

## مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر ارتفاع مانع در مهار سرعت جریان گل آلود در شرایط تغییر ناگهانی شیب بستر مخزن

شیوا کشتکار<sup>۱</sup>، سید علی ایوب زاده<sup>۲\*</sup>، مسعود قدسیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۳ صص: ۷۰-۵۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۱

### چکیده

جریان گل آلود مهمترین پدیده در رسوبگذاری در مخازن، بویژه در نزدیکی دیواره‌ی سد در محل قرارگیری سازه‌هایی مانند آبگیرهای تحتانی، بوده و می‌تواند باعث کاهش عمر مفید مخازن گردد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی نیم‌رخهای بی‌بعد شده‌ی سرعت جریان گل آلود، در یک نمونه فیزیکی از مخزنی که یک تغییر شیب در بستر خود دارد، پرداخته و اثر وجود مانع در تغییر الگوی رسوبگذاری جریان گل آلود، در حالتی که جریان با غلظت‌های مختلف وارد مخزن می‌گردد، بررسی شده است. روابط جداگانه‌ای برای نیم‌رخهای بی‌بعد شده‌ی سرعت در حالت‌های مختلف ارائه و مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج مقایسه‌ی ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  در نیم‌رخهای بی‌بعد شده‌ی سرعت حاکی از این مطلب است که وجود مانع در مسیر جریان باعث کاهش غلظت جریان گل آلود عبوری از روی مانع گشته، و با افزایش ارتفاع مانع، عملکرد آن در جهت تنظیم رسوبگذاری جریان بیشتر شده است. همچنین، نتایج مقایسه‌ی نیم‌رخهای سرعت و بده جریان گل آلود در طول مخزن حاکی از کاهش سرعت به میزان ۲۰ تا ۵۰ درصد، و همچنین کاهش بده جریان عبوری از روی مانع با ارتفاع نسبی ۰/۰۹۱ تا ۰/۰۲۷۳، به ترتیب به میزان ۲۰ تا ۶۰ درصد بوده و نشان دهنده‌ی این مطلب است که جریان گل آلود شکل گرفته بعد از مانع، جریان گل آلود ضعیف‌تری بوده، و این عملکرد با افزایش ارتفاع مانع بیشتر شده است. به‌علاوه، نتایج نشان داده‌اند که ناحیه‌ی فشانه جریان بیشترین نقش را در تغییرات بده جریان گل آلود داشته، و عمده‌ی تغییرات بده در این ناحیه اتفاق افتاده است.

**کلمات کلیدی:** جریان گل آلود، مخزن سد، مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مانع، شکست شیب، نیم‌رخ سرعت.

<sup>۱</sup> - دانش آموخته دکتری سازه های آبی دانشگاه تربیت مدرس.

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۶۴۹۰۲ - ایمیل: [shkeshtkar@gmail.com](mailto:shkeshtkar@gmail.com)

<sup>۲</sup> - استاد، عضو هیئت علمی گروه سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

تلفن: ۰۹۱۲۳۹۰۶۲۹۱ - ایمیل: [ayyoub@modares.ac.ir](mailto:ayyoub@modares.ac.ir) و [ayyoubzadeh@yahoo.com](mailto:ayyoubzadeh@yahoo.com)

<sup>۳</sup> - استاد، عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس.

تلفن: ۰۹۱۲۳۲۷۵۴۵۶ - ایمیل: [ghods@modares.ac.ir](mailto:ghods@modares.ac.ir)

\* - نویسنده مسوول مقاله: [ayyoub@modares.ac.ir](mailto:ayyoub@modares.ac.ir) و [ayyoubzadeh@yahoo.com](mailto:ayyoubzadeh@yahoo.com)

## مقدمه

مخزن سد، به دلیل ساکن نگه‌داشتن حجم زیاد آب از یک طرف، و ورود و خروج آب رودخانه از طرف دیگر، به صورت چشمگیری تعادل طبیعی را تغییر داده و به تله-اندازی برای به دام انداختن رسوبات تبدیل می‌شود. رسوبات جمع شده به مقدار زیادی ظرفیت مخزن را کاهش می‌دهند. انباشتن رسوبات، می‌تواند خطر انسداد سازه‌های آبگیر و تخلیه‌کننده‌های تحتانی را ایجاد کند، و یا به درجه‌هایی که برای عبور رسوبات طراحی نشده‌اند، صدمه بزند (وارما و همکاران، ۲۰۰۰). مشاهده‌های میدانی تصدیق می‌کنند که جریان‌های گل‌آلود عامل اصلی انتقال رسوبات ریزدانه به مخازن سدها، به خصوص در نزدیکی بدنه‌ی آنها می‌باشند. به طور کلی، مشخص گردیده است که سدهای جهان سالانه ۱ تا ۲٪ از حجم مخازن خود را به دلیل رسوبگذاری از دست می‌دهند (اشلایس و اوهی، ۲۰۰۲). هنگامی که جریان گل‌آلود به بدنه‌ی سد می‌رسد، کارمای جنبشی آن تبدیل به کارمای بالقوه می‌شود و یک لایه‌ی گل‌آلود شکل می‌گیرد. بعد از مدتی، رسوبات ریز ته‌نشین می‌شوند و می‌توانند تخلیه‌کننده‌های تحتانی و آبگیر نیروگاهها را بیوشانند. لازم به ذکر است که تخلیه‌کننده‌های تحتانی و آبگیر نیروگاهها معمولاً یا در نزدیکی سد و یا در خود بدنه‌ی آن قرار دارند (فیروز آبادی و همکاران، ۲۰۰۳).

نکته‌ی دیگر قابل ذکر این است که، در مخازن طبیعی سدها وجود تغییراتی در شیب بستر امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. در طبیعت، چنین تغییر شیبی گاه‌به‌گاه می‌تواند باعث ایجاد پرش آبی داخلی در جریان گل‌آلود گردد. چنین تغییر شیبی می‌تواند با تغییر در وضعیت جریان تاثیر عمده‌ای را در فرسایش و رسوبگذاری داشته باشد، به گونه‌ای که چنانچه ناحیه‌ای پرشیب به ناحیه‌ای کم شیب متصل شود، این مسأله باعث ایجاد جریان فرسایشی در ناحیه‌ی پرشیب گردیده، و فرسایش رسوبات و تقویت جریان گل‌آلود را سبب شود، در حالی که جریان واقع در ناحیه‌ی کم شیب جریانی رسوبگذار خواهد بود (کومار، ۱۹۷۱).

از طرفی، از آنجا که وجود مانع در دگرگونی مسیر

حرکت جریان گل‌آلود و تغییر توزیع ته‌نشینی رسوبات حمل شده به وسیله‌ی این جریان تاثیر گذار است، در برخی موارد سعی شده است که حرکت این جریان به وسیله‌ی مانع، یا موانعی که در مسیر حرکت قرار داده می‌شود، با هدف تغییر توزیع رسوبگذاری در مخزن و جلوگیری از ته‌نشینی رسوبات در نزدیکی بدنه‌ی سد، تغییر داده شود. هنگامی که جریانی گل‌آلود به یک مانع برخورد می‌کند، مقداری از سیال چگال‌تر، مادامی که یک پرش آبی به سمت بالادست شکل بگیرد، روی مانع جریان می‌یابد (اوهی و اشلایس، ۲۰۰۱). بنابراین، شناختن رفتار جریان گل‌آلود در این تغییر شیب‌ها در بستر مخازن در راستای بررسی مهار جریان گل‌آلود با مانع می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققین قرار دهد.

## مروری بر تحقیقات گذشته

بررسی‌های میدانی جریان‌های گل‌آلود در عمق زیاد مخزن سدها بسیار مشکل، پرهزینه و وقت‌گیر است (بردفورد و کاتوبز، ۱۹۹۹)؛ بنابراین، بیشتر بررسی‌های انجام شده در مورد این گونه جریان‌ها به صورت آزمایشگاهی و یا نرم‌افزارهای ریاضی بوده است (فیروز آبادی، ۱۳۷۸). میگان و همکاران (۲۰۱۱)، آب-پویایی جریان‌های گل‌آلود موجود در طبیعت را با استفاده از داده‌های صحرایی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داده‌اند که پرش آبی، که می‌تواند بر اثر کاهش شیب ایجاد شود، باعث افت ناگهانی سرعت جریان گل‌آلود شده و رسوبات جریان در این ناحیه به صورت ناگهانی ته‌نشین می‌گردند. گارسیا و پارکر (۱۹۹۳)، در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، پرش آبی صورت گرفته در یک جریان گل-آلود ناشی از شکست شیب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که تغییرات ایجاد شده در وضعیت جریان گل-آلود (تبدیل جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی بر اثر پرش آبی) باعث کاهش شدید تنش برشی بستر جریان در پایین دست پرش آبی می‌شود.

کوستیک و پارکر (۲۰۰۷)، شرایطی را که در آن

<sup>3</sup> hydrodynamic

<sup>1</sup> kinetic energy

<sup>2</sup> potential energy

یافتند. اوهی و همکاران (۲۰۱۰)، تاثیر موانع نفوذپذیر و نفوذناپذیر را در جریان‌های گل‌آلود در سدها به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده، و معیاری را برای ارتفاع مانع جهت انسداد کامل جریان گل‌آلود ارائه داده‌اند. نتایج آنها نشان داده‌اند که ارتفاع مانع، در صورتی که بیش از دو برابر ارتفاع جریان گل‌آلود در سر جریان باشد، به احتمال زیاد، جریان گل‌آلود را به طور کامل به وسیله‌ی مانع نفوذناپذیر مسدود خواهد کرد.

