

## بررسی آزمایشگاهی کنترل جریان غلیظ نمکی به کمک مانع‌های استوانه‌ای شکل

علی اکبر قربان مقدم<sup>۱\*</sup> و مهدی قمشی<sup>۲</sup>

### چکیده

حرکت یک سیال در سیال دیگر با چگالی متفاوت را جریان غلیظ می‌نامند. در این پژوهش، تأثیر مانع‌های استوانه‌ای شکل بر کنترل جریان غلیظ نمکی در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه شد. مانع‌های استوانه‌ای شکل به قطر یک سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با آرایش زیگزاکی روی بستر قرار داده شدند، به گونه‌ای که در تمام آزمایش‌ها ارتفاع مانع‌ها بیشتر از ارتفاع رأس جریان بود. مانع‌ها با آرایش زیگزاکی در سه چیدمان مختلف در بستر فلوم قرار داده شدند. چیدمان‌های مختلف همراه با تغییر تعداد مانع‌های در سطح بستر فلوم بودند. برای هر چیدمان آزمایش‌ها با شیب‌ها و غلظت‌های متفاوت برای بسترهای بدون مانع و بستر مانع دار انجام شد. نتایج نشان داد که با وجود مانع‌ها سرعت و ارتفاع رأس جریان نمکی کاهش یافته و با افزایش تعداد مانع‌ها در بستر فلوم شدت کاهش سرعت و ارتفاع بیشتر می‌شود. در بستر مانع‌دار، دبی عبوری رأس در طول فلوم کاهش می‌یابد و این روند با افزایش تعداد مانع‌ها بیشتر می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان غلیظ، رأس جریان، مانع‌های استوانه‌ای شکل.

**ارجاع:** قربان مقدم ع. ا. و قمشی م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی کنترل جریان غلیظ نمکی به کمک مانع‌های استوانه‌ای شکل. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۱۱-۱۲۰.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [a.ghorbanmoghadam@yahoo.com](mailto:a.ghorbanmoghadam@yahoo.com)

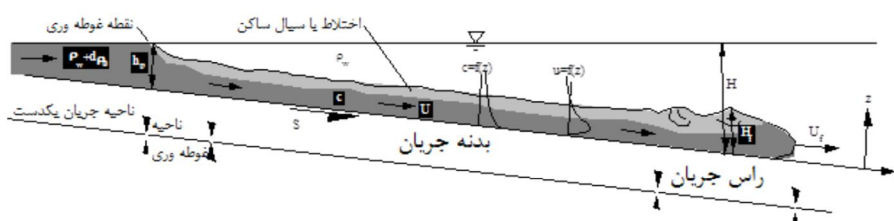
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰

## مقدمه

اگر سیالی با چگالی معلوم وارد یک سیال ساکن با چگالی متفاوت شود، بسته به تفاوت چگالی میان سیال ورودی و سیال ساکن به یکی از صورت‌های زیرجریان، میان‌جریان و یا روجریان درمی‌آید. به این جریان‌ها، جریان‌های غلیظ گفته می‌شود. تفاوت چگالی ممکن است ناشی از درجه حرارت، مواد محلول و مواد معلق باشد. به جریان‌های غلیظ که به صورت زیرجریان حرکت می‌کنند و بالا بودن وزن مخصوص آن‌ها ناشی از مواد معلق است، جریان‌های کدر نیز می‌گویند.

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که جریان‌های غلیظ از چهار قسمت مهم و اساسی تشکیل شده‌اند: ناحیه جریان یکدست، ناحیه غوطه‌وری، بدنه و رأس جریان. جریان‌های غلیظ به واسطه رأس خود به درون توده سیال به نسبت ساکن نفوذ می‌کنند. رأس دارای مشخصات ویژه‌ای است که آن را از بدنه متمایز می‌کند، مشخصاتی مانند ارتفاع بیشتر و سرعت کمتر نسبت به بدنه جریان. حرکت رأس غیردائمی است و عامل این حرکت در توده سیال گرادیان ناشی از اختلاف جرم مخصوص میان رأس و توده سیال است.



شکل ۱- بخش‌های مختلف جریان غلیظ

و ته‌نشین شده و با تخلیه کننده و آبگیر محافظت می‌شوند.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مانع‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر نشان داد که راندمان تله‌اندازی در مانع‌های نفوذناپذیر چشم‌گیر است و ارتفاع بهینه برای این مانع‌های ارتفاعی است که حداکثر ظرفیت را در بالادست ایجاد کند. حالت بهینه مانع‌های نفوذپذیر برای تخلخل‌های ۳۶ تا ۴۱ درصد معرفی شد (وهی و اسچلیس، ۲۰۰۷).

