

## مقایسه آزمایشگاهی اثر صفحات متخلخل و موانع متخلخل در کنترل جریان غلیظ

مجتبی کردنائیج<sup>۱</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۲\*</sup>، سید محسن سجادی<sup>۳</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۶

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء(ص) بهبهان

<sup>۲</sup> استادیار، گروه عمران، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء(ص) بهبهان

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۴</sup> استاد، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: asghari\_amin@bkatu.ac.ir

### چکیده

جریان‌های غلیظ یکی از عوامل مهم در زمینه انتقال و انباشت رسوبات در مخازن سدها می‌باشند. در تحقیق حاضر به مقایسه آزمایشگاهی اثر صفحه متخلخل و مانع متخلخل به‌عنوان یک مانع نفوذپذیر جهت کنترل جریان غلیظ رسوبی پرداخته شده است. از صفحه پلکسی گلاس با ضخامت ۲ میلی‌متر برای ساخت صفحه متخلخل استفاده شده و برای ساخت مانع متخلخل از مکعب‌های پلاستیکی توخالی به ابعاد  $2/1 \times 2/1 \times 2/1$  سانتی‌متر استفاده گردید. میزان تخلخل سطحی در هر دو مدل ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها در فلومی شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر و با سه شیب متفاوت انجام شد. در طی آزمایش‌ها، غلظت جریان غلیظ در بالادست و پایین‌دست صفحه متخلخل و مانع متخلخل با استفاده از نمونه‌گیر سیفونی اندازه‌گیری شد. در حالت صفحه متخلخل، جریان فقط در راستای طولی وارد تخلخل‌ها می‌شود و در حالت مانع متخلخل در دو راستای عمود برهم وارد تخلخل‌ها می‌شود. در مانع متخلخل با ورود هم‌زمان جریان غلیظ در دو جهت عمود بر هم، خطوط جریان در تخلخل‌ها با یکدیگر برخورد کرده و با ایجاد جریان چرخشی در تخلخل، سبب استهلاک بیشتر انرژی جریان عبوری از درون آن نسبت به صفحه متخلخل می‌گردد. همچنین با افزایش ارتفاع نسبی مانع، در هر دو حالت بدون شیب و شیب‌دار کارایی مانع متخلخل و صفحه متخلخل افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع مانع، جریان غلیظ، صفحه متخلخل، عملکرد مانع، مانع متخلخل

## Experimentally Comparisons of the Effect of Porous Sheets and Porous Obstacles in Controlling Turbidity Current

M Kordnaeij<sup>1</sup>, SAAsghari Pari<sup>2\*</sup>, SM Sajjadi<sup>3</sup>, M Shafai Bajestan<sup>4</sup>

Received: 08 July 2015

Accepted: 06 November 2016

<sup>1</sup>- M.Sc. Student Dept. of Civil Engin. Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

<sup>2</sup>- Assist.Prof., Dept. of Civil Engin. Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

<sup>3</sup>- Assist. Prof., Faculty of Water Sciences Engin, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran

<sup>4</sup>- Prof., Faculty of Water Sciences Engin. Faculty, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran

\*Corresponding Author, Email: asghari\_amin@bkatu.ac.ir

### Abstract

Turbidity currents are the main factors of sediment transportation and deposition in reservoirs. In this research, the effect of porous sheets and permeable obstacles in controlling the turbidity currents has been studied experimentally. Plexiglas sheets with the thickness of 2 mm were used to build porous sheets and hollow plastic cubes were used for building porous obstacles with dimensions of 2.1 × 2.1 × 2.1 (cm). The surface porosity was assumed about 25% for the both models of obstacles. The experiments were performed in a slopping flume at the length of 10 m with three different slopes. During the experiments, the concentrations of the turbidity current at upstream and downstream of the porous sheet and the porous obstacle were measured using suction probes. In case of the porous sheet, the turbidity current entered the pores longitudinally, while in case of the porous obstacle, it entered the pores in two perpendicular directions. The result showed that in the case of utilizing porous obstacles, a rotational flow was formed as the turbidity currents entered in two perpendicular directions which increased the dissipation of the turbidity current's energy in the porous obstacle application compared to the porous sheet application. Furthermore, by increasing the relative height of the obstacle in both zero-slope and non-zero slope cases the performances of the both porous obstacles and the porous sheet were increased.

**Keywords:** Obstacle height, Performance of obstacle, Porous obstacle, Porous sheet, Turbidity current

### مقدمه

سد در مسیر این رودخانه‌ها، تعادل در رسوبات ورودی و خروجی را از بین می‌برد. بر هم خوردن تعادل به این صورت است که با ورود رسوبات به مخزن سد از سرعت نره رسوب کاسته شده و در مخزن و در نزدیکی سازه سد ته‌نشین می‌شوند. پس از گذشت چند سال از احداث سد و آبیگری مخزن آن، این رسوبات ته‌نشین شده، تجمع می‌یابند. ترسیب رسوب در مخازن باعث از دست‌رفتن حجم مفید مخزن می‌گردد. یکی از عوامل حرکت رسوبات در مخزن سدها و انتقال آن‌ها به کنار بدنه سد، جریان غلیظ می‌باشد. جریان غلیظ جریانی است که به علت تأثیر

بحران کمبود آب بشر را به سمت ذخیره‌سازی و مدیریت بهینه در بهره‌برداری از منابع آب شیرین موجود سوق داده است. راهکار اساسی در این زمینه احداث سد در مسیر رودخانه می‌باشد. مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریان‌های سیلابی رودخانه و به منظور کنترل سیل، ذخیره آب برای مصارف پایین دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می‌شوند. از طرفی رودخانه های طبیعی در اغلب بازه‌ها دارای تعادل در میزان رسوبات ورودی و خروجی هستند مگر این‌که با احداث

دوم در ناحیه گردابه مانع اول سبب می‌شود که بازده حضور مانع به کمینه برسد.