در تحقیقی که به وسیله‌ی موریس و الکساندر (۲۰۰۳)، انجام شد، تاثیر مانع گوه‌ای شکل، در مورد الگوی جریان و نحوه‌ی رسوبگذاری به صورت آزمایشگاهی مطالعه گردید. نتایج نشان داده‌اند، که حتی موانع کم ارتفاع نیز می‌توانند، در الگوی رسوبگذاری تا فواصل بسیار دور از مانع در پایین دست، نقش مهمی را ایفا کنند.

کابزا و همکاران (۲۰۰۹)، عبور جریان گل‌آلود را از روی دو مانع با شکل‌های نیم استوانه‌ای و منشوری به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها نشان دادند که در هر دو نوع مانع، چهار ویژگی مختلف جریان در پایین دست مانع اهمیت می‌یابند، که به دقت بررسی شده‌اند. این ویژگی‌ها عبارتند از، پرش آبی داخلی، جریان زیر بحرانی، ناپایداری کلین-هلملتز در فصل مشترک دو سیال و ریزش امواج.

بوریسک و ودز (۲۰۰۰)، تاثیر پستی بلندی‌های بستر را بر چگونگی ته‌نشینی جریان‌های گل‌آلود به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داده‌اند که، تا زمانی که جریان مسدود نشده، و یا بستر شامل تنگ شدگی، برآمدگی و یا بازشدگی ناگهانی نباشد، شکل ته‌نشینی به صورت نمایی کاهش پیدا کرده و هیچ‌گونه عدم پیوستگی در ضخامت رسوبهای ته‌نشینی دیده نمی‌شود.

اصغری‌پری و همکاران (۱۳۸۸)، اثر غلظت جریان گل‌آلود ورودی را در حضور مانع دوزنقه‌ای شکل بررسی کردند. بررسی‌های آنها نشان دادند که در جریان‌های فوق بحرانی اثر مانع در مقایسه با جریان‌های زیر بحرانی کمتر است. ماروسی و همکاران (۱۳۸۸)، تغییر الگوی رسوبگذاری را در مخازن سدها با استفاده از یک مانع دوزنقه‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از این مطلب بوده‌اند، که رسوبگذاری در طول

جریان گل‌آلود فوق بحرانی همراه با تشکیل پرش آبی از یک شیب تند به مخزنی با شیب صفر منتقل می‌شود مورد مطالعه قرار دادند. آنها اشاره کرده‌اند که چنانچه شیب کف مخزن به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، وقوع جریان گل‌آلود فوق بحرانی محتمل بوده، و چنانچه شیب به اندازه‌ی کافی ملایم باشد، که جریان گل‌آلود آرامی شکل بگیرد، وقوع جریان گل‌آلود زیر بحرانی قابل انتظار است. در تحقیق دیگری که به وسیله‌ی برهمند و شمسانی (۲۰۱۰) صورت گرفته است، ضمن اشاره به این نکته که پرش آبی می‌تواند تاثیر بسزایی را در آب-پویایی جریان گل‌آلود داشته باشد، پرش آبی در این‌گونه جریان‌ها به صورت نظری و آزمایشگاهی با توجه به میزان زبری بستر، بررسی شده است.

پرش آبی به صورت آزمایشگاهی نیز به وسیله‌ی ریگر و همکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۶)، در شرایط بستر صاف مورد مطالعه قرار گرفته است. ایشان یک معادله را جهت محاسبه‌ی نسبت اعماق مزدوج در پرش آبی جریان گل‌آلود به عنوان تابعی از عدد فرود چگالی بالادست، و میزان اختلاط آب صاف به درون جریان، پیشنهاد داده‌اند. بهرامی و همکاران (۱۳۸۸)، تاثیر شکست شیب بستر را در مورد جریان گل‌آلود به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داده است که بیشترین تغییر در مشخصه‌های جریان در قسمت شیبدار اتفاق می‌افتد، به طوری که سرعت جریان در انتهای این ناحیه بین ۴۰ تا ۶۲ درصد نسبت به ابتدای آن افزایش می‌یابد.

استفان و همکاران (۲۰۰۳)، تغییر در جهت جریان را به علت وجود یک مانع هنگام عبور جریان غلیظ به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان دادند که ممکن است یک مانع نسبتاً کوچک ضخامت بستر و الگوی جریان اولیه را تحت تاثیر قرار دهد. دیسزار و همکاران (۲۰۰۶)، تاثیر برخورد جریان گل‌آلود را با مانع نفوذناپذیر، مانع نفوذپذیر و فشانه آب را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان در تحقیق مزبور به این نتیجه رسیدند که مانع نفوذناپذیر، به شرطی که به قدر کافی بلند باشد (حدوداً دو برابر ضخامت خود جریان گل‌آلود)، می‌تواند جریان را تا حدود صد در صد مسدود کرده و از رسیدن آن به بدنه‌ی سد جلوگیری کند. اوهی و اشلیس در سال (۲۰۰۱) تاثیر مانع را بر تغییر توزیع رسوبگذاری در مخازن سدها بررسی کردند؛ آنها نیز به نتیجه‌ی مشابهی دست

مخزن، به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

ناجی (۱۳۹۲)، تاثیر وجود یک و دو مانع با اشکال مختلف مثلثی، نیم استوانه‌ای و دوزنقه‌ای را در مهار جریان گل‌آلود در شرایط مختلف غلظت و بده جریان ورودی، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج وی حاکی از آن بوده است که مانع نه تنها در مهار سرعت پیشانی جریان تا حدود ۳۵ درصد موثر بوده است، بلکه نقش بسیار مهمی را در تغییر الگوی رسوبگذاری جریان گل‌آلود در مخازن سدها دارا می‌باشد؛ وجود دو مانع به جای یک مانع در مسیر جریان، به شرط آن که فاصله‌ی مناسبی بین آنها در نظر گرفته شده باشد، این عملکرد را بهبود می‌بخشد. آنچه در این تحقیق مورد توجه قرار خواهد گرفت، عبارتند از: بررسی تاثیر وجود مانع و ارتفاع آن در مخزنی که در طول خود دارای یک تغییر شیب ناگهانی می‌باشد در شرایط متفاوت غلظت جریان گل‌آلود ورودی به مخزن، بر الگوی جریان گل‌آلود و نیم‌رخهای سرعت جریان.

### انگاره جریان گل‌آلود

جریان غلیظ یا گرانشی<sup>۱</sup>، جریانی با چگالی ( $\rho_t$ ) است که ذاتاً بر اثر اختلاف چگالی ( $\Delta\rho$ ) با سیال پیرامون خود که دارای چگالی  $\rho_a$  است، بر شتاب گرانش ( $g$ ) به وجود می‌آید. این جریان، مادامی که شتاب گرانش به وسیله‌ی نسبت  $\rho\Delta/\rho_a$  کاهش یافته است، رخ می‌دهد. در واقع، شتاب گرانش کاهش یافته، سبب ایجاد نیروی محرکه‌ی جریان وزنی بوده، و به صورت رابطه‌ی ذیل بیان می‌گردد (گراف و آلتیناکار، ۱۹۹۸):

$$g' = g \left( \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \quad (1)$$

جریان غلیظ حاوی ذرات جامد معلق جریان گل‌آلود<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (ترنر، ۱۹۷۳). یک جریان گل‌آلود مطابق شکل ۱ از یک جبهه یا نوک پیش رونده به داخل سیال محیط خود تشکیل یافته است که به وسیله‌ی بدنه‌ای دنبال می‌شود. نیروی محرک و جلوبرنده برای یک جبهه‌ی جریان شیب فشار می‌باشد، که ناشی از اختلاف چگالی بین جبهه‌ی جریان و سیال محیط اطراف خود است؛ در این حالت جریان غیر دائمی است. نیروی محرکه‌ی بدنه‌ی جریان از نوع نیروی گرانشی است که بر اثر سنگین شدن

سیال ایجاد می‌گردد؛ این نوع جریان اغلب به صورت دائمی فرض می‌شود (گراف و آلتیناکار، ۱۹۹۸). به طور معمول، فصل مشترک بین جریان گل‌آلود و سیال محیطی به راحتی قابل تشخیص نیست، و به همین دلیل، با استفاده از مقیاس انتگرال‌گیری از جریان داریم (ترنر، ۱۹۷۳):

$$UH = \int_0^{\infty} u dz = \int_0^{H_t} u dz = \bar{U}H_t = q \quad (2)$$

$$U^2H = \int_0^{\infty} u^2 dz = \int_0^{H_t} u^2 dz = \eta \bar{U}^2 H_t \quad (3)$$

که در آنها  $u$  سرعت در ارتفاع  $z$  از بستر و  $H_t$  ارتفاع نقطه‌ای از جریان گل‌آلود است که دارای سرعت صفر بوده، و  $\bar{U}$  متوسط سرعت جریان گل‌آلود و  $\eta$  ضریب توزیع سرعت بوسینیسک،  $H$  و  $U$  نیز به ترتیب عمق کلی و سرعت متوسط سیال در مخزن و  $q$  بده واحد عرض جریان گل‌آلود در طول مخزن می‌باشند. در این تحقیق با استفاده از روابط فوق، و با فرض ضریب توزیع سرعت برابر واحد، مقادیر متوسط سرعت،  $\bar{U}$  و ارتفاع جریان گل‌آلود،  $H_t$  بدست آمده‌اند. همچنین، روابط بی‌بعدی برای نیم‌رخ سرعت جریان گل‌آلود، پیشنهاد خواهد شد.