پرینوس (۱۹۹۹) به بررسی تأثیر شکل مانع‌ها پرداخت. بدین منظور از مانع‌های نیم دایره‌ای و مثلثی استفاده شد. نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که شکل مانع تأثیری در بلوک نمودن جریان ندارد. در عدد فرود ۰/۷ تا ۰/۸ مانعی با ارتفاع ۲ برابر ارتفاع رأس جریان، سبب توقف جریان می‌شود.

هنگامی که جریان غلیظ رسوبی به مانع می‌رسد مقداری از آن به دلیل داشتن حرکت کافی از روی مانع عبور می‌کند اما بقیه آن به صورت یک موج متحرک به بالادست منعکس می‌شود. تغییرات زمانی غلظت جریان عبوری از مانع پس از ماندگار شدن جریان قابل دیدن نیست. دانه‌بندی رسوبات عبوری از مانع، ریزتر و غلظت نیز به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد (لمب و همکاران، ۲۰۰۶).

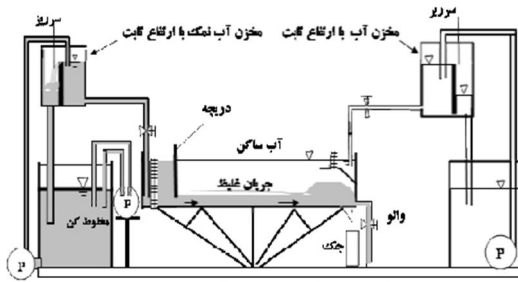
در خصوص ساختار رأس جریان‌های غلیظ و سرعت آن مطالعات بسیاری توسط پژوهش‌گران انجام شده است. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، سرعت رأس جریان تابعی از ارتفاع رأس و شتاب ثقل کاهش یافته معرفی شده است. رابطه (۱) برای محاسبه سرعت رأس ارائه شده است که به رابطه کولگان معروف است (کولگان، ۱۹۵۷).

$$U_h = C \sqrt{g' H_h} \quad (1)$$

در این رابطه  $U_h$  سرعت رأس جریان،  $C$  ضریب کولگان،  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته و  $H_h$  ارتفاع رأس جریان است. کولگان ضریب رابطه خود را ۰/۷ در نظر گرفت (کولگان، ۱۹۵۷). رابطه (۲) دارای تعیین ضریب کولگان براساس شیب بستر ارائه شده است (قمشی، ۱۹۹۵).

$$C = 1.0403 S^{0.0303} \quad (2)$$

در این رابطه  $S$  شیب بستر و  $C$  ضریب کولگان است. برای کنترل رسوب‌گذاری در مخازن سدها، اوهی (۲۰۰۲) با استفاده از آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی، اثرات مانع‌های، اسکرین‌ها، جت‌های آب و پرده هوا را بر جریان کدر مدل کرد. در یک مطالعه موردی در سد گرمسیر، امکان تأثیر جریان کدر با سدهای مستغرق را با مدل‌های عددی ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که به دلیل اثر بلویک سد، رسوبات می‌تواند به طور ناحیه‌ای نگهداری



شکل ۲- شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی

در مجموع ۳۶ آزمایش با شیب‌های ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ درصد با غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر انجام شد. در تمام آزمایش‌ها دبی جریان با دبی سنج الکترومغناطیس در حدود ۱ لیتر بر ثانیه تنظیم می‌شد. از آنجا که جریان بعد از دریچه ناماندگار است، مانع‌ها از فاصله ۱/۵ متری از دریچه شروع شدند. بستر با مانع تا فاصله ۵/۵ متری از دریچه ادامه دارد. مانع‌های به کار برده شده از استوانه‌هایی از جنس پلیکا با قطر ۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شدند و در طول تمام آزمایش‌ها با آرایش زیگزاکی روی کف قرار داده شدند. ارتفاع مانع‌های طوری انتخاب شد که در کلیه آزمایش‌ها رأس جریان غلیظ از مانع‌ها بالاتر نرود. در ۹ آزمایش اول، فاصله عرضی و طولی مانع‌ها از هم ۸ سانتی‌متر (۸×۸) و در ۹ آزمایش دوم فاصله عرضی ۴ سانتی‌متر و طولی آن‌ها ۸ سانتی‌متر انتخاب شد (۴×۸)، در ۹ آزمایش آخر، مانع‌های با فاصله‌های طولی و عرضی ۴ سانتی‌متر (۴×۴) در کنار هم روی بستر به طور کامل صاف قرار گرفتند، ۹ آزمایش نیز با همان شرایط در بستر صاف و بدون مانع انجام شد. دمای سیال غلیظ و سیال تمیز پیرامون در طول همه آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد اما به دلیل اینکه اختلاف دمای دو سیال بسیار کم و در حد ۱-۲ درجه سانتی‌گراد بود از تأثیر آن در حرکت جریان غلیظ صرف‌نظر شد. سرعت و ارتفاع رأس جریان به واسطه فیلم‌برداری و نصب اشل بر روی بدنه فلوم و همچنین روش مکان زمان، در چهار مقطع ۱، ۲، ۳ و ۴ که به ترتیب در فاصله‌های ۲/۲۵، ۳، ۳/۷۵ و ۴/۵ متری از دریچه انتخاب شده بودند اندازه‌گیری شد. مبدا اندازه‌گیری‌ها و محاسبات، محل شروع مانع‌های در نظر گرفته شده است، پس چهار مقطع ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در فواصل ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ متری از اولین ردیف مانع‌ها برای نمونه‌برداری‌ها در نظر گرفته شد.