اصغری‌پری و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۶) با استفاده از جریان غلیظ نمکی تغییرات ارتفاع مانع در کنترل جریان غلیظ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ۱۰ ارتفاع متفاوت مانع بسته به شرایط جریان ورودی و عدد فرود دنسیومتریکی در محدوده مطالعه آن‌ها ۰/۷ تا ۱/۳۷ استفاده نمودند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد با افزایش عدد فرود دنسیومتریکی، ارتفاع مانع جهت توقف جریان نیز بیشتر می‌شود، به طوری که برای توقف جریان غلیظ با مانع در جریان زیر بحرانی ارتفاع مانع باید ۲ تا ۲/۷ برابر ارتفاع بدنه جریان باشد و در جریان فوق-بحرانی این مقدار باید ۳/۲ تا ۵ برابر ارتفاع بدنه جریان باشد. پرینز (۱۹۹۹) اثر شکل مانع را با دو شکل نیم‌دایره و مثلثی با ارتفاع یکسان و برای حرکت دو بعدی بر روی فلوام افقی، بر روی جریان غلیظ مطالعه نمود. او دریافت که هندسه این دو مانع بر روی سرعت پیشانی جریان و نسبت جریان عبوری از روی مانع اثر قابل ملاحظه‌ای ندارد. عشاقی و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع مانع در کنترل جریان غلیظ با شرایط متفاوت ورودی جریان و عدد فرود دنسیومتریکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که جریان غلیظ با عدد فرود ورودی کم‌تر، به حضور مانع عکس‌العمل سریع‌تری نسبت به جریان غلیظ با عدد فرود ورودی بالاتر نشان می‌دهد. عبور از روی مانع برای جریان با عدد فرود ورودی کم‌تر سبب می‌شود جریان بیشتر تحت تأثیر مانع قرار گیرد و جریان‌های برگشتی قوی‌تر ایجاد کند. یعقوبی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی اثر دو مانع متوالی مثلثی شکل در رفتار جریان غلیظ با شیب مختلف فلوام و ارتفاع-های مختلف پرداختند و نتایج حاصل نشان داد که متوسط غلظت در بالادست مانع به طور محسوس بیشتر از پایین دست مانع می‌باشد. همچنین برای اعداد فرود در محدوده زیر بحرانی، متوسط غلظت پایین دست با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و برای اعداد فرود در محدوده فوق بحرانی،

شتاب ثقل مؤثر بر اختلاف چگالی دو سیال به وجود می‌آید. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد به صورت زیر بیان می‌گردد (اوهی ۲۰۰۲):

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g C_s \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad [1]$$

که در آن  $C_s$  غلظت حجمی متوسط رسوبات غیر چسبیده،  $\rho_t$  چگالی (جرم مخصوص) سیال غلیظ،  $\rho_a$  چگالی سیال پیرامون،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوب و  $\rho_w$  چگالی آب می‌باشد. این پدیده در طبیعت به شکل‌های مختلف و متنوعی مشاهده می‌شود. مواردی چون سقوط بهمن‌ها، سرازیر شدن گدازه‌های آتشفشان، حرکت جبهه‌های هوای گرم و سرد، تندرهای گرد و غبار، جریان‌های رسوبی در دریاها و مصب رودخانه‌ها نمونه‌هایی از جریان غلیظ در طبیعت می‌باشند. برای کنترل جریان غلیظ می‌توان به شیوه‌های متفاوتی از جمله استفاده از زبری، ترکیب مانع و زبری، استفاده از حباب هوا، استفاده از موانع (نفوذپذیر و نفوذناپذیر)، استفاده از جت آب و همچنین ایجاد مخزن یا دریاچه جهت کنترل جریان غلیظ اشاره نمود. لانگ و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌های خود را بر روی بازده تله-اندازی رسوبات توسط مدل فیزیکی یک حوضچه انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییرات زمانی غلظت جریان عبوری از روی مانع بعد از این که جریان دائمی می‌شود، قابل ملاحظه نیست و همچنین دانه‌بندی رسوبات عبوری ریزتر و غلظت نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کم شده است. قربان‌مقدم و قمشی (۱۳۹۴) به بررسی آزمایشگاهی اثر ستون‌های استوانه‌ای در رفتار جریان غلیظ نمکی پرداختند. نتایج نشان داد که اطراف موانع استوانه‌ای که در مسیر جریان غلیظ قرار می‌گیرند، جریان متلاطم و گردابه تولید می‌شود که این امر سبب برهم زنی جریان در مقیاس کوچک می‌گردد. قرار گرفتن مانع استوانه‌ای بعدی در انتهای ناحیه گردابه مانع اول سبب تشدید خطوط برخورد جریان با مانع می‌شود و تلاطم و برهم-زنی جریان بیشینه می‌گردد. قرار گرفتن مانع استوانه‌ای

زیادی توانایی کنترل جریان غلیظ هم در حالت زیربحرانی و فوق‌بحرانی را دارند. اوهی و اشلایدز (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به بررسی اثر مانع نفوذپذیر و مقایسه آن با مانع نفوذناپذیر با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه نتایج با مدل ریاضی CFX پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تأثیر ایجاد مانع نفوذناپذیر در جریان زیربحرانی بسیار بیشتر از جریان فوق‌بحرانی می‌باشد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که برای عملکرد بهتر صفحات مشبک باید ارتفاع مانع در کمترین حالت ۳ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ باشد. اوهی و همکاران (۲۰۱۰) نیز تأثیر جت آب را بر روی رفتار و همچنین کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر جت مخالف با زاویه ۴۵ درجه نسبت به کف بر کنترل جریان غلیظ بیش‌تر از جت عمودی می‌باشد. با توجه به مطالعات پیشین، مشاهده می‌گردد که در خصوص استفاده از مانع متخلخل در کنترل جریان غلیظ، اوهی و اشلایدز (۲۰۰۷) استفاده از صفحه مشبک را توصیه نمودند، از طرفی با توجه به این‌که احداث صفحات مشبک با ارتفاع زیاد در عرض دره در مخزن سد از لحاظ اجرایی مشکل خواهد بود، لذا در مقاله حاضر با الگوگیری از مکعب مستطیل‌های پلاستیکی توخالی (به شکل چینه) پیش ساخته که به‌عنوان سازه‌های موج‌شکن و محافظ سواحل استفاده می‌شود، به بررسی اثر مانع متخلخل ساخته شده از این چینه‌ها به صورت تک ردیفه با ارتفاع‌های مختلف و مقایسه آن با صفحه‌ی متخلخل برای کنترل جریان غلیظ رسوبی در غلظت و دبی ثابت پرداخته شده است.

#### مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان و بر روی فلوم شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر انجام شد. در این تحقیق از جریان غلیظ رسوبی استفاده شد که اندازه متوسط رسوبات در داخل مخزن جریان غلیظ ( $D_{50}$ ) ۸۶ میکرومتر بودند. برای

متوسط سرعت و متوسط غلظت با وجود افزایش ارتفاع مانع، تقریباً ثابت باقی می‌ماند و ارتفاع مانع در این شرایط چندان مؤثر نیستند. وودز و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی برخورد جریان غلیظ ناشی از خاکسترهای آتشفشانی با مانع به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از مدل نظری پرداختند. آن‌ها در مدل آزمایشگاهی اثر یک مانع و دو مانع را بر روی جریان بررسی نمودند. نتایج آن‌ها از آزمایش‌ها بیشتر به توصیف جریان در برخورد با مانع معطوف شده و تنها نتیجه کمی آن‌ها از آزمایش‌ها روند نمایی رسوب‌گذاری در طول فلوم بوده است. آن‌ها عنوان نمودند که تنها مانعی می‌تواند بر الگوی رسوب‌گذاری تأثیر بگذارد که سبب بلوک نسبی جریان شود. همچنین آن‌ها با استفاده از مدل نظری، کمینه ارتفاع مورد نیاز برای توقف کامل جریان را که برای جریان بحرانی به‌دست می‌آید  $2/1$  برابر عمق بحرانی محاسبه نمودند. نگویرا و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی حرکت جریان غلیظ در سطوح زبر و صاف پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که میزان زبری بستر تأثیر بسیار مهم و مؤثری در میزان پیشرفت و حرکت جریان غلیظ دارد به‌طوری‌که در زبری‌های کم، میزان کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ کم‌تر، و در زبری‌های بالاتر میزان کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ بیش‌تر می‌باشد. دریایی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی اثر مانع و زبری به‌صورت هم‌زمان در کنترل جریان غلیظ رسوبی پرداختند و نتیجه گرفتند که به‌کار بردن زبری به همراه مانع تا حد قابل توجهی بر روی کنترل دبی جریان غلیظ تأثیر خواهد داشت، به‌نحوی‌که در حالت بدون زبری و با مانع به اندازه ارتفاع بدنه جریان تا حدود ۳۱ درصد کاهش دبی رسوبی وجود داشت و در برخی از حالت‌های کارگذاری زبری تا ۱۰۰ کنترل صورت گرفت. اصغری-پری و محققیان (۱۳۹۳) به بررسی عددی ایجاد گودال‌های کنترلی به شکل‌های مستطیل، نیم‌دایره و مثلثی در بستر مخزن برای کنترل جریان غلیظ در ورودی مخزن سد پرداختند و نتیجه گرفتند که گودال‌های کنترلی تا حد

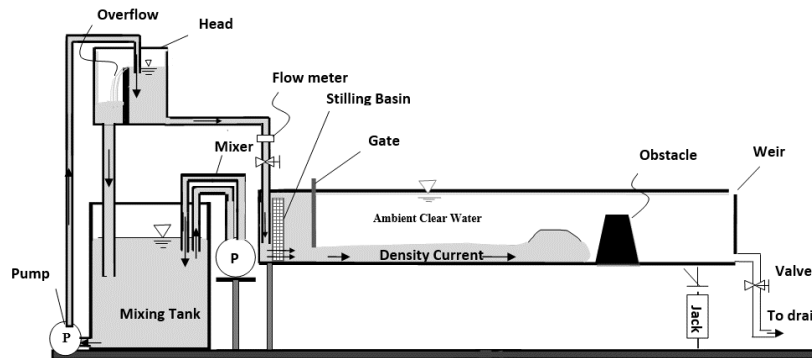
شفاف که با پمپ اختلاط در حال گردش بود، اضافه شده و سپس با یک پمپ انتقال به بارآبی تانک منتقل گشت. در مخزن بارآبی تانک نیز جهت جلوگیری از ته نشین شدن رسوبات از پمپ اختلاط استفاده شد. جریان رسوبی از بارآبی تانک با استفاده از یک شیر و دبی سنج الکترومغناطیسی، دبی ثابت  $0.7$  لیتر در ثانیه را به فلوم منتقل می کرد. در ورودی فلوم نیز از یک دریچه برای جداسازی آب شفاف و جریان رسوبی استفاده شد که به صورت ناگهانی باز می شد و ارتفاع بازشدگی دریچه مشابه به تحقیقات اصغری پری و همکاران (۲۰۱۰) و اوهی (۲۰۰۲)، ثابت و به میزان  $4/5$  سانتی متر در نظر گرفته شده است. غلظت جریان در مخزن جریان غلیظ،  $20$  گرم بر لیتر بود. برای اندازه گیری غلظت، از سیفون هایی که شامل سرنگ با حجم مشخص  $50$  سی سی بودند استفاده گردید. نمونه گیر سیفونی در فاصله  $0.5$  متر قبل از مانع و  $1$  و  $2$  متر بعد از مانع قرار گرفتند. اولین لوله نمونه گیر در کف فلوم قرار داشته است. سایر دهانه ها به فاصله مرکز به مرکز داخلی لوله به فاصله  $2$  سانتی متر از یکدیگر قرار داشتند. در مجموع در یک نمونه گیر  $10$  دهانه با قطر داخلی لوله و شیلنگ های متصل به آن که  $6$  میلی متر بوده اند، وجود داشته است. میزان غلظت نمونه ها پس از آزمایش با استفاده از دستگاه کدورت سنج قرائت می شدند و با توجه به نمودار تبدیل کدورت به غلظت که از قبل تهیه شده بود، نتایج غلظت بر حسب گرم بر لیتر ثبت گردید. دما در کلیه ی آزمایش ها برای مخزن جریان غلیظ و هم چنین آب ساکن درون فلوم اندازه گیری شد. بیشینه اختلاف دما،  $0.8$  درجه ی سانتی گراد بوده است. آزمایش ها در سه شیب  $0$ ،  $1/5$  و  $2/5$  درصد انجام گردید. عدد فرود دنسیومتریکی پیشانی جریان از رابطه  $2$  محاسبه شده است.

