیر زبری به دلیل کاهش جریانهای برگشتی کاهش می یابد.

#### بررسی تأثیر غلظت بر کارایی موانع متوالی

در این تحقیق در انجام آزمایشهای جریان غلیظ نمکی از دو غلظت استفاده شد. غلظت اول (G1) ۱۰ گرم در لیتر و غلظت دوم (G2) ۲۰ گرم در لیتر. با توجه به ۷۲ آزمایشی که با این دو غلظت انجام شد مشاهده شد که با افزایش غلظت تأثیر موانع بر کنترل جریان غلیظ افزایش می یابد. این روند در جداول ۲ تا ۴ و نیز اشکال ۶ تا ۸ مشاهده می شود. زینیوند (۱۳۹۴) نیز به این نتیجه رسید که با افزایش غلظت راندمان صفحات مشبک در کنترل پارامترهای جریان غلیظ افزایش می یابد.

مؤثرتر بوده است. می توان دریافت که با افزایش فاصله موانع به دلیل استهلاک انرژی جریان و نیز رسوب گذاری جریان میزان کنترل جریان غلیظ افزایش می یابد. در مدل های L2 و L3 با اینکه فاصله بین مانع اول و آخر یکسان است ولی در مدل L3 فاصله بین مانع اول و دوم بیشتر از مانع دوم و سوم است و در عین حال کارایی آن نیز بیشتر است که این امر هم در آزمایشهای رسوبی و هم نمکی مشاهده شد. این نشان دهنده این است که در استفاده از ۳ مانع فاصله مانع اول و دوم مهمتر و تأثیرگذارتر از فاصله مانع دوم و سوم است. پس افزایش فاصله موانع منجر به کاهش بیشتر سرعت جریان غلیظ می شود و چنانچه فاصله مانع اول و دوم نیز بیشتر از فاصله مانع دوم و سوم باشد این کنترل بیشتر است.

#### بررسی تأثیر شیب بر تغییرات سرعت جریان غلیظ

در جداول ۲ تا ۴ در انتهای هر ستون که شامل S1، S2 و S3 می باشد میانگین کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ آورده شده است. با توجه به این جداول و اشکال ۶ تا ۸ مشاهده می شود که در تمام آزمایشهای با افزایش شیب تأثیر موانع در کاهش سرعت جریان غلیظ کاهش می یابد به طوری که در آزمایشهای نمکی در شیب S1 یعنی شیب صفر کاهش سرعت پیشانی ۳۹/۸۶ درصد، در شیب S2 یعنی شیب ۱/۵ درصد به طور میانگین ۲۸/۴۵ درصد و در شیب S3 یعنی شیب ۲/۵ درصد به طور میانگین ۲۶/۱ درصد بوده است. در کاهش بدنه این مقادیر عبارت بودند از در شیب صفر ۱۷/۶۲ درصد، در شیب ۱/۵، ۲۰/۵ درصد و در شیب ۲/۵ درصد هم ۲۱/۷۲ درصد. در



جدول (۲): درصد کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ نمکی توسط ۳ مانع

میانگین	میانگین	G2			G1			L	H
		S3	S2	S1	S3	S2	S1		
۲۱،۰۱	۱۷،۹۸	۱۳،۴۱	۱۶،۶۷	۳۳،۷۸	۱۲،۷۰	۱۳،۵۶	۱۷،۷۳	L1	H1
	۲۱،۰۷	۱۷،۰۷	۱۹،۲۳	۳۵،۸۱	۱۴،۲۹	۱۸،۶۴	۲۱،۳۹	L2	
	۲۳،۹۸	۲۰،۷۳	۲۰،۵۱	۳۹،۱۹	۱۹،۰۵	۲۱،۱۹	۲۳،۲۲	L3	
۲۹،۱۷	۲۵،۷۷	۲۸،۰۵	۳۰،۷۷	۴۱،۸۹	۱۴،۲۹	۲۳،۷۳	۱۵،۹۰	L1	H2
	۲۸،۷۴	۲۹،۲۷	۳۲،۰۵	۴۲،۵۷	۱۵،۸۷	۲۰،۳۴	۳۲،۳۶	L2	
	۳۳،۰۱	۳۱،۴۶	۳۲،۶۹	۵۰،۰۰	۲۰،۶۳	۲۵،۴۲	۳۷،۸۴	L3	
۴۰،۴۱	۳۷،۰۲	۲۵،۶۱	۳۷،۱۸	۵۸،۱۱	۲۵،۴۰	۲۸،۸۱	۴۶،۹۸	L1	H3
	۴۰،۴۸	۳۱،۷۱	۴۳،۵۹	۵۹،۴۶	۲۶،۹۸	۳۰،۵۱	۵۰،۶۴	L2	
	۴۳،۷۴	۴۰،۱۲	۴۴،۸۷	۶۰،۸۱	۲۸،۵۷	۳۵،۵۹	۵۲،۴۷	L3	
۳۵،۲۲	۳۱،۱۱	۲۸،۰۵	۳۴،۶۲	۳۲،۴۳	۲۸،۵۷	۲۸،۸۱	۳۴،۱۹	L1	H4
	۳۵،۷۴	۳۸،۷۱	۳۵،۹۰	۴۴،۵۹	۴۴،۴۴	۲۵،۴۲	۳۲،۳۶	L2	
	۳۸،۸۰	۳۲،۹۳	۳۷،۱۸	۵۱،۳۵	۴۴،۴۴	۲۵،۴۲	۴۱،۵۰	L3	
	۳۱،۴۵	۲۷،۵۱	۳۲،۱۰	۴۵،۸۳	۲۴،۶۰	۲۴،۷۹	۳۳،۸۸	میانگین	