بدنه‌ی جریان گل‌آلود شامل دو ناحیه‌ی دیواره با آشفتگی بستری، و فشانه با آشفتگی درون آمیختگی سیال پیرامونی به داخل جریان گل‌آلود است، که هر یک دارای توزیع معینی از سرعت جریان می‌باشد. ناحیه‌ی دیواره از بستر تا ارتفاع  $H_m$ ، یعنی جایی که سرعت حداکثر،  $u=U_m$ ، اندازه‌گیری می‌شود، امتداد می‌یابد. مطابق شکل (۲)، در ناحیه‌ی دیواره،  $z < H_m$ ، آشفتگی در ناحیه‌ی دیواره (بستر) ایجاد شده و شامل فرایندهای رسوبگذاری و فرسایش است. توزیع سرعت،  $u$ ، برای یک جریان گل‌آلود در نواحی دیواره و فشانه به صورت زیر است (شکل ۲):

۱- در منطقه‌ی دیواره یا بستر،  $z < H_m$ ، که توزیع

سرعت به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{u(z)}{U_m} = \left( \frac{z}{H_m} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

<sup>۲</sup>turbidity current

<sup>۱</sup>density current

<sup>۲</sup>gravity current

کاملاً مسدود شود، سرعت در ناحیه‌ی مشترک کاملاً منفی بوده و جریان به سمت بالادست منتقل می‌گردد. مشترک ایجاد شده می‌تواند شکل‌های مختلفی را داشته باشد، که بر اساس نسبت ارتفاع مشترک به ضخامت جریان گل‌آلود اولیه‌ی نزدیک شونده، طبقه‌بندی می‌گردند. این نسبت وابسته است به سرعت جریان گل‌آلود نزدیک شونده به مانع، چگالی جریان و شیب مخزن در بالادست مانع.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، قویترین نوع این موج‌ها، مشترک نوع ج می‌باشد، که توسط ادوارد و همکاران نامگذاری شده، و در این نوع موج جریان گل‌آلود مزبور به وسیله‌ی آن کاملاً پوشیده شده است، (شکل ۴-الف). ممکن است پدیده‌ی اختلاط در بالاترین بخش این مشترک اتفاق بیفتد. مشترک نوع ب موجی است با پیشانی ملایم‌تری نسبت به مشترک نوع ج (شکل ۴-ب). همچنین، مشترک نوع الف، تشکیل شده از قطاری از امواج منفرد داخلی، نوع دیگری از این اشترکها می‌باشد. گفته شده است که مطالعات چندانی در مورد تاثیر شدت لایه‌بندی جریان بر قدرت این اشترکها انجام نشده، اما به نظر می‌رسد که احتمالاً هرچه لایه‌بندی قوی‌تر باشد، اشترک ایجاد شده نیز قوی‌تر است (نلر و بوکی، ۲۰۰۰).

شکل ۵ تصاویری از برخورد جریان گل‌آلود را با مانع استفاده شده در این تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، جریان پس از برخورد با مانع ارتفاع گرفته و کارماید جنبشی آن به کارماید بالقوه تبدیل شده تا بتواند از مانع عبور کند. اشترک یا بور ایجاد شده در جریان برگشتی به‌خوبی دیده می‌شود. همچنین، در شکل ۵ پرش آبی ایجاد شده در جریان بعد از عبور از مانع دیده می‌شود که دارای طولی کمتر از یک متر می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت، بررسی جهت شناختن سازوکارهای جریان گل‌آلود در تعامل با مانع یا موانع، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از این نوع جریان‌ها را در اختیار محققین قرار دهد. در مطالعه‌ی حاضر، تاثیر شکست شیب کف مخزن، بر تغییرات طولی سرعت متوسط و بده جریان گل‌آلود، و همچنین نیم‌رخهای عمقی سرعت جریان گل‌آلودی که با مانع برخورد می‌کند، دیده شده است، که این موضوع در تحقیقات پیش از این مورد مطالعه قرار نگرفته است.

که در آن  $\alpha$  یک ثابت تجربی بوده و مقدار آن تقریباً برابر ۶ است (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶).

۲- در منطقه‌ی فشانه،  $z > H_m$ ، تاثیر پسا در مرز بالایی بر نیم‌رخ سرعت به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی یک لایه‌ی چگال لایه‌ای با ضخامت محدود بین دو سیال همگن شبیه‌سازی می‌گردد. توزیع سرعت در ناحیه‌ی بیرونی به‌وسیله‌ی یک رابطه‌ی شبه گوسن مشخص می‌شود. آشفتگی در این ناحیه به‌وسیله‌ی اصطکاک و درون

$$\frac{u(z)}{U_m} = \exp[-\beta \left(\frac{z-H_m}{H-H_m}\right)^\gamma] \quad (5)$$

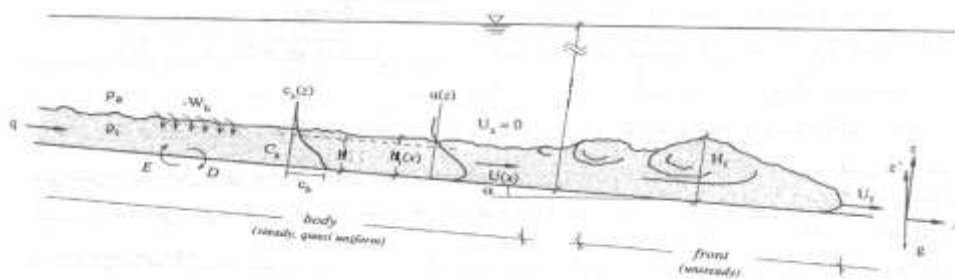
در رابطه‌ی فوق  $\gamma$  یک توان، و  $\beta$  یک ضریب تجربی می‌باشد. در این رابطه  $\beta \cong 1.4$  در نظر گرفته می‌شود (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶).

از طرفی، رفتار یک جریان گل‌آلود در برخورد با مانع به ارتفاع مانع نسبت به ضخامت جریان گل‌آلود بستگی دارد (شکل ۳).

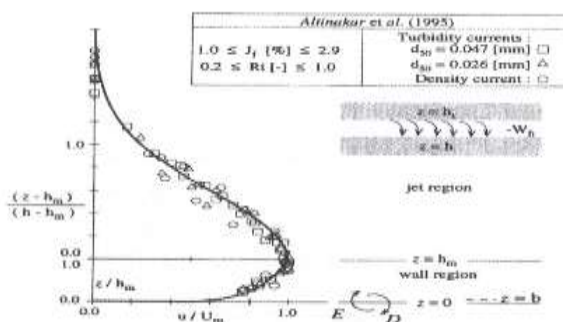
زمانی که ارتفاع مانع به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ضخامت جریان گل‌آلود بیشتر باشد، جریان پس از برخورد با مانع در امتداد آن به سمت بالادست حرکت می‌کند، تا جایی که به ارتفاعی معادل دو برابر ضخامت جریان اولیه‌ی نزدیک شونده برسد (شکل ۳-الف)، به همین دلیل، برخی از محققین حداقل ارتفاع لازم را برای مانع جهت انسداد کامل جریان ۲ تا ۲/۵ برابر ضخامت جریان گل‌آلود می‌دانند. پس از آن یک اشترک<sup>۱</sup> (بور)، یا یک موج منفرد ایجاد شده، که به سمت بالادست در حرکت است.

زمانی که مانع خیلی کوچکتر از ضخامت جریان گل‌آلود باشد (شکل ۳-د)، این مانع تنها می‌تواند اثر بسیار ضعیفی را بر جریان داشته باشد. چنانچه ارتفاع مانع از دو برابر ضخامت جریان گل‌آلود کمتر باشد (شکل ۳-ب و ج)، مقداری از جریان می‌تواند از مانع عبور کرده و یک موج منفرد را به سمت بالادست ایجاد کند. در این حالت، جریان اصلی، که در زیر قرار دارد، دارای رفتار متفاوتی از جریان ابری شکلی که به سمت بالادست در حرکت است، دارد. گفته شده است که حداقل ارتفاع لازم مانع جهت مسدود کردن کامل جریان، معادل ارتفاع موج بازگشتی به سمت بالادست بعد از برخورد جریان گل‌آلود به مانع ( $h_b$  در شکل ۳) می‌باشد (آلکساندر و موریس، ۱۹۹۴). زمانی که جریان

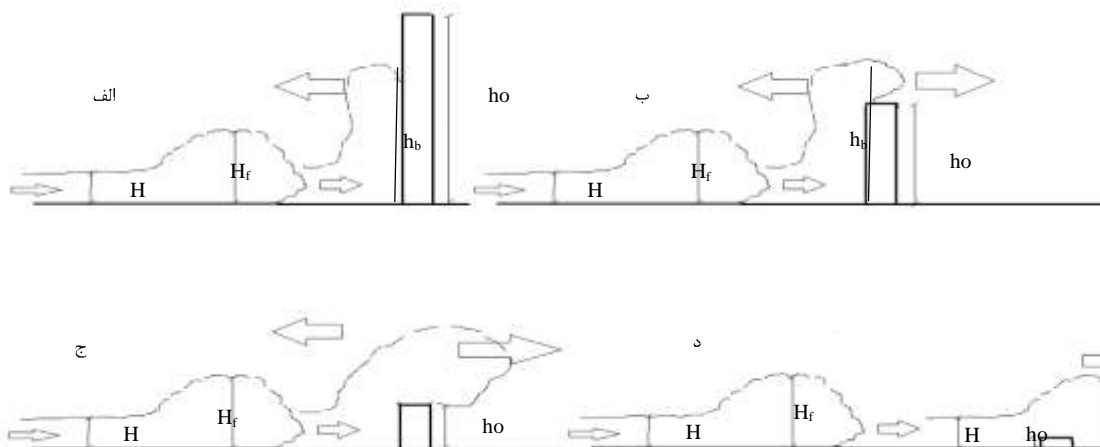
<sup>۱</sup>bore



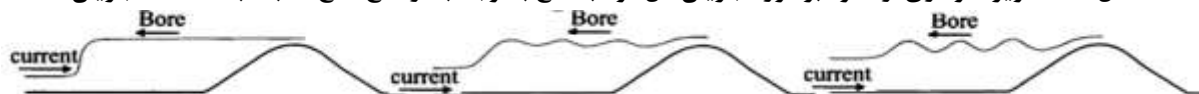
شکل ۱- تصویر نموداری از جریان گل‌آلود و فراسنج‌های مربوط به آن.