$$Fr_{dh} = \frac{U_f}{\sqrt{g'H_f \cos\theta}} \quad [2]$$

ساخت صفحه متخلخل از صفحه پلکسی با ضخامت  $2$  میلی متر استفاده شده و برای ساخت مانع متخلخل از چینه های پلاستیکی توخالی موجود در بازار استفاده شد. شکل تخلخل در صفحه متخلخل به صورت دایره بود. در مانع متخلخل مقطع تخلخل دایره ای بوده و از مکعب به ابعاد  $2/1$  سانتی متر در وجوه آن با تراشکاری دایره ای به قطر  $11$  میلی متر برداشت گردید. با در کنار هم قراردادن چینه ها موانع به شکل های مورد نظر ساخته می شدند. میزان تخلخل سطحی در صفحه و مانع متخلخل  $25$  درصد بودند. زاویه نصب مانع متخلخل و صفحه متخلخل در کلیه آزمایش ها  $90$  درجه بوده است. اوهی و اشلایدز (۲۰۰۷) از ژئوتکستایل با درصد تخلخل  $36$  و  $42$  درصد و با شکل تقریبی تخلخل که مربع بوده و برای مصارف راه سازی بوده اند، استفاده نمودند. تحقیق حاضر با هدف بررسی عملکرد تخلخل سه بعدی (چینه) نسبت به تخلخل دوبعدی (صفحه) می باشد. لذا برای این منظور باید شکل تخلخل ها یکسان بوده باشد تا به عنوان متغیر در نتایج اعمال نگردد. انتخاب شکل دایره ای نسبت به حالت مربع یا مستطیل به دلیل شرایط بهتر دایره در مرکز مانع که تقریباً کروی می باشد، بوده است. کروی بودن شکل و ورود جریان در دو راستا شرایط تشکیل گردابه را بیش تر فراهم می کند. جهت ثبت و اندازه گیری سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، فیلم برداری از لحظه بالا کشیدن دریچه تا انتهای فلوم انجام شده است. هم زمان میزان ارتفاع (با اشل) و زمان رسیدن پیشانی جریان (با کرنومتر) به محل های مشخص، که به فاصله  $0.5$  متر از یکدیگر و از ورودی فلوم تا انتهای آن قرار داشتند ثبت شده و سپس با تصاویر فیلم برداری، محاسبات کنترل شدند. ارتفاع های  $15$  و  $24$  سانتی متر برای صفحه متخلخل و ارتفاع های  $15$ ،  $24$  و  $30$  سانتی متر برای مانع متخلخل انتخاب شدند. موانع به منظور رعایت فاصله مورد نظر برای تشکیل پیشانی جریان و توسعه یافتگی جریان، در فاصله  $4/5$  متری از ورودی فلوم قرار گرفتند. پودر سنگ به عنوان رسوبات به میزان محاسبه شده در مخزن آب

$$Q_s = U_f \times H_f \times B \times C \quad [۴]$$

در این رابطه  $Q_s$ : دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی،  $B$ : عرض فلوم و  $C$ : متوسط غلظت حجمی پیشانی جریان غلیظ حاصل از پروفیل غلظت گرفته شده با استفاده از نمونه‌گیر سیفونی می‌باشد. در تحقیق حاضر ۱۸ آزمایش در غلظت ثابت ۲۰ گرم بر لیتر و دبی ثابت ۰/۷ لیتر بر ثانیه در سه شیب ۰، ۱/۵ و ۲/۵ درصد انجام شد. در شکل ۱ شماتیکی از فلوم نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک فلوم و تجهیزات وابسته.

مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل ابعادی متغیرهای حاکم در جدول ۱ قرار دارد.

جدول ۱- متغیرهای حاکم برای انجام تحلیل ابعادی.

| نام متغیر      | متغیر  | بعد             |
|----------------|--------|-----------------|
| ارتفاع پیشانی  | $h$    | L               |
| ارتفاع مانع    | $h_m$  | L               |
| سرعت پیشانی    | $V$    | $LT^{-1}$       |
| شیب            | $S$    | 1               |
| ثقل کاهش یافته | $g'$   | $LT^{-2}$       |
| چگالی          | $\rho$ | $ML^{-3}$       |
| لزجت دینامیکی  | $\mu$  | $ML^{-1}T^{-1}$ |

در این رابطه  $\theta$  زاویه شیب کف بستر،  $U_f$  سرعت پیشانی جریان و  $H_f$  ارتفاع پیشانی جریان می‌باشد. برای محاسبه عدد رینولدز نیز از رابطه ۳ استفاده شد.

$$R_e = \frac{\rho_t U_f H_f}{\mu} \quad [۳]$$

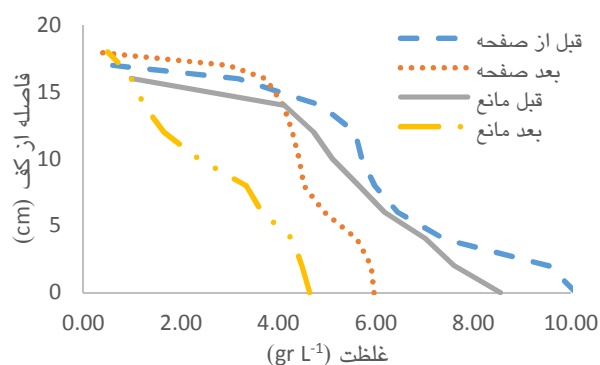
در این رابطه  $\rho_t$ : جرم واحد حجم اولیه جریان غلیظ و  $\mu$ : لزجت دینامیکی جریان غلیظ می‌باشد. به منظور کنترل میزان جریان غلیظ از دبی رسوبی پیشانی جریان غلیظ استفاده شد. دبی رسوبی پیشانی جریان غلیظ از رابطه ۴ تعیین گردید.

با استفاده از روش باکینگهام و با توجه به این‌که متغیرها دارای سه بعد اصلی  $M, L, T$  هستند،  $\rho$  و  $h$  و  $V$  به عنوان متغیرهای تکراری انتخاب و پارامترهای بدون بعد به دست آمده در این آزمایش شامل شیب، عدد رینولدز، عدد فرود دنسومتریک پیشانی جریان غلیظ و  $\frac{\text{ارتفاع مانع}}{\text{ارتفاع بارآبی}}$  می‌باشند. با توجه به این‌که میزان غلظت جریان غلیظ در تمامی آزمایش‌ها مقدار ثابتی بوده است و هم‌چنین اختلاف دما از ۰/۸ درجه کمتر بوده است، می‌توان از اثر عدد رینولدز صرف نظر نمود. از طرفی با توجه به این‌که محدوده عدد رینولدز در تمامی آزمایش‌ها تحقیق حاضر بالای ۲۰۰۰ بوده است، به عنوان پارامتر مؤثر مطرح نمی‌باشد. در ادامه عدد فرود دنسومتریک پیشانی جریان به عنوان مهم‌ترین پارامتر که نشان دهنده شرایط ورودی جریان است، در آزمایش‌ها به عنوان پارامتر بی بعد