جدول (۳): درصد کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ نمکی توسط ۳ مانع

میانگین	میانگین	G2			G1			L	H
		S3	S2	S1	S3	S2	S1		
۱۵،۵۸	۱۱،۰۳	۱۲،۹۱	۱۱،۰۸	۸،۶۴	۱۳،۵۶	۹،۹۵	۱۰،۰۳	L1	H1
	۱۶،۵۰	۱۸،۶۰	۱۷،۰۸	۱۸،۱۲	۱۸،۱۳	۱۵،۶۱	۱۱،۴۶	L2	
	۱۹،۲۰	۲۰،۱۱	۲۰،۰۶	۲۳،۴۱	۱۹،۵۳	۱۸،۹۵	۱۳،۱۶	L3	
۱۹،۸۹	۱۶،۳۰	۱۷،۱۹	۱۵،۸۸	۱۴،۲۹	۱۹،۶۸	۱۹،۴۷	۱۱،۲۹	L1	H2
	۲۰،۳۴	۲۴،۲۲	۲۱،۴۰	۱۷،۹۴	۲۰،۸۷	۲۰،۳۸	۱۷،۲۰	L2	
	۲۳،۰۲	۲۳،۶۰	۲۴،۰۲	۲۱،۵۹	۲۷،۰۱	۲۲،۶۳	۱۹،۳۱	L3	
۲۴،۴۷	۲۰،۵۸	۲۲،۳۰	۲۰،۲۶	۱۷،۹۴	۲۴،۷۸	۲۲،۷۸	۱۵،۴۱	L1	H3
	۲۵،۵۸	۲۵،۸۵	۲۶،۸۱	۲۳،۴۱	۲۹،۰۱	۲۶،۲۵	۲۲،۱۴	L2	
	۲۷،۲۵	۲۷،۹۹	۲۷،۵۷	۲۵،۲۴	۲۹،۷۴	۲۹،۹۶	۲۳،۰۲	L3	
۱۹،۸۵	۱۵،۹۴	۱۶،۷۳	۱۵،۵۳	۱۶،۱۲	۲۰،۲۸	۱۵،۹۵	۱۱،۰۲	L1	H4
	۲۰،۸۸	۲۱،۲۶	۲۱،۲۵	۲۱،۵۹	۲۲،۰۰	۲۲،۰۱	۱۷،۱۴	L2	
	۲۲،۷۵	۲۳،۵۴	۲۳،۶۷	۲۴،۳۲	۲۲،۳۹	۲۳،۵۳	۱۹،۰۴	L3	
	۱۹،۹۵	۲۱،۱۹	۲۰،۳۸	۱۹،۳۸	۲۲،۲۵	۲۰،۶۲	۱۵،۸۵	میانگین	

جدول (۴): درصد کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی توسط ۳ مانع