شکل ۲- نیم‌رخهای سرعت اندازه‌گیری شده برای انواع جریان گل‌آلود.



شکل ۳- تصویر نموداری از نحوه برخورد جریان گل‌آلود با مانع با توجه به ارتفاع مانع نسبت به ضخامت جریان.



شکل ۴- تصویر نموداری از برخورد جریان با ارتفاعهای مختلفی از مانع (Rottman and Simpson, 1989).



شکل ۵- تصاویری از برخورد جریان با غلظت

## روش انجام تحقیق

در این تحقیق تاثیر ارتفاع‌های مختلف مانع و غلظت‌های ورودی متفاوت جریان گل‌آلود، در مخزنی که دارای یک شکست شیب ناگهانی در وسط طول خود است، بر نیم‌رخهای سرعت جریان گل‌آلود بررسی می‌شود. آزمایش‌ها در مخزنی به طول ۱۱ متر و عرض ۳۱ سانتی-متر که در انتهای خود جهت جلوگیری از برگشت جریان، دارای یک پله به طول ۷۰ سانتی-متر و عمق ۳۰ سانتی-متر، همراه با ۲۰ شیر زهکش جهت خروج جریان می‌باشد، انجام شد. لازم به ذکر است که، پنج و نیم متر اول مخزن، دارای شیبی حدود ۸ درصد است (با هدف ایجاد جریان گل‌آلود فوق بحرانی در شیب تند) و شش متر انتهایی مخزن، دارای شیبی نزدیک صفر (۰/۲۵ درصد) می‌باشد. اثر دو غلظت مختلف از جریان گل‌آلود ورودی (۳ و ۱۲ گرم بر لیتر)، و سه مانع مثلثی شکل با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی-متر بر نیم‌رخهای سرعت جریان گل‌آلود بررسی شده است. شکل ۶ نمایی از مخزن و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده را در این مطالعه نشان می‌دهد. از کائولن با قطر متوسط ۳ میکرون برای تولید جریان گل-آلود استفاده شده است. جریان در تمام آزمایش‌ها با بده ثابت و یکسان ۲۲/۳ لیتر بر دقیقه از زیر دریچه‌ای که بازشدگی معادل ۴ سانتی-متر دارد، بعد از این‌که کل مخزن از آب صاف پر شد، وارد آن می‌گردد و از زیر آب صاف مسیر خود را تا رسیدن به پله‌ی انتهایی و خروج از مخزن طی می‌کند. نیم‌رخهای سرعت به وسیله‌ی سرعت‌سنج نقطه‌ای صوتی<sup>۱</sup> در وسط عرض مخزن و در ارتفاع‌های خاصی از کف آن، به نحوی که در هر نیم‌رخ، بسته به ضخامت جریان گل‌آلود در محل مورد نظر، از ۲۰ تا ۴۵ نقطه به فواصل ۲ میلی‌متری تا یک سانتی‌متری (در نزدیکی بستر فواصل نقاطی از نیم‌رخ که برداشت داده در آنها صورت پذیرفته، در حد میلی‌متر بوده و در نزدیکی فصل مشترک جریان گل‌آلود، فواصل محل‌هایی که اندازه-گیری در آنها صورت گرفته، بیشتر شده و در حد یک سانتی‌متر بوده است)، در فاصله‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ متری از ابتدای مخزن اندازه‌گیری شده است. ملاک مقایسه‌ی نیم‌رخهای سرعت جریان، تنها ایستگاه‌های بعد از شکست شیب، یا همان فاصله‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ متری

می‌باشد. لازم به ذکر است که مکان مانع در محل شکست شیب بوده، و در تمام آزمایش‌ها محل مانع ثابت بوده و تنها ارتفاع آن متغیر بوده است.

## نتایج

### بررسی تغییرات طولی سرعت متوسط عمقی جریان

شکل ۷ تغییرات سرعت متوسط‌گیری شده عمقی بدنه‌ی جریان را (محاسبه شده با استفاده از روابط انتگرالی ۲ و ۳) در طول مخزن و برای دو حالت از غلظت جریان ورودی، نشان می‌دهد. قابل ذکر است که این سرعت‌ها به وسیله‌ی سرعت متناظر با عمق بهنجار ( $U_n$ ) جریانی که با بده ورودی ۲۲/۳ لیتر بر دقیقه و از روی بستری با شیب ۸ درصد و با سطح آزاد عبور کرده، بی‌بعدسازی شده است. این سرعت‌های بهنجار، از طریق رابطه‌ی مانینگ به دست آمده‌اند و این روش بی‌بعد سازی، به استفاده از نمودارهای موجود در شکل ۷، برای تعمیم نتایج به نمونه واقعی در طبیعت کمک می‌کند، چه، محاسبه‌ی سرعت بهنجار با شرایط فوق در نمونه واقعی سهل و امکان‌پذیر می‌باشد (در واقع تنها فراسنج‌هایی که در نمونه واقعی موجود می‌باشد، برای استفاده از نمودارهای این تحقیق تنها فراسنج‌های بدست آمده از روابطی مانند رابطه‌ی مانینگ است). همچنین، محور افقی این نمودارها (که برای دو غلظت ورودی مختلف ۳ و ۱۲ گرم بر لیتر به صورت جداگانه نمایش داده شده‌اند)، که نشان دهنده‌ی موقعیت طولی ایستگاهها در مخزن می‌باشند به کل طول مخزن ( $L_n=11$  m) بی‌بعد شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، در حالت بدون وجود مانع، سرعت جریان در بالادست شکست شیب، کاهش می‌یابد، تا بالاخره در فاصله‌های ۴ و ۵ متری به علت متوازن شده نیروهای رانش و مقاومتی، به سرعت یکنواخت و نهایی خود رسیده و ثابت باقی می‌ماند. همچنین، نمودارهای شکل ۷ نشان دهنده‌ی این نکته‌اند که در پایین دست شکست شیب نیز، در فاصله‌های ۸ متر به بعد، سرعت به دلیل متوازن شدن نیروهای رانشی و مقاومتی، به سرعت نهایی خود رسیده است. با مقایسه‌ی سرعت‌های بالادست شکست شیب و پایین دست آن، می‌توان به این نتیجه رسید که به دلیل پدیده‌ی پرش آبی بعد از تغییر ناگهانی شیب بستر، ضخامت بدنه‌ی جریان افزایش داشته، و به

<sup>۱</sup>ADV(acoustic doppler velocimeter)

شکل ۷ نشان می‌دهد که جریان عبوری از مانع متناسب با ارتفاع مانع، جریان ضعیف‌تر و با سرعت کمتری خواهد بود. لازم به ذکر است که پراکندگی سرعت‌های متوسط در ایستگاه‌های بلافاصله بالادست مانع، به دلیل وجود مانع بوده که باعث می‌گردد در این ناحیه کارماید جنبشی به کارماید بالقوه تبدیل گشته، و ضمن افزایش ضخامت آن، جریان‌های گردابی در این ناحیه ایجاد گردد. با توجه به این‌که برداشت دقیق این گردابه‌ها به وسیله‌ی دستگاه سرعت سنج مورد استفاده در این تحقیق امکان‌پذیر نبوده است، بنابراین، تحلیل دقیقی را در این ناحیه از نظر فیزیکی نمی‌توان دنبال نمود. همچنین، افزایش سرعت ناگهانی در فاصله‌ی ۶ متری بعد از دریچه‌ی ورودی جریان به این دلیل است که جریان عبور کرده از مانع، و بلافاصله در پایین دست آن فوق بحرانی بوده و این ایستگاه در محدوده‌ی قبل از پرش آبی رخ داده بعد از مانع، و یا در همان محدوده‌ی پرش، قرار گرفته است، و چندان ملاک مقایسه در این نتیجه‌گیری واقع نمی‌شود.

### بررسی تغییرات طولی بده جریان گل‌آلود در واحد عرض

مقایسه‌ی تغییرات بده جریان گل‌آلود در طول مخزن نشان می‌دهد که، برای حالتی که هیچ گونه مانعی در مسیر جریان قرار ندارد، بده در طول مسیر از خود افزایش نشان داده است.