## نتایج و بحث

موانع متخلخل (چینه) نسبت به صفحه‌ی متخلخل اجرای راحت‌تری دارد. ارتفاع سازه احداث شده با چینه از صفحه متخلخل که اوهی و اشلایدز (۲۰۰۷) ارتفاع ۳ برابر بدنه جریان غلیظ را برای آن پیشنهاد نمودند، بسیار کمتر می‌باشد. کاهش ارتفاع برای مانع متخلخل، شرایطی را به وجود می‌آورد که جریان بتواند علاوه بر عبور از بدنه مانع، از روی مانع نیز عبور کند. با توجه به این‌که هدف تحقیق حاضر بر روی دبی جریان رسوبی حاصل از پیشانی جریان غلیظ بوده است و غلظت جریان عبوری از روی مانع به دلیل تداخل با آب ساکن پیرامون چه در زمان بالا رفتن از مانع و چه در زمان عبور از روی مانع، کاهش می‌یابد، لذا با توجه به این شرایط، در مواردی از این تحقیق که پیشانی جریان عبوری از روی مانع جلوتر از پیشانی جریان عبوری از درون مانع قرار گرفته است، مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت برای پیشانی جریان در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر کمتر بوده و از این رو میزان اختلاف کاهش دبی رسوبی برای این حالت افزایش می‌یابد. برای محاسبه میزان دبی رسوبی پیشانی جریان غلیظ با توجه به رابطه ۴، از متوسط غلظت استفاده شده است. غلظت پیشانی با استفاده از نمونه‌گیرهای سیفونی در زمان انجام آزمایش برداشت شده‌اند.

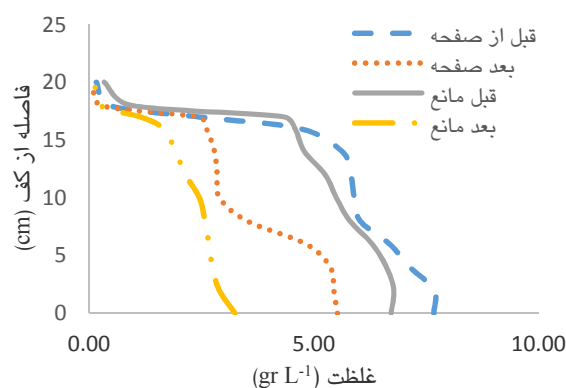
با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که پروفیل غلظت قبل از صفحه و مانع متخلخل، دارای اندکی اختلاف هستند که با توجه به ماهیت ذرات مورد آزمایش که رسوبی بوده‌اند، این اختلاف کم طبیعی می‌باشد. متوسط غلظت قبل و بعد از مانع متخلخل به میزان ۵۸/۹ درصد و برای صفحه متخلخل به میزان ۳۶/۷۴ درصد کاهش داشته است و مانع متخلخل به میزان ۲۲/۱۶ درصد بیش‌تر غلظت را کاهش داده است. در شکل ۳ مقایسه برای شیب ۲/۵ درصد نشان داده شده است.



شکل ۳- پروفیل غلظت قبل و بعد مانع برای صفحه و مانع متخلخل با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در شیب ۲/۵.

توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد که در این حالت نیز اختلاف ناچیز در پروفیل غلظت قبل از مانع متخلخل و صفحه متخلخل به دلیل ماهیت ناپایدار بودن ذرات رسوبی وجود دارد. میزان کاهش متوسط غلظت قبل و بعد از صفحه متخلخل در این حالت ۲۹/۳۳ درصد و برای مانع متخلخل برابر با ۵۴/۰۵ درصد بوده است. میزان اختلاف در این حالت برابر با ۲۴/۷۲ درصد بوده است که مانع متخلخل عملکرد بهتری در کاهش غلظت جریان غلیظ عبوری داشته است. نتایج مربوط به متوسط غلظت قبل و بعد از مانع در جدول ۲ قرار دارد.

مقدار غلظت ورودی به مخزن جریان غلیظ ۲۰ گرم بر لیتر بوده است. متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت بعد از بارآبی تانک و در مخزن ورودی فلوم در محدوده ۱۵-۱۸



شکل ۲- پروفیل غلظت قبل و بعد صفحه و مانع متخلخل برای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در شیب صفر.

دو حالت بدون شیب و شیب‌دار نشان می‌دهند که به حالت قائم نزدیک شده‌اند و این یکنواختی در پروفیل غلظت نشان از برابر بودن قطر ذرات عبوری در این مقطع می‌باشند. برای به‌دام انداختن این بخش از رسوبات باید جریان غلیظ عبوری را کاملاً متوقف نمود که این امر نیازمند مانعی با ارتفاع ۲ الی ۲/۵ برابر ارتفاع بدنه جریان می‌باشد. ایجاد مانع با ارتفاع زیاد به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. متوسط غلظت اندازه‌گیری شده بعد از مانع متخلخل با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر (ارتفاع نسبی ۰/۷۵) نسبت به موقعیت قبل از مانع در حالت بدون شیب ۶۰ درصد و در حالت شیب ۲/۵ درصد، ۵۵ درصد کاهش داشته است و برای صفحه متخلخل با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر (ارتفاع نسبی ۰/۷۵) در حالت بدون شیب ۴۶ درصد و برای شیب ۲/۵ درصد ۲۸ درصد کاهش غلظت داشته است و عملکرد بهتر برای مانع متخلخل نسبت به صفحه متخلخل در ارتفاع‌های دیگر مانع نیز برقرار است. جریان غلیظ پس از برخورد با صفحه متخلخل از داخل تخلخل‌های سطح عبور می‌کند. بخشی نیز پس از برخورد به سمت بالا حرکت کرده و از روی صفحه عبور می‌کند. عبور جریان از روی صفحه بستگی به ارتفاع صفحه دارد به طوری که با افزایش ارتفاع نسبی، این مقدار کاهش می‌یابد و این شرایط برای مانع متخلخل (چینه) نیز برقرار می‌باشد. به‌طور کلی پس از برخورد جریان غلیظ به مانع متخلخل، بسته به ارتفاع مانع و شیب بستر، ۳ حالت زیر می‌تواند اتفاق بیافتد:

نوع اول: در این حالت پیشانی جریان غلیظ عبوری از وی مانع متخلخل جلوتر از جریان غلیظ عبوری از داخل مانع متخلخل می‌باشد (شکل ۴). با پیش‌روی جریان بعد از مانع متخلخل تشخیص و اندازه‌گیری پیشانی جریان عبوری از درون مانع که عقب‌تر قرار دارد سخت می‌باشد.

گرم بر لیتر بوده است. بالا بودن مقدار غلظت متوسط ورودی به فلوم به دلیل عملکرد خوب سیستم گردش در مخزن جریان غلیظ و در مخزن هدتانک بوده است.