میانگین	میانگین	درصد کاهش سرعت بدنه			میانگین	میانگین	درصد کاهش سرعت پیشانی			L	H
		S3	S2	S1			S3	S2	S1		
۱۴،۲۶	۹،۷۹	۸،۰۶	۸،۹۳	۱۲،۳۶	۲۱،۱۴	۱۶،۷۹	۷،۱۲	۱۳،۰۶	۳۰،۱۷	L1	H1
	۱۳،۷۶	۱۱،۲۹	۱۱،۷۹	۱۸،۲۱		۲۲،۲۱	۹،۴۶	۱۸،۹۲	۳۸،۲۵	L2	
	۱۹،۲۳	۱۸،۵۸	۱۶،۸۸	۲۲،۲۲		۲۴،۴۲	۱۰،۰۵	۲۲،۵۵	۴۰،۶۷	L3	
۱۸،۶۰	۱۴،۲۰	۹،۶۸	۱۰،۷۱	۲۲،۲۲	۳۶،۰۵	۳۰،۵۸	۱۸،۴۵	۳۰،۱۸	۴۳،۱۱	L1	H2
	۱۸،۲۶	۱۳،۷۱	۱۶،۰۷	۲۵،۰۰		۳۴،۸۵	۲۱،۹۳	۳۵،۱۶	۴۷،۴۶	L2	
	۲۳،۳۳	۲۲،۵۸	۱۹،۶۴	۲۷،۷۸		۴۲،۷۱	۳۴،۶۰	۴۴،۳۱	۴۹،۲۳	L3	
۲۳،۵۵	۲۰،۱۸	۱۸،۶۶	۱۲،۵۰	۲۹،۳۹	۴۱،۸۹	۳۹،۰۲	۳۳،۷۸	۳۸،۶۴	۴۴،۶۴	L1	H3
	۲۳،۴۲	۱۶،۶۸	۱۹،۶۴	۳۳،۹۴		۴۰،۰۰	۳۲،۹۶	۳۷،۰۴	۵۰،۰۰	L2	
	۲۷،۰۶	۲۵،۸۱	۲۱،۴۳	۳۳،۹۴		۴۶،۶۶	۳۷،۸۸	۴۴،۹۶	۵۷،۱۴	L3	
۲۱،۸۶	۱۸،۶۳	۱۶،۶۱	۱۴،۲۹	۲۵،۰۰	۳۲،۴۲	۲۵،۶۸	۵،۶۸	۳۰،۴۵	۴۰،۸۹	L1	H4
	۲۰،۶۵	۱۴،۵۲	۱۹،۶۴	۲۷،۷۸		۳۷،۶۹	۳۰،۰۹	۳۹،۶۶	۴۳،۳۳	L2	
	۲۶،۳۰	۲۴،۱۹	۲۳،۲۱	۳۱،۴۸		۳۳،۸۸	۱۴،۹۵	۳۷،۶۰	۴۹،۱۱	L3	
	۱۹،۵۷	۱۶،۷۰	۱۶،۲۳	۲۵،۷۸		۳۲،۸۷	۲۱،۴۱	۳۲،۷۱	۴۴،۵۰	میانگین	

### معادله های توسعه یافته برای سرعت جریان غلیظ

(۱۴)

$$U = (0.65 - 0.05Hm_1 - 0.045Hm_2 - 0.043Hm_3 - 0.008D_1 - 0.001D_2 + 6.238S)\sqrt{g'h}$$

به منظور بررسی دقت روابط (۱۳) و (۱۴) پارامترهای آماری  $R^2$  و  $\alpha$  که به ترتیب ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون می باشند استفاده شد. هر چه این مقادیر به یک نزدیک تر باشند تخمین معادلات بهتر خواهد بود. همچنین درصد خطا (E%) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) نیز برای این معادلات حساب شد و در جدول (۵) ارائه شده است.

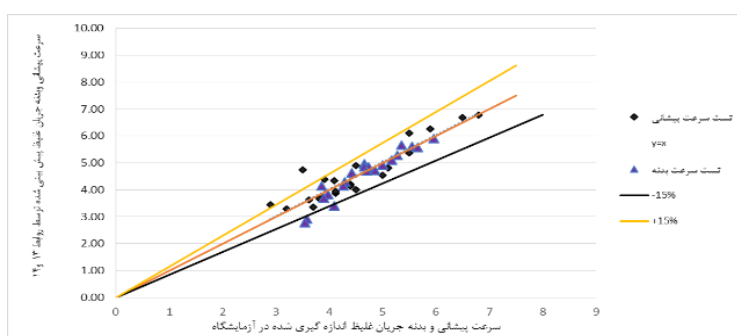
جدول (۵): نتایج بررسی های آماری معادلات (۱۳) و (۱۴)

RMSE(cm/s)	E%	$\alpha$	$R^2$	
۰,۴۰	۷,۴۱	۱,۰۲	۰,۸۵	رابطه ۱۳
۰,۳۴	۵,۹۶	۱,۰۲	۰,۸۱	رابطه ۱۴