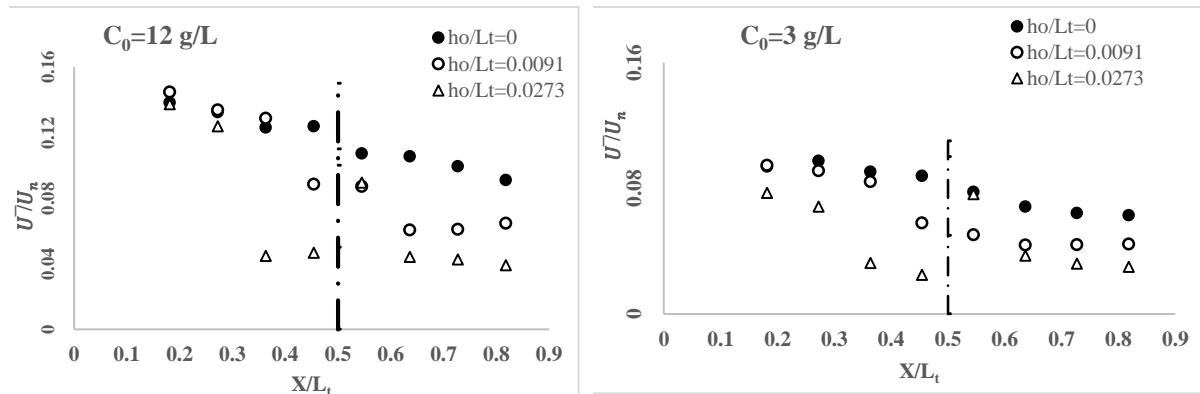
همین دلیل، سرعت‌های متوسط عمقی با کاهش مواجه شده‌اند. کاهش سرعت متوسط برای هر دو غلظت ورودی جریان گل‌آلود ۳ و ۱۲ گرم بر لیتر در مخزن حدود ۳۳ تا ۳۴ درصد می‌باشد. این کاهش سرعت متوسط جریان باعث کاهش قدرت حمل رسوب جریان شده است. چنانچه مشاهده‌های صورت گرفته در این مطالعه نشان داده‌اند، جریان گل‌آلود در این ناحیه به جریانی رسوبگذار تبدیل شده است.

همچنین، مقایسه بین سرعت‌های متوسط عمقی بده-ی جریان، بین حالت‌هایی که مسیر جریان به وسیله‌ی مانع مسدود شده است، نشان می‌دهد که در پایین دست مانع، مقادیر سرعت‌های متوسط عمقی کاهش یافته‌اند، که این پدیده می‌تواند ناشی از وجود مانع و به تله‌اندازی مقداری از جریان گل‌آلود باشد، به نحوی که با افزایش ارتفاع نسبی مانع  $(h_0/L_1)$  از ۰/۰۰۹۱ به ۰/۰۲۷۳، مقادیر سرعت‌های متوسط عمقی کاهش بیشتری را از خود نشان می‌دهد، به این معنی که عملکرد مانع در به دام انداختن جریان با افزایش ارتفاع آن، افزایش یافته است، به گونه‌ای که میزان کاهش سرعت متوسط جریان، زمانی که ارتفاع نسبی مانع ۰/۰۰۹۱ است حدود ۳۰ درصد بوده، و با افزایش این فراسنج تا ۰/۰۲۷۳ مقدار کاهش سرعت متوسط جریان در طول مخزن به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. قابل ذکر است که  $h_0$  بیانگر ارتفاع مانع بوده که به وسیله‌ی طول کل مخزن یا  $L_1$  بی‌بعد گردیده است. نهایتاً می‌توان گفت که

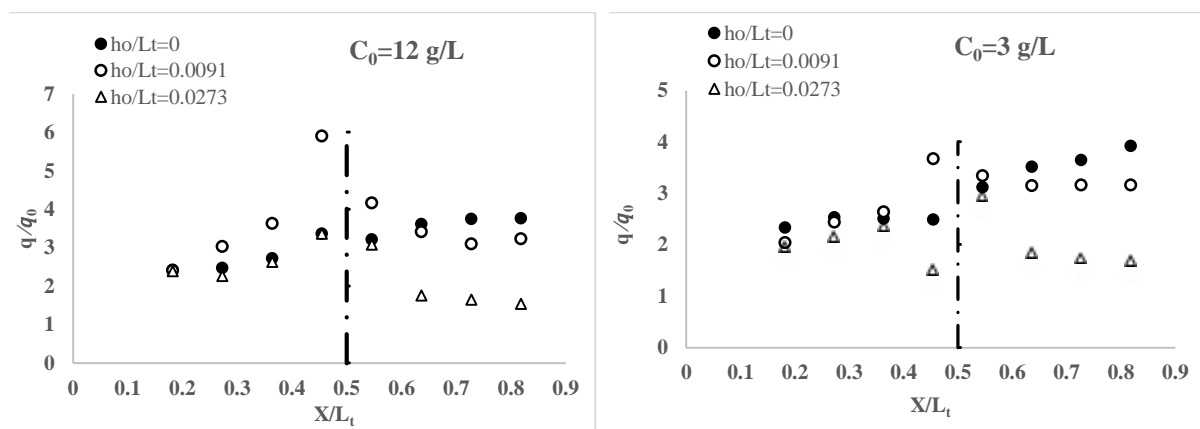


شکل ۶- نمایی از مخزن آزمایشگاهی.





شکل ۷- تاثیر مانع و غلظت ورودی بر تغییرات طولی سرعت متوسط نسبی جریان گل آلود.



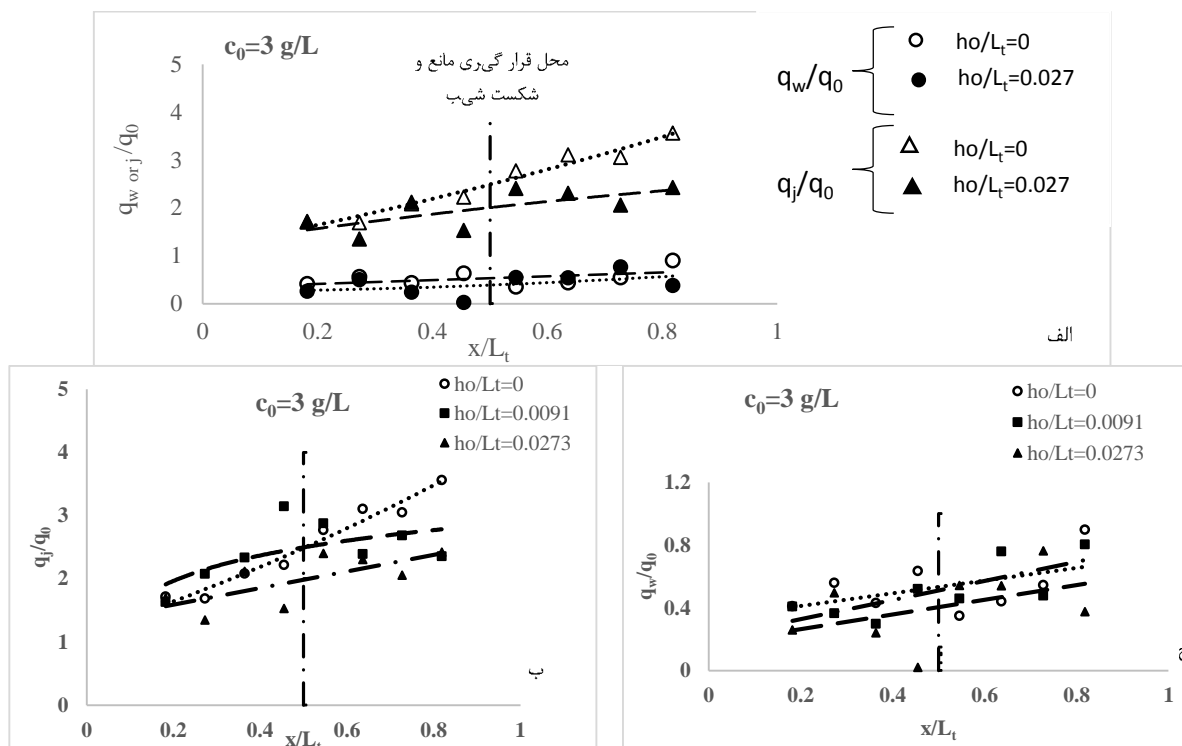
شکل ۸- تاثیر مانع و غلظت ورودی بر تغییرات طولی بده در واحد عرض نسبی جریان گل آلود.

موجود در مسیر جریان ۰/۰۲۷ است، میزان این کاهش بده جریان به بیش از ۵۰ درصد (حدود ۶۰ درصد) می‌باشد و این مقدار برای زمانی که مانع کوتاهتر است (مانع با ارتفاع نسبی  $h_0/L_t = 0,009$ ) کمتر از ۲۰ درصد کاهش بده جریان گل آلود در واحد عرض، بر اثر عبور از مانع و در پایین دست مانع می‌باشد. لازم به ذکر است که  $h_0$  ارتفاع مانع و  $L_t$  طول مخزن در این تحقیق می‌باشد.