جدول ۲- متوسط غلظت قبل و بعد از مانع.

| نوع مانع    | ارتفاع مانع (cm) | متوسط غلظت                     |                                |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|             |                  | قبل مانع (gr L <sup>-1</sup> ) | بعد مانع (gr L <sup>-1</sup> ) |
| بدون مانع   | ۰                | ۰                              | ۲/۶                            |
| بدون مانع   | ۰                | ۱/۵                            | ۳/۸۸                           |
| بدون مانع   | ۰                | ۲/۵                            | ۲/۹۴                           |
| صفحه متخلخل | ۱۵               | ۰                              | ۳/۴۶                           |
| صفحه متخلخل | ۱۵               | ۱/۵                            | ۴/۲۶                           |
| صفحه متخلخل | ۱۵               | ۲/۵                            | ۴/۲۴                           |
| صفحه متخلخل | ۲۴               | ۰                              | ۳/۶۷                           |
| صفحه متخلخل | ۲۴               | ۱/۵                            | ۴/۰۶                           |
| صفحه متخلخل | ۲۴               | ۲/۵                            | ۳/۸۷                           |
| مانع متخلخل | ۱۵               | ۰                              | ۲/۱۵                           |
| مانع متخلخل | ۱۵               | ۱/۵                            | ۲/۰۶                           |
| مانع متخلخل | ۱۵               | ۲/۵                            | ۲/۵۵                           |
| مانع متخلخل | ۲۴               | ۰                              | ۱/۹۱                           |
| مانع متخلخل | ۲۴               | ۱/۵                            | ۲/۰۵                           |
| مانع متخلخل | ۲۴               | ۲/۵                            | ۱/۹۶                           |
| مانع متخلخل | ۳۰               | ۰                              | ۱/۲۹                           |
| مانع متخلخل | ۳۰               | ۱/۵                            | ۱/۸۸                           |
| مانع متخلخل | ۳۰               | ۲/۵                            | ۱/۸۹                           |

از طرفی با توجه به مقادیر متوسط غلظت در جدول ۲ قبل از مانع مشاهده می‌شود که در حدود ۵۰ درصد از رسوبات ورودی به فلوم در محدوده ورودی فلوم تا قبل از مانع ته‌نشین شده است. بخشی دیگر نیز توسط صفحه و مانع متخلخل ته‌نشین شده است که عملکرد مانع متخلخل در کاهش غلظت برای هر دو حالت بدون شیب و شیب‌دار از صفحه متخلخل بسیار بهتر بوده است. باقی‌مانده رسوبات در واقع ذرات ریزی هستند که در محدوده لای قرار می‌گیرند و پروفیل‌های غلظت بعد از مانع در هر



متخلخل در حرکت بود، نمی‌باشند. لذا جهت همسانی و امکان مقایسه بین نتایج حاصل، فقط جریان‌های عبوری پس از مانع که از نوع سوم می‌باشند با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جهت محاسبه دبی جریان غلیظ قبل و بعد از مانع از رابطه ۴ استفاده شده است و با مقایسه آن‌ها و استفاده از رابطه ۵ می‌توان کارایی موانع متخلخل در هر آزمایش را به صورت زیر محاسبه نمود که در آن  $R$  درصد کارایی می‌باشد.

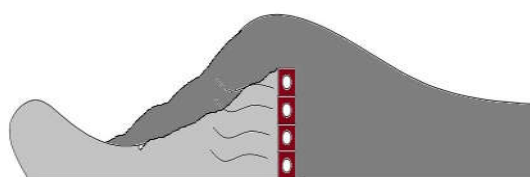
$$R\% = \frac{\text{دبی بعد از مانع} - \text{دبی قبل از مانع}}{\text{دبی قبل از مانع}} \times 100 \quad [5]$$

نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر در جدول ۳ آورده شده است. محدوده عدد فرود دنسیومتریک پیشانی جریان غلیظ از ۰/۲۱۹ تا ۰/۳۲۲ بوده است. در جریان غلیظ، ارتفاع پیشانی جریان غلیظ نسبت به بدنه بیشتر بوده، از طرفی سرعت بدنه جریان از پیشانی بیشتر است و این شرایط باعث یکپارچگی و اتصال بدنه به پیشانی می‌شود و همچنین پیشانی از بدنه جریان غلیظ تغذیه می‌شود. بنا به دو دلیل ذکر شده همواره مقدار عدد فرود دنسیومتریک پیشانی جریان غلیظ، از بدنه کمتر می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع نسبی، کارایی مانع، افزایش می‌یابد و این نتیجه برای حالت بدون شیب و شیب‌دار برای هر یک از حالات صفحه متخلخل و چینه حاکم می‌باشد و میزان کاهش دبی رسوبی برای چینه بیشتر از صفحه می‌باشد و این اثر با افزایش شیب، کاهش می‌یابد. افزایش کارایی مانع متخلخل در مقایسه با صفحه متخلخل به این علت است که در مانع متخلخل، جریان به صورت هم‌زمان در دو جهت، یکی در راستای مسیر حرکت جریان غلیظ و دیگری عمود بر آن وارد تخلخل‌های چینه که از لحاظ حجمی به شکل کره است، می‌شود. ورود هم‌زمان جریان در دو جهت به داخل کره باعث ایجاد حرکت چرخشی جریان در درون تخلخل و برخورد خطوط جریان با یکدیگر شده که این عمل باعث مستهلک شدن بخشی از انرژی جریان می‌شود. برای صفحات



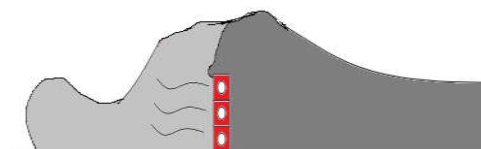
شکل ۴- نوع اول: جریان عبوری از روی چینه جلوتر از جریان عبوری از داخل چینه.

نوع دوم: پیشانی جریان عبوری از داخل چینه از پیشانی جریان عبوری از روی چینه جلوتر می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- نوع دوم: جریان عبوری داخل چینه جلوتر از جریان عبوری از روی چینه.

نوع سوم: در این حالت جریان عبوری از روی چینه و داخل آن پس از عبور از چینه با فاصله کم به یکدیگر می‌پیوندند و با تشکیل یک پیشانی واحد ادامه می‌دهند (شکل ۶).



شکل ۶- نوع سوم: تشکیل پیشانی پس از برخورد با چینه.