اصغری‌پری (۱۳۸۸) به بررسی آزمایشگاهی ارتفاعی از مانع که سبب کنترل جریان غلیظ در شرایط مختلف ورودی (دبی، غلظت و شیب) می‌شود پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش شیب اثر ارتفاع مانع در توقف جریان غلیظ کمتر می‌شود.

قربان مقدم و قمشی (۱۳۹۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر مانع‌های استوانه‌ای شکل فقط در یک چیدمان مشخص از مانع‌ها بر مشخصات رأس جریان (سرعت، ارتفاع و غلظت) غلیظ و مقایسه آن‌ها با بستر بدون مانع پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سرعت و غلظت رأس در بستر با مانع در مقایسه با بستر بدون مانع کاهش چشم‌گیری داشته است.

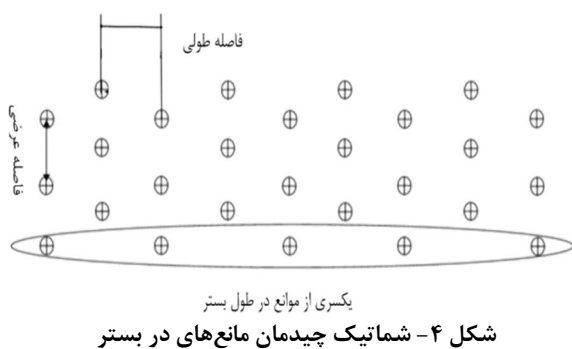
در این پژوهش، برای کنترل جریان غلیظ در مخازن سدها و دلتاها و ... به بررسی تأثیر مانع‌های استوانه‌ای شکل بر مشخصات رأس جریان غلیظ، کنترل و میزان مهار دبی عبوری آن‌ها پرداخته شد. مانع‌ها در چیدمان‌های مختلف و با تراکم‌های متفاوت روی بستر قرار داده شد و بین تعداد مانع‌ها در سطح (تراکم)، مشخصات جریان، میزان دبی عبوری رأس از مقطع‌های مختلف و دیگر پارامترهای مؤثر بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات و شرح انجام آزمایش

فلومی با طول ۷/۸ متر، عرض ۳۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر با قابلیت تغییر شیب بستر تا ۴ درصد، برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. سطح آب درون فلوم با سرریزی به ارتفاع ۶۶ سانتی‌متر که در انتهای آن قرار داشت، در هنگام آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. از محلول آب و نمک به عنوان سیال غلیظ استفاده شد. سیال غلیظ در مخزن ۲۰۰۰ لیتری تهیه و سپس برای ایجاد هد ثابت به مخزنی در ارتفاع بالاتر از سطح فلوم منتقل می‌شد. سیال غلیظ از مخزن بالادست با خط لوله‌ای به محوطه پشت دریچه منتقل می‌شد و پس از هم‌تراز شدن سطح سیال غلیظ پشت دریچه و آب درون فلوم، دریچه به صورت ناگهانی به میزان ۵ سانتی‌متر باز می‌شد. شماتیک تجهیزات اختلاط، تجهیزات فلوم و دریچه در شکل ۲ نشان داده شده است.

بهترین فاصله بین مانع‌ها در طول فلوم، طول ناحیه ویک است. با قرار گرفتن مانع‌ها در ناحیه ویک امکان برخورد خطوط جریان با آن مانع کم می‌شود و فشار هیدرودینامیکی بسیار کمی را متحمل می‌شود که در نهایت راندمان آن مانع کاهش می‌یابد. تعداد مانع‌های در عرض بستر فلوم یا تعداد سری‌های آن‌ها در طول بستر، به اندازه‌ای می‌تواند باشد که تبدیل به مانع یکپارچه در عرض فلوم نشود. نحوه چیدمان مانع‌ها در شکل ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



نیروهای مقاومتی کمی که در اثر برخورد خطوط جریان با مانع‌های ایجاد می‌شود سبب پس زدن جریان و ایجاد امواج کوچکی در سطح جریان می‌شود. با زیاد شدن تعداد مانع‌ها احتمال قرارگیری مانع‌های در انتهای ناحیه ویک و همچنین احتمال برخورد سیال غلیظ با سطوح لایه مرزی آن‌ها بالا می‌رود و منطقی است که شدت اختلاط سیال غلیظ با سیال پیرامون افزایش یابد.