مقایسه‌ی بده جریان گل آلود در یک یا دو ایستگاه، بلافاصله بالادست مانع، نتایج خاصی را نشان نمی‌دهند، چراکه سرعت سنج نقطه‌ای مورد استفاده در این تحقیق توانایی نشان دادن گردابه‌های قبل از مانع را نداشته، و همان‌طور که در قسمت قبل اشاره گردید، مقایسه‌ی فیزیکی منطقی را در این محدوده نمی‌توان انجام داد. همچنین، در فاصله‌ی ۶ متری بعد از دریچه‌ی ورودی جریان، به دلیل این که ایستگاه مزبور در محدوده‌ی پرش آبی جریان عبوری از مانع قرار گرفته است، نمی‌تواند در مقایسه‌های منطقی قرار داده شود، بنابراین، کلیه‌ی نتایج

این موضوع در شکل ۸ برای دو غلظت مختلف از جریان گل آلود ورودی به خوبی دیده می‌شود. لازم به ذکر است که مانند بخش قبل، بی‌بعدسازی محورهای افقی و قائم نمودارها در جهت استفاده و تعمیم راحت‌تر نتایج به نمونه واقعی بوده است، و در این راستا، محور افقی که نشان دهنده‌ی طول مخزن است، با استفاده از طول کل مخزن ( $L_t = 11m$ ) بی‌بعد گردیده و محور قائم این نمودارها، که عبارتند از بده جریان گل آلود در واحد عرض مخزن، و با استفاده از بده جریان گل آلود ورودی بی‌بعد گردیده‌اند. افزایش بده در طول مخزن نشان دهنده‌ی پدیده‌ی اختلاط سیال ساکن محیطی به درون جریان گل آلود می‌باشد.

در شکل ۸ به خوبی دیده می‌شود که برای هر دو غلظت ورودی ۳ و ۱۲ گرم بر لیتر، در صورتی که مانع در مسیر جریان گل آلود وجود داشته باشد، میزان بده جریان عبوری از مانع در ایستگاه‌های پایین دست مانع کاهش یافته است، و این امر به دلیل عملکرد مانع در جهت تله-اندازی مقداری از جریان گل آلود می‌باشد. این عملکرد، با افزایش ارتفاع نسبی مانع ( $h_0/L_t$ ) از ۰/۰۰۹ به ۰/۰۲۷ افزایش داشته است، به گونه‌ای که وقتی ارتفاع نسبی مانع



شکل ۹- مقایسه‌ی تغییرات بده جریان گل‌آلود در واحد عرض در دو ناحیه‌ی فشانه و دیواره به تفکیک.

ناحیه‌ی مزبور بوده است. همچنین، می‌توان گفت تقریباً تمام آنچه به‌عنوان کاهش بده کل جریان گل‌آلود ناشی از وجود مانع در مسیر جریان اتفاق افتاده، مربوط به کاهش بده در این ناحیه بوده است (شکل ۹-ب)، و با افزایش ارتفاع نسبی مانع، بده در این ناحیه بیشتر دستخوش تغییرات شده است.

### بررسی نیم‌رخهای سرعت

نیم‌رخهای سرعت می‌توانند به شکل مطلوب و مناسبی به‌وسیله‌ی یک نیم‌رخ بی‌بعد گردیده نمایش داده شوند. به‌عبارت دیگر، شکل بی‌بعد شده نیم‌رخ سرعت برای کلیه‌ی آزمایش‌ها با شرایط اولیه‌ی مختلف شبیه هم بوده، و کلیه‌ی سرعت‌های بی‌بعد شده در یک محدوده‌ی مشخص و معین پراکنده شده‌اند. شکل ۱۰ نیم‌رخهای سرعت بی‌بعد شده‌ی برخی آزمایش‌ها ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. جهت بی‌بعدسازی نیم‌رخها با کاربرد این روش، ضرایب مربوط به نیم‌رخها برای حالت‌های مختلف با و بدون حضور مانع، تنها بعد از مانع و شکست شیب با یکدیگر مقایسه می‌گردند (ضرایب معادلات ۴ و ۵). در جدول ۱ ضرایب مورد استفاده در این بخش آورده شده‌اند.

بدست آمده از این قسمت بدون در نظر گرفتن ایستگاه‌های فوق بوده است.

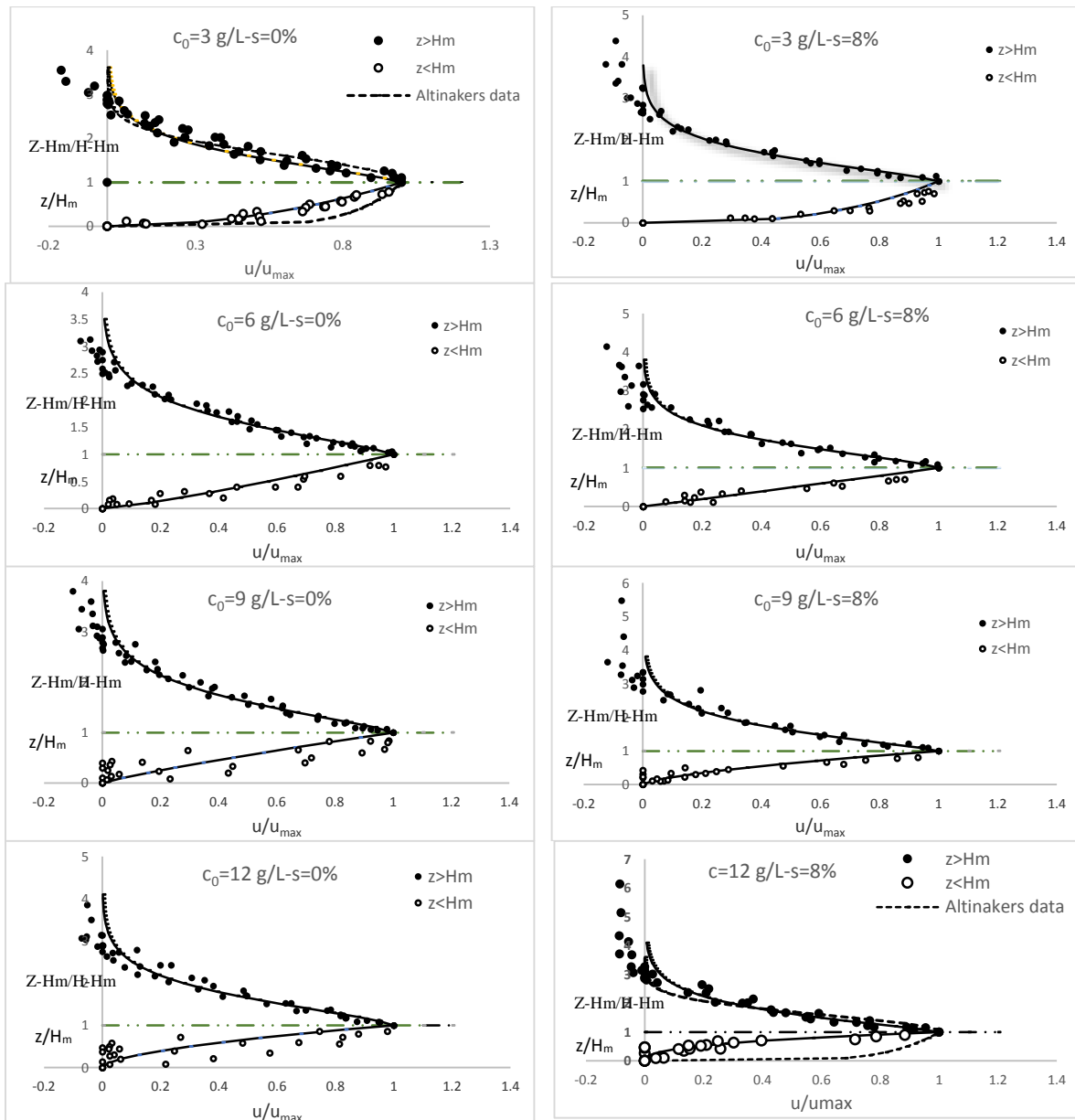
در شکل ۹ (الف-ج) تغییرات بده جریان در واحد عرض مخزن برای دو ناحیه‌ی فشانه و دیواره برای غلظت ورودی ۳ گرم بر لیتر، به‌صورت تفکیک آورده شده‌اند. مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به بده جریان در ناحیه‌ی دیوار نشان می‌دهد که بده در این ناحیه، در حالتی که مانعی در مسیر جریان قرار ندارد، و یا مانع با ارتفاع‌های نسبی ۰/۰۰۹۱ یا ۰/۰۲۷۳ در مسیر جریان قرار دارد، چندان دستخوش تغییر نشده است. شکل ۹-ج نشان داده است که روند تغییرات بده در ناحیه‌ی دیواره در حالت بدون مانع، و یا حالتی که مانع با ارتفاع نسبی ۰/۰۰۹۱ و حتی ۰/۰۲۷۳ در مسیر جریان قرار داشته، ثابت و یکسان و تقریباً خطی افقی بوده است و تغییرات بده زیادی را در طول مخزن نشان نمی‌دهد.

همچنین، مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به بده در ناحیه‌ی فشانه جریان، در شکل ۹-الف نشان می‌دهند که این ناحیه نقش اساسی را در تغییرات بده کل جریان گل-آلود در هر مقطع به عهده داشته است، به‌گونه‌ای که تقریباً تمام افزایش بده کل جریان گل‌آلود در طول مخزن در این ناحیه اتفاق افتاده، که دلیل این امر مشخصاً وجود پدیده‌ی اختلاط سیال ساکن محیطی به درون جریان گل‌آلود در

## الف- بررسی نیمرخ بی‌بعد سرعت در ناحیه‌ی دیواره

که با افزایش غلظت جریان گل‌آلود ورودی (از ۳ گرم بر لیتر به ۱۲ گرم بر لیتر)، میزان این ضریب کاهش یافته، و چنانچه این ضریب از یک کوچکتر گردد، شکل نیمرخ بی-بعد شده‌ی سرعت دارای تقعر رو به پایین بوده، و حاکی از شیب بالاتر تغییرات سرعت در نزدیکی سرعت بیشینه است، و شکل نیمرخ حالت تیزتری را به خود می‌گیرد. این نتیجه حاصل بالاتر بودن نیروی گرانش ناشی از وجود ذرات معلق بیشتر در جریان با غلظت بالاتر می‌باشد. تغییرات ضریب  $\alpha$  تقریباً زیاد بوده و از ۰/۳۹ تا ۲/۱۳۵ در آزمایش‌های مختلف متغیر است، که این مقدار به‌صورت میانگین، به‌وسیله‌ی آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶)، برابر با ۰/۶ ذکر شده است.