معادله های (۱۱) و (۱۲) مشابه معادله (۴) می باشند. ضریب کثولگان برای این تحقیق به طور میانگین برای پیشانی در آزمایشهای نمکی ۰/۴۲ و در آزمایشهای رسوبی ۰/۳۶ به دست آمد. که نسبت به نتایج سایر محققین از جمله کثولگان که ۰/۷ پیشنهاد داده بود کمتر برآورد شد. دلیل این امر به کار بردن موانع در مسیر جریان غلیظ می باشد. این ضریب به طور میانگین ۰/۳۵ درصد کاهش یافت. در معادله های (۱۱) و (۱۲) ضریب  $\sqrt{g'H_f}$  و  $\sqrt{g'h}$  تابعی از ارتفاع هریک از موانع، فاصله موانع و شیب می باشد. برای محاسبه این ضرایب با استفاده از ۸۰ درصد آزمایشهای (۸۶ سری) هم در سرعت بدنه و هم در سرعت پیشانی از نرم افزار SPSS استفاده شد. سپس با ۲۰ درصد (۲۲ سری) باقی مانده صحت سنجی روابط انجام شد. معادله های حاصل به صورت زیر است:

(۱۳)

$$U_f = (0.62 - 0.25Hm_1 - 0.15Hm_2 - 0.144Hm_3 - 0.008D_1 - 0.003D_2 + 4.864S)\sqrt{g'H_f}$$



شکل (۹): بررسی دقت معادلات (۱۳) و (۱۴) در بازه  $\pm 15\%$

بینی میزان سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ می باشند. لازم به ذکر است معادله های فوق در مورد جریان های غلیظ در حالت زیر بحرانی و متلاطم صادق

با توجه به جدول فوق به نظر می رسد معادله های (۱۳) و (۱۴) با دقت نسبتاً قابل قبولی قادر به پیش



با افزایش شیب از صفر تا ۲/۵ درصد اثر موانع متوالی در کنترل سرعت جریان غلیظ به دلیل افزایش مومنتوم و کاهش جریان‌های برگشتی و کاهش رسوبگذاری، کاهش می‌یابد.

با استفاده از نرم افزار SPSS ضریب کتولگان برای پیشانی و بدنه به صورت تابعی از ارتفاع و فاصله نسبی موانع و شیب کف محاسبه شد. بررسی دقت معادله‌های حاصله نشان داد که این معادله‌ها قادر به پیش‌بینی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ با دقت نسبتاً قابل قبولی می‌باشند.

می‌باشند. در شکل (۹) مقایسه دیگری بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و پیش‌بینی شده توسط معادله‌های (۱۳) و (۱۴) در محدوده  $\pm 15\%$  صورت پذیرفته است با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود محدوده نسبتاً قابل قبولی از نتایج در بازه مورد بررسی قرار گرفته است. به نحوی که برای سرعت پیشانی در حدود ۹۰ درصد و برای سرعت بدنه در حدود ۸۶ درصد از داده‌ها در مرحله  $\pm 15\%$  درصد واقع شده‌اند.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی اثر موانع متوالی هم‌اندازه و غیر هم‌اندازه در کنترل جریان غلیظ نمکی و رسوبی در شرایط مختلف دبی و شیب پرداخته شد. در این تحقیق از ۴ نوع مدل ارتفاعی، ۳ نوع مدل فاصله برای موانع در سه شیب و دو غلظت استفاده شد. آزمایش‌های در دو نوع رسوبی و نمکی انجام شد. در مجموع ۱۰۸ آزمایش انجام شد. ۹ آزمایش نیز بدون مانع و جهت تعیین ارتفاع بدنه در شیب‌ها و غلظت‌های مختلف انجام شد. از انجام آزمایش‌های نتایج زیر حاصل شد.

استفاده از موانع متوالی با ارتفاع کمتر نسبت به یک مانع با ارتفاع بلند می‌تواند سرعت جریان غلیظ را کاهش دهد. این امر به دلیل یکسری جریان‌های برگشتی و کاهش غلظت جریان غلیظ به دلیل افزایش ضریب اختلاط و ورود بیشتر سیال پیرامون به درون جریان در اثر برخورد با موانع می‌باشد.

با افزایش ارتفاع و فاصله موانع میزان کنترل سرعت جریان غلیظ نیز افزایش می‌یابد. همچنین فاصله بین مانع اول و دوم در کاهش سرعت از فاصله مانع دوم و سوم مهمتر است. بیشترین تأثیر را در کاهش سرعت جریان غلیظ استفاده از موانعی با ارتفاع یک برابر بدنه جریان غلیظ دارد سپس موانعی که از کوچک به بزرگ و ارتفاع ۰/۵، ۰/۷۵ و یک برابر ارتفاع بدنه دارند.