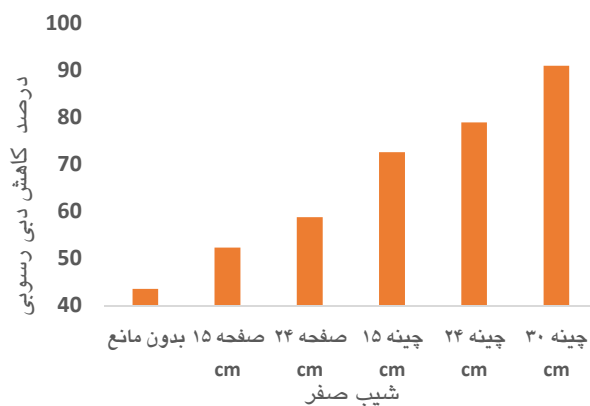
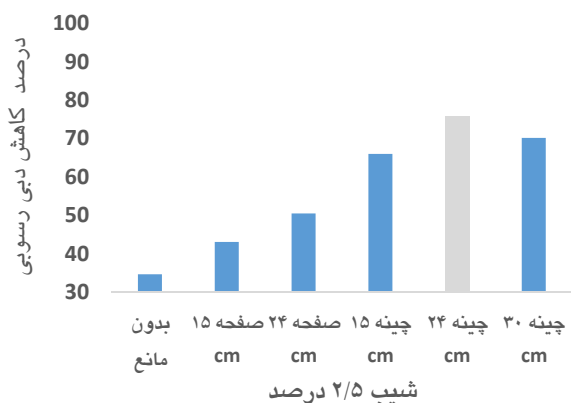
به‌طور کلی جریان عبوری از روی مانع به دلیل رسوب-گذاری و اختلاط با آب پیرامون چه در حال بالا رفتن از مانع و چه در حال عبور از روی مانع، دارای غلظت کمتری نسبت به جریان عبوری از درون مانع بوده است. از آنجایی که هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر صفحات متخلخل و موانع متخلخل (چینه) در کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ عبوری می‌باشد. با توجه به سه حالت بیان شده، نتایج به دست آمده در دو حالت اول و دوم قابل مقایسه با حالت سوم که با پیشانی واحد پس از مانع

از درصد کاهش دبی رسوبی برای مانع متخلخل (چینه) با صفحه متخلخل در شیب صفر و ۲/۵ درصد ارائه شده است.

متخلخل، جریان فقط در راستای حرکت وارد تخلخل‌ها می‌شود و اثر برخورد خطوط جریان در دو راستا برای استهلاک انرژی وجود ندارد. در شکل ۷، نمودار مقایسه‌ای

جدول ۳- نتایج حاصل از بررسی دبی رسوبی جریان غلیظ.

| شماره آزمایش | ارتفاع مانع (cm) | نوع مانع    | ارتفاع مانع (cm) | نسبی (ارتفاع مانع / ارتفاع بارآبی) | عدد فرود دنسیومتریک پیشانی جریان غلیظ | دبی رسوبی در ۴ متری ( $m^3 s^{-1}$ ) | دبی رسوبی در ۶ متری ( $m^3 s^{-1}$ ) | R (درصد کاهش دبی رسوبی) |
|--------------|------------------|-------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| ۱            | ۰                | بدون مانع   | ۰                | ---                                | ۰/۲۱۹                                 | ۰/۰۱۹۸                               | ۰/۰۱۰۹                               | ۴۳/۵۲                   |
| ۲            | ۰                | بدون مانع   | ۱/۵              | ---                                | ۰/۳۲۳                                 | ۰/۰۲۴۵                               | ۰/۰۱۵۰                               | ۳۸/۷۸                   |
| ۳            | ۰                | بدون مانع   | ۲/۵              | ---                                | ۰/۳۳۲                                 | ۰/۰۲۲۲                               | ۰/۰۱۴۵                               | ۳۴/۶۸                   |
| ۴            | ۱۵               | صفحه متخلخل | ۰                | ۰/۷۵                               | ۰/۲۶۵                                 | ۰/۰۲۳۷                               | ۰/۰۱۱۳                               | ۵۲/۳۲                   |
| ۵            | ۱۵               | صفحه متخلخل | ۱/۵              | ۰/۸۱                               | ۰/۲۷۴                                 | ۰/۰۲۶۵                               | ۰/۰۱۳۴                               | ۴۹/۴۳                   |
| ۶            | ۱۵               | صفحه متخلخل | ۲/۵              | ۰/۸۸                               | ۰/۲۸۵                                 | ۰/۰۲۳۰                               | ۰/۰۱۳۱                               | ۴۳/۰۴                   |
| ۷            | ۲۴               | صفحه متخلخل | ۰                | ۱/۲                                | ۰/۲۷۶                                 | ۰/۰۲۶۲                               | ۰/۰۱۰۸                               | ۵۸/۷۸                   |
| ۸            | ۲۴               | صفحه متخلخل | ۱/۵              | ۱/۳۳                               | ۰/۲۷۸                                 | ۰/۰۳۰۳                               | ۰/۰۱۳۷                               | ۵۴/۷۹                   |
| ۹            | ۲۴               | صفحه متخلخل | ۲/۵              | ۱/۵                                | ۰/۲۹۵                                 | ۰/۰۲۷۷                               | ۰/۰۱۳۷                               | ۵۰/۵۴                   |
| ۱۰           | ۱۵               | مانع متخلخل | ۰                | ۰/۷۵                               | ۰/۲۵۸                                 | ۰/۰۲۱۵                               | ۰/۰۰۵۹                               | ۷۲/۵۶                   |
| ۱۱           | ۱۵               | مانع متخلخل | ۱/۵              | ۰/۸۸                               | ۰/۲۷۸                                 | ۰/۰۲۱۱                               | ۰/۰۰۴۶                               | ۸۱/۵۲                   |
| ۱۲           | ۱۵               | مانع متخلخل | ۲/۵              | ۰/۹۴                               | ۰/۲۹۶                                 | ۰/۰۱۹۴                               | ۰/۰۰۶۶                               | ۶۵/۹۸                   |
| ۱۳           | ۲۴               | مانع متخلخل | ۰                | ۱/۱۴                               | ۰/۲۲۲                                 | ۰/۰۲۳۲                               | ۰/۰۰۴۹                               | ۷۸/۸۸                   |
| ۱۴           | ۲۴               | مانع متخلخل | ۱/۵              | ۱/۳۳                               | ۰/۲۸۶                                 | ۰/۰۲۴۱                               | ۰/۰۰۴۷                               | ۸۰/۵۰                   |
| ۱۵           | ۲۴               | مانع متخلخل | ۲/۵              | ۱/۵                                | ۰/۲۹۶                                 | ۰/۰۱۹۴                               | ۰/۰۰۴۷                               | ۷۵/۷۷                   |
| ۱۶           | ۳۰               | مانع متخلخل | ۰                | ۱/۴۳                               | ۰/۲۳۴                                 | ۰/۰۲۴۲                               | ۰/۰۰۲۲                               | ۹۰/۹۱                   |
| ۱۷           | ۳۰               | مانع متخلخل | ۱/۵              | ۱/۶۷                               | ۰/۲۵۶                                 | ۰/۰۱۹۷                               | ۰/۰۰۴۰                               | ۷۹/۷۰                   |
| ۱۸           | ۳۰               | مانع متخلخل | ۲/۵              | ۱/۸۷                               | ۰/۲۹۲                                 | ۰/۰۲۱۰                               | ۰/۰۰۶۳                               | ۷۰/۱۹                   |



شکل ۷- کاهش دبی رسوبی در شیب صفر و ۲/۵ درصد.