شکل نیمرخ سرعت در ناحیه‌ی دیواره کاملاً بستگی دارد به میزان ضریب  $\alpha$  در معادله‌ی ۴؛ چنانچه مقدار این ضریب از یک بیشتر باشد، شکل نیمرخ سرعت شامل یک منحنی توانی با تقعر رو به بالا بوده و میزان شیب تغییرات سرعت در نزدیکی بستر بزرگتر از شیب سرعت، در نزدیکی سرعت بیشینه می‌باشد. لازم به ذکر است که، این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که غلظت جریان گل‌آلود بیشتر باشد. این موضوع با مقایسه‌ی میزان ضرایب  $\alpha$  بدست آمده از آزمایش‌ها، حتی بدون حضور مانع، به‌خوبی دیده می‌شود



شکل ۱۰- نیمرخهای بی‌بعد شده‌ی سرعت در غلظت‌های مختلف در بالادست و پایین دست شکست شیب.

### ب- بررسی نیم‌رخ بی‌بعد سرعت در ناحیه‌ی فشانه

نتایج حاصل از ترسیم نیم‌رخهای بی‌بعد شده سرعت، حاکی از این مطلبند که ضریب  $\beta$  در محدوده‌ی ۱/۱-۶۱/۱۲۶ تغییر کرده، و این ضریب به‌وسیله‌ی (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶) ۱/۴ پیشنهاد شده است، که بسیار نزدیک به ضریب بدست آمده در مطالعه‌ی حاضر می‌باشد. همچنین، این ضریب به‌وسیله‌ی کشتکار و همکاران (۱۳۸۹)، ۰/۶۶-۰/۸۴ گزارش شده است. جدول ۱ نشان می‌دهد که ضریب  $\gamma$  بین مقادیر ۱/۲۵-۱/۸۹ متغیر بوده و مقدار پیشنهاد شده‌ی آن به‌وسیله‌ی آلتیناکار ۲ بوده (لازم به ذکر است که آزمایش‌های انجام شده به-وسیله‌ی آلتیناکار نیز در مورد جریان با عدد فرود ۱-۲/۳۳ بوده است) و این ضریب به‌وسیله‌ی کشتکار و همکاران (۱۳۸۹)، ۱۳/۱۶-۲/۲ اعلام شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضرایب  $\gamma$  به وضعیت<sup>۱</sup> جریان وابسته نبوده، و تقریباً مقدار آن برای تمام آزمایش‌ها یکسان می‌باشد؛ به-عنوان یک روند کلی می‌توان گفت که با کاهش غلظت از ۳ گرم بر لیتر به ۱۲ گرم بر لیتر، میزان ضریب  $\gamma$  افزایش داشته است، که این امر در مقایسه‌ی نتایج حاصل از نیم-رخهای سرعت در حضور موانع مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع مانع در مقابل جریان غلظت کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان گفت که دستیابی به هدف مورد مطالعه در این تحقیق (تغییر الگوی رسوبگذاری جریان گل‌آلود با کاربرد مانع) میسر گردیده است. همچنین، میزان تغییرات  $\beta$  در کل آزمایش‌ها حدود ۳۰ درصد می‌باشد، به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت جریان ورودی از ۳ گرم بر لیتر به ۱۲ گرم بر لیتر، این ضریب کاهش یافته و نیم‌رخ بی‌بعد شده سرعت شکل تیزتری را به خود می‌گیرد، که این امر خود ناشی از وجود تغییرات بیشتر فشار، به‌دلیل وجود جرم یا غلظت بیشتر می‌باشد. همچنین، نتایج بیانگر این نکته‌اند که ضریب مزبور در طول مخزن با کاهش شیب از ۸ درصد به صفر درصد، افزایش می‌یابد؛ این موضوع ناشی از کاهش شتاب گرانش کاهش یافته در طول مخزن به‌دلیل کاهش شیب می‌باشد، به‌گونه‌ای که در شیب تندتر

لازم به ذکر است که ضرایب مقایسه شده در جدول فوق، مربوط به بدنه‌ی جریان بعد از مانع و شکست شیب بوده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع مانع، این ضریب افزایش داشته، و همچنین، حداقل این ضریب مربوط به زمانی است که مانعی در مسیر جریان قرار نگرفته باشد. این مطلب خود حاکی از این است که، با افزایش ارتفاع مانع، غلظت جریان گل‌آلود عبوری از مانع کاهش یافته است. لازم به ذکر است که هدف اصلی ایجاد مانع در مسیر جریان، کاهش دادن غلظت جریان گل‌آلود عبوری از مانع بوده است. نتایج فوق نشان داده‌اند که این هدف در تحقیق حاضر به‌خوبی حاصل گردیده است.

همچنین، مقایسه‌ی نتایج مربوط به ضریب  $\alpha$  در حالتی که هیچ‌گونه مانعی در مسیر جریان وجود ندارد، در بالادست و پایین‌دست شکست شیب، حاکی از این مطلب می‌باشد که، جریان بعد از شکست شیب (جایی که شیب مخزن صفر می‌باشد) دارای ضریب  $\alpha$  بزرگتری است نسبت به حالتی که جریان از روی شیب تند (۰/۸٪ بالادست شکست شیب) در حال عبور باشد. گرچه در طول هر آزمایش غلظت تغییر نکرده است، اما نتیجه حاصل از این مقایسه، شبیه نتیجه‌ی حاصل از کاهش غلظت بعد از مانع است. این نکته نشان می‌دهد که شکست شیب نیز در ملایم‌تر کردن نیم‌رخ سرعت نقش داشته، و این امر موجب ایجاد فرصتی برای جریان در جهت رسوبگذاری می‌باشد. این پدیده به‌علت افزایش ضخامت جریان بعد از عبور از شکست شیب ناشی از ایجاد پرش آبی است، بنابراین، شکست شیب هم می‌تواند در الگوی جریان تاثیرگذار باشد، به‌نحوی که نیم‌رخ سرعت جریان شکل ملایم‌تری را به خود بگیرد، و فرصت رسوبگذاری برای جریان، قبل از رسیدن به بدنه‌ی سد، ایجاد شود.

تغییرات زیاد این ضریب می‌تواند به‌دلیل وجود تاثیر برش در کف مخزن بر نیم‌رخهای سرعت باشد. تغییرات زیاد سرعت در این منطقه، دقت را در محاسبه و ارائه این ضریب کاهش می‌دهد. همچنین، نبودن امکان دقت بالا در برداشت سرعت‌ها در نزدیکی مرز می‌تواند دلیل دیگر این امر باشد.

<sup>۱</sup>flow regime

جدول ۱- تاثیر غلظت ورودی جریان گل آلود و ارتفاع مانع بر ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  بعد از مانع.

S (%)	Co=3 g/L					Co=12 g/L				
	8%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	0%
$h_0/L_t$	۰	۰	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۸۱	۰/۰۲۷۳	۰	۰	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۸۱	۰/۰۲۷۳
$\alpha$	۰/۹۲	۱/۰۱۷	۱/۸۶۱	۱/۹۵	۲/۱۳۵	۰/۳۹۶	۰/۵۷۵	۰/۸۸۷	۰/۹۷	۱/۶۲۲
$\beta$	۱/۳۳	۱/۴۸۶	۱/۵۳۷	۱/۵۸	۱/۶۱۲	۱/۱۲۶	۱/۲۷۷	۱/۲۸۲	۱/۳۱	۱/۳۸۱
$\gamma$	۱/۳۶	۱/۳۶۳	۱/۴۷۷	۱/۶۰۹	۱/۸۸۹	۱/۲۵۵	۱/۳۱۲	۱/۴۳۵	۱/۵۴۵	۱/۶۴۵

جریان در روی شیب تند و یا شیب صفر است، ضریب  $\gamma$  تقریباً ثابت باقی مانده، و چندان حساسیتی به وضعیت جریان گل آلود ندارد. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که ضریب  $\beta$  با افزایش غلظت کاهش یافته، و این امر باعث می‌گردد که شکل نیمرخ سرعت ملایم‌تر شود. در مجموع، نتایج مقایسه‌ی ضرایب نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت، حاکی از این مطلبند که وجود مانع در مسیر جریان، باعث کاهش غلظت جریان گل آلود عبوری از روی مانع شده و با افزایش ارتفاع آن، عملکرد مانع در جهت مهار رسوبگذاری جریان بیشتر بوده است.

همچنین، نتایج مقایسه‌ی تغییرات سرعت متوسط و بده جریان گل آلود، در طول مخزن قبل و بعد از مانع، حاکی از کاهش قابل ملاحظه‌ی سرعت متوسط جریان گل آلود در طول مخزن بوده، و این اثر در مواقعی که ارتفاع نسبی مانع  $۰/۰۲۷۳$  بوده، به بیش از ۵۰ درصد نیز رسیده است.