## منابع

باقری، س.ا. ۱۳۶۸. مطالعات تکنیکی در بر آورد رسوبات حوزه آبریز، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، مهتاب قدس، ۶۶۸-۶۵۲.

دریایی، م.، کاشفی پور، س.م. و م. قمشی. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی، مجله علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، (۳): ۳۱-۲۱.

زینیوند، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای صفحات مشبک روی کنترل جریان غلیظ نمکی، رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.

کاهه، م. و قمشی، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ بر روی سطوح زبر، رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.

Altinakar, M. S., Graf, W. H. and E. J., Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity current. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 34(5): 713-718.

Asghari Pari, S. A., Kashefipour, S.M., Ghomeshi, M., 2017. An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), pp. 1080-1092.

Firoozabadi, B., B. Farhanieh and M. Rad. 2003. Hydrodynamics of 2-D laminar turbidity current, *J. Hydr. Res.*, 41(6):623-630.

ICOLD (International Commission on Large Dams). 1998. Word Register of Dams. 1998 book and CD-ROM. ICOLD, Paris, France.

Keulegan, G.H. 1958. The motion of saline fronts in still water. 12th Progress Report on Model Laws for Density Currents, U.S. Nat. Bur. Standards, No.5831.

Morris, S.A. and J. Alexander. 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current, *Journal of Sedimentary Research*, 73:621-629. *Research A64* (4):899-909.

Ohey, C. D., Cesar, G. D. and Schleiss, A. J., 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 48(1), pp. 81-90.

Ohey, C. D., Cesar, G. D. and Schleiss, A. J., 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 48(1), pp. 81-90.

Piper, D.J.W. and W.R. Normark. 2009. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: A marine geology perspective: *Journal of Sedimentary Research*, 79(6):347-362.

Turner, J. S., 1973. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press London, U.K., pp. 178-181.

Wells, M., Cenedese, C., Caulfield, C.P., 2010. The relationship between flux coefficient and entrainment ratio in density currents. *Journal of Physical Oceanography* 40(12), 2713-2727.





## Experimental Investigation of the Effect of Height and Distance of Successive Obstacles on Head and Body Velocities in Sedimentary and salty Density Current

MohammadToozandehjani<sup>1</sup>, AmirHamze. Haghiabi<sup>2</sup>, Seyyed Mahmood. Kashefipour<sup>3</sup>, Hassan Torabi Poudch<sup>4</sup>

### Abstract

Density current is one of the most important phenomenon in reduction the useful life of dams, that it is the main cause of the sediment movement in the dam reservoirs. Therefore, Study of density or gravity current hydrodynamics plays an important role in increasing the economic life of dams though reduction in sediment accumulation. In this research the effect of the height and distance of successive obstacles and bed slope on the head and body velocity of density current has been studied. In the experiments, four types of height models and 3 types of distance model were used for obstacles. Also, the experiments were carried out in 3 slope and 2 concentration and in two sedimentary and salty types. In total 117 experiments were carried out. The results showed that the head and body velocities decreased with increasing height and distance of obstacles and increased with increasing bed slope. Also, the results showed that using of 3 rows of obstacles can reduce the head and body velocity of salty density current about 31 and 20% respectively, in comparison with the conditions without obstacles. In sedimentary density current numerical values of this reduction was 33 and 19.5 respectively for the head and body velocity. The Keulegan coefficient for estimating head velocity results decreased about 27% in comparison with the conditions without obstacles, with its mean value being obtained about 0.48. However, increasing the bed slope reduces the effect of obstacles in decreasing of head and body velocity. Finally, two equations were developed using Spss software to estimate the head and body velocities of density current based on height of each three obstacles, distance of obstacles and bed slopes.

**Keywords:** density current, successive obstacles, head velocity, body velocity, Keulegan coefficient.

<sup>1</sup> -PhD Graduate of hydraulic structures, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Khoram Abad, Iran. 09151538123, toozandeh.m.986@gmail.com,

<sup>2</sup> - Professor, Faculty of Agriculture, Water Department, University of Lorestan, Khoram Abad, Iran. 09161610580, haggiabi.a@lu.ac.ir. (Corresponding Author).

<sup>3</sup> -Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. kashefipour@excite.com

<sup>4</sup> - Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Water Department, University of Khoram Abad, Lorestan, Iran. torabi.ha@lu.ac.ir