در این پژوهش، مانع‌ها با سه مدل روی بستر قرار داده شدند. فاصله‌های عرضی و فاصله‌های طولی مانع‌ها در واقع بیانگر تعداد آن‌ها در سطح نیز است. پس با کاهش فاصله‌های عرضی و طولی مانع‌های در واقع تراکم مانع‌ها یا تعداد آن‌ها در سطح افزایش می‌یابد و با افزایش این فواصل تراکم مانع‌ها کاهش می‌یابد. چیدمان ۴×۴ بالاترین تراکم و چیدمان ۸×۸ کمترین تراکم و چیدمان ۴×۸ تراکمی بین این دو را دارد.

پس منطقی است که در چیدمان ۴×۴ احتمال برخورد جریان با مانع‌های بالا رفته و همچنین احتمال قرار گرفتن مانع‌های در فاصله بهینه نیز بالا رود و شدت اختلاط افزایش یابد.

در این پژوهش تغییرات ارتفاع و سرعت رأس جریان به صورت بی‌بعد بررسی می‌شود. برای بی‌بعد شدن ارتفاع و

نمونه‌های غلظت رأس جریان نیز با استفاده از سیفون‌های نمونه‌گیری در ۴ مقطع مذکور برداشت شد.

### تحلیل ابعادی

با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر بر جریان و هدف پژوهش با روش باکینگهام اعداد بدون بعد به شرح زیر به دست آمده است.

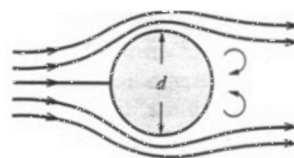
$$F\left(\frac{Q_h}{Q_1}, \frac{U_1}{(g'H_1)^{0.5}}, \frac{P}{d}, \frac{T}{d}, \frac{X}{d}, S\right) = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳) منظور از اندیس  $h$  مقدار پارامتر در مقطع‌های ۲، ۳ و ۴ است و اندیس ۱ در همه پارامترها نماد مقطع ۱ است.

نسبت دبی عبوری رأس از مقطع‌های ۲، ۳ و ۴ به دبی عبوری از مقطع ۱ است.  $\frac{U_1}{(g'H_1)^{0.5}}$  عدد بی‌بعد فرود دینامیک مقطع ۱ است که ارتفاع، سرعت، غلظت رأس جریان و شتاب ثقل کاهش یافته در مقطع ۱ را در خود جای داده است.  $\frac{P}{d}$  نسبت فاصله عرضی مانع‌های از هم به قطر مانع‌های،  $\frac{T}{d}$  نسبت فاصله طولی مانع‌ها به قطر مانع‌ها،  $\frac{X}{d}$  نسبت فاصله مقطع مورد نظر از مبدأ (اولین ردیف مانع‌های) به قطر مانع‌های،  $S$  شیب بستر جریان که با درصد بیان می‌شود.

### نتایج و بحث

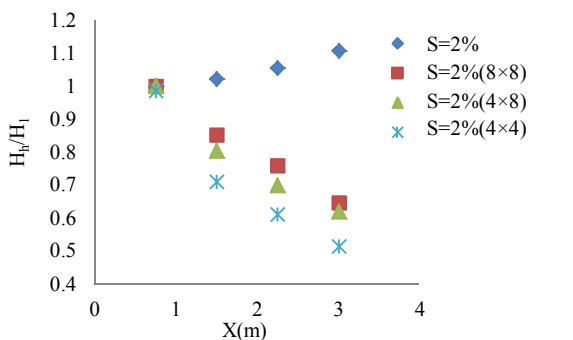
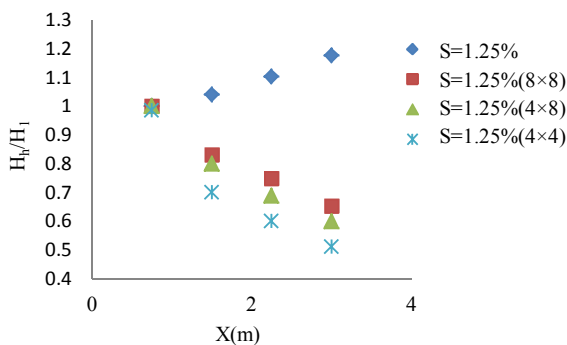