نتایج نشان داده‌اند که بده‌ی جریان گل آلود عبوری از روی مانع به شدت کاهش یافته و جریان گل آلود شکل گرفته بعد از مانع، جریان ضعیف‌تری بوده است. قابل ذکر است که با افزایش ارتفاع نسبی مانع موجود در مسیر جریان گل آلود از  $۰/۰۰۹۱$  به  $۰/۰۲۷۳$ ، میزان کاهش بده جریان در پایین دست مانع از حدود ۲۰ درصد به حدود ۶۰ درصد رسیده است. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که ناحیه‌ی فشانه جریان بیشترین نقش را در تغییرات بده، چه در طول مخزن و به دلیل پدیده‌ی اختلاط سیال ساکن محیطی به درون جریان، و چه در حالت وجود مانع و مقایسه‌ی آن با حالت بدون مانع، داشته است؛

مخزن، نیمرخ بی‌بعد شده سرعت بدنه‌ی جریان، شکل تیزتری را به خود می‌گیرد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از بررسی نیمرخ‌های سرعت بدنه، تحت تاثیر مانع‌های مختلف با ارتفاع‌های مختلف نشان داده است که با افزایش ارتفاع مانعی که در مسیر جریان قرار دارد، میزان این ضریب افزایش داشته است، که این نتیجه را می‌توان با کاهش غلظت جریان گل آلود عبوری از مانع بلندتر ارتباط داد، و این پدیده به معنی عملکرد بالاتر مانع بلندتر در مهار رسوبگذاری جریان گل آلود می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

از آنجا که نیروی پسا در مرز بالایی و پایینی جریان، و همچنین برش در این دو مرز و شیب تغییرات سرعت بر نیمرخ پیشنهادی تاثیرگذار خواهند بود، کل نیمرخ بدست آمده به دو ناحیه‌ی مستقل، یکی مربوط به مرز صلب پایینی و دیگری به مرز اختلاط بالایی تقسیم شده، و رفتار جریان در هر ناحیه بر نیمرخ و رابطه‌ی پیشنهادی در نظر گرفته شد. در ناحیه‌ی داخلی، که در زیر سرعت بیشینه قرار دارند، نیروی پسا در مرز پایینی، فراسنج تنظیم کننده‌ی اصلی بوده، و مقدار  $\alpha$  در حالت‌های مختلف از جریان و در غلظت‌های مختلف ورودی، با یکدیگر اختلاف دارند، به گونه‌ای که این اختلاف قابل صرف نظر کردن نیست. براین اساس، برای هر حالت از جریان، معادلاتی به صورت جداگانه ارائه شده‌اند. یکی از دلایل این موضع می‌تواند بالاتر بودن میزان خطا در اندازه‌گیری داده‌ها در نزدیکی مرز در ناحیه‌ی درونی باشد. علاوه بر آن، توجه به تاثیر بارزتر پسا در مرز پایینی جریان، و همچنین برش در این مرز و شیب تغییرات سرعت در این ناحیه، می‌تواند دلیل دیگر این موضوع باشد.

مقایسه‌ی ضرایب نیمرخ سرعت در ناحیه‌ی فشانه، نشان می‌دهد که در روابط ارائه شده برای حالت‌هایی که

Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds. *J. Lakes and Reserv: Res Manag*, 15: 285-306.

10) Bradford, S. F., and N. D. Katopodes. 1999. Hydrodynamics of turbid underflows I: formulation and numerical analysis. *J. Hydr. Eng. ASCE*, 125: 1006-1015.

11) Bursik, M. I., and A.W. Woods. 2000. The effects of topography on sedimentation from particle-laden turbulent density currents: *J. Sedim. Res.* 70: 53-63.

12) Cabeza, C., J. Varela., I. Bove., D. Freire., A. C. Marti., L. G. Sarasua., G. Usera., R. Montagne., and M. Araujo. 2009. Two-layer stratified flows over pronounced obstacles at low-to intermediate Froude numbers. *J. Phys. Flu* 21: 102-110.

13) De Cesar, G., J. L. Boillat., and A.J. Schleiss. 2006. Circulation in stratified lakes due to flood-induced turbidity currents. *J. Environ. Eng.* 132: 1508-1517.

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

15) Garcia, M. H., and G. Parker. 1993. Experimental on the entainment of sediment into suspension by a dense bottom current. *J. Geophys. Res. (Oceans)* 98:4793-4807.

16) Graf, W. H., and M. S. Altinakar. 1998. Fluvial hydraulics-flow and transport processes in channels of simple geometry. Chap. 7. Wiley ,New-York.

17) Hug, M. 1975. *Mecanique des fluides appliqué eyrolles*. Paris. F.

18) Kneller, B., and C. Buckee. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity current; a review of some recent studies and their geological implications. *J. Sediment.* 47: 62-94.

19) Komar, P. D. 1971. Hydraulic jumps in turbidity currents. *Geol. Sec. Am. Bull.* 82: 1477-1488.

20) Kostic, S., and G. Parker. 2007. Conditions under which a supercritical turbidity current traverses an abrupt transition to vanishing bed slope without a hydraulic jump. *J. Flu Mech.* 586:119-145.

21) Migeon, S., T. Mulder., B. Savoye., and F. Sage. 2011. Hydrodynamic processes, velocity structure and stratification in natural turbidity currents: results inferred from field data in the turbidite system. *J. Sedimen Geo.* 245:48-62.

22) Morris, S. A., and J. Alexander. 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. *J. Sedimen. Res.* 73: 621-629.

23) Oehy, C., and A. J. Schleiss. 2001. Numerical

گفتنی است که بده در ناحیه‌ی دیواره جریان چندان دستخوش تغییرات نشده است.

## پیشنهادها

پیشنهاد می‌گردد، که با ادامه آزمایش‌ها در دامنه‌ی گسترده‌تری از غلظت‌ها، معادله‌ای برای تغییرات ضرایب نیم‌رخهای بی‌بعد شده‌ی سرعت، نسبت به تغییرات غلظت ارائه گردد. همچنین، این معادلات بی‌بعد شده برای غلظت‌های بدنه جریان استخراج شوند. افزون بر آن، تغییرات نیم‌رخهای بی‌بعد شده غلظت در طول مخزن به منظور محاسبه بازده تله‌اندازی مانع در مسیر جریان، مد نظر قرار گیرد.

## فهرست مراجع

۱) اصغری پری، ا.، م. کاشفی پور. و م. قمشی. ۱۳۸۸. بررسی اثر غلظت جریان در کنترل جریان غلیظ با مانع در مخازن سدها، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران. [http://www.civilica.com/Paper-IREC08-IREC08\\_296.html](http://www.civilica.com/Paper-IREC08-IREC08_296.html)

۲) بهرامی، ح.، م. قمشی. و س. م. کاشفی پور. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تغییر شکست شیب بستر بر خصوصیات جریان غلیظ. مجله‌ی علوم و فنون دریایی. ۸: ۶۷-۷۶.

۳) فیروزآبادی، ب. ۱۳۷۸. بررسی تجربی و تئوری جریان‌های مطبق و تهیه‌ی نمونه‌ی ریاضی از جریان‌های چگالی حاوی ذرات. رساله‌ی دکتری. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.

۴) ماروسی، م.، م. قمشی. و ح. بشاورد. ۱۳۸۸. کنترل رسوبگذار توسط مانع در مخازن سدها، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران. [http://www.civilica.com/Paper-IREC08-IREC08\\_223.html](http://www.civilica.com/Paper-IREC08-IREC08_223.html).

۵) کشتکار، ش.، س. ع. ایوب زاده. و ب. فیروزآبادی. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی ضخامت و پروفیل‌های سرعت جریان گل آلود. نشریه‌ی آب و خاک. ۲۴: ۱۰۷۳-۱۰۸۲.

۶) ناجی ابهری، م. ۱۳۹۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر موانع بر جریان غلیظ. رساله‌ی دکتری رشته عمران-هیدرولیک، دانشکده‌ی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس.

7) Alexander, J., and S. A. Morris. 1994. Observation on experimental non-channelized: high concentration turbidity currents and variation in deposits around obstacles. *J. Sedim Petro.* A64: 899-909.

8) Altinakar, S., W. H. Graf and E. J. HopFinger. 1996. Weakly depositing turbidity current on a small slope, *J. Hydr. Res.* 28: 55-80.

9) Barahmand, N., and A. Shamsai. 2010.

modeling of a turbidity current passing over an obstacle- practical application in lake Grimsel, Switzerland. Proc. Int. Symp. Env. Hydr., Tempe, AZ, (CD-Rom).

24) Oehy, C., G. De Cesare., and A. J. Schleiss. 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. J. Hydraul Res. 48: 81-90.

25) Reger, A., S. Hassid., and M. Poreh. 2004. Density jumps in smoke flow along horizontal ceilings. Fire Saf. J. 39: 465-479.

26) Reger, A., S. Hassid., and M. Poreh. 2006. Calculation of entrainment in density jumps. J. Environ. Fluid Mech. 6: 407-424.

27) Shleiss, A., and C. Oehy. 2002. Verlandung von stauseen und nachhaltigkeit. Wasser. Energie. Luft-Eau, Nergie, Air. 169: 227-234.

28) Stephan, A., S. A. Morris., and J. Alexander. 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. J. Sedimen Res. 73: 621-629.

29) Turner, J. S. 1973. Buoyancy effects in fluids. Cambridge Univ. Press, Cambridge, GB.

30) Varma, C. V. J., B. S. K. Naidu., and A. R. G. Rao. 2000. Silting problems in hydro power plants. A. A. Balkema, Rotterdam.