دنیومتریکی این تحقیق، مانع متخلخل نسبت به صفحه متخلخل (پیشنهادی اوهی و اشلایدز ۲۰۰۷) با ارتفاع مشابه، عملکرد بهتری داشته، به طوری که با وجود افزایش ۶۰ درصدی ارتفاع صفحه متخلخل نیز کارآیی مانع متخلخل به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر بوده است.



شکل ۸- الف) صفحه متخلخل، ب) مانع متخلخل و پ) برخورد جریان.

۲- با افزایش ارتفاع نسبی مانع، میزان کاهش دبی رسوبی پیشانی جریان غلیظ در حالت بدون شیب و شیب‌دار برای هریک از حالت‌های صفحه و مانع متخلخل افزایش و با افزایش عدد فرود دنیومتریکی پیشانی این میزان کاهش می‌یابد.

#### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت‌های مالی دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان انجام گردیده است و بدین وسیله از آن‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

با توجه به نتایج، در شیب صفر کارآیی چینه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر (ارتفاع نسبی ۰/۷۵) برابر با ۷۲/۵۶ درصد بوده که در مقایسه با صفحه متخلخل با ارتفاع مشابه و حتی صفحه متخلخل با ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر (ارتفاع نسبی ۱/۲) عملکرد بهتری داشته است. میزان اختلاف کارآیی چینه با صفحه ۱۵ سانتی‌متری در این شرایط برابر با ۲۰/۲۴ درصد و با صفحه با ارتفاع ۲۴ سانتی‌متری برابر با ۱۳/۷۸ درصد می‌باشد. این میزان اختلاف در شیب ۲/۵ درصد با صفحه ۱۵ سانتی‌متری ۲۲/۹۴ درصد و با صفحه ۲۴ سانتی‌متری برابر با ۱۵/۴۴ درصد می‌باشد. نتایج فوق نشان می‌دهد که استفاده از مانع متخلخل (چینه) می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظه ارتفاع (در محدوده مورد مطالعه بیش از ۳۷/۵ درصد) در مقایسه با صفحه متخلخل گردد و این عملکرد در مقایسه با مانع غیر متخلخل (اوهی و اشلایدز ۲۰۰۷، اصغری‌پری و همکاران ۲۰۱۰)، هم در شیب صفر و هم در شیب ۲/۵ درصد بوده است. از طرفی با افزایش ارتفاع چینه تا ۳۰ سانتی‌متر (ارتفاع نسبی ۱/۴۳) در شیب صفر میزان کاهش دبی رسوبی بیش از ۹۰ درصد بوده، که نشان‌دهنده عملکرد خوب این نوع از مانع در کنترل جریان غلیظ می‌باشد.

همچنین مطابق با جدول ۴، با افزایش عدد فرود دنیومتریکی پیشانی جریان، میزان دبی رسوبی عبوری از مانع افزایش می‌یابد. شکل ۸ الف) صفحه متخلخل، ب) مانع متخلخل و پ) نیز برخورد جریان غلیظ با چینه ۲۴ سانتی‌متری در شیب ۱/۵ درصد را نشان می‌دهد.

#### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه اثر استفاده از صفحه متخلخل و مانع متخلخل جهت کنترل جریان غلیظ پرداخته شد. استفاده از موانع متخلخل دارای مزایایی از جمله پیش ساخته بودن موانع و راحتی نصب و اجرای این سازه قبل از ساخت سد می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که: ۱- در محدوده عدد فرود

## منابع مورد استفاده

- اصغری پری س ا و محققیان س م، ۱۳۹۳. بررسی عددی تأثیر ایجاد گودال‌های حفاظتی در بستر بر مهار کردن جریان غلیظ. مجله مهندسی آب، جلد ۷، شماره ۲۳، صفحه‌های ۱ تا ۱۲.
- دریایی م، کاشفی پور س م و قمشی م، ۱۳۹۳. بررسی تأثیر مانع و زبری در کنترل جریان غلیظ رسوبی. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحه‌های ۱ تا ۹.
- قربان مقدم ع و قمشی م، ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع چیدمان موانع استوانه‌ای شکل بر سرعت و ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ نمکی. مجله علمی \_ پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۸، شماره ۴، صفحه‌های ۳۳ تا ۴۵.
- Asghari Pari SA, Kashefipour SM, Ghomeshi M and Shafai Bajstan M, 2010. Effects of obstacle heights on controlling turbidity currents with different concentrations and discharges. *Journal of Food Agriculture & Environment* 8(2): 930-935.
- Asghari Pari SA, Kashefipour SM and Ghomeshi M, 2016. 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* 1-13.
- Leong KK, Mok KM and Yeh H, 2006. Fluctuation of the front propagation speed of developed gravity current. *Journal of Hydrodynamics* 18(3): 351-355.
- Nogueira HIS, Adduce C, Alves E and Franca MJ, 2013. Analysis of lock-exchange gravity currents over smooth and rough beds. *Journal of Hydraulic Research* 51(4): 417-431
- Oehy CD, 2002. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Communication No. 15 of the Laboratory of Hydraulic Structures LCH. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland.
- Ohey CD and Schleiss AJ, 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 133(6): 637-648.
- Ohey CD, Cesar GD and Schleiss AJ, 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 48(1): 81-90.
- Oshaghi M, Afshin H and Firoozabadi B, 2013. Experimental investigation of effect of obstacles on the behavior of the density currents. *Canadian Journal of Civil Engineering* 40: 343-352.
- Prinos P, 1999. Two-dimensional density currents over obstacles. *Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, Austria.*
- Woods AW, Bursik MI and Kurbatov AV, 1998. The interaction of ash flows with ridges. *Bulletin of Volcanology* 160: 38-51.
- Yaghubi S, Abbaszadeh Sh, Golchoubian P, Afshin H and Firoozabadi B, 2013. Experimental investigation of the effect of two consecutive obstacles on turbidity current. *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science* 615-627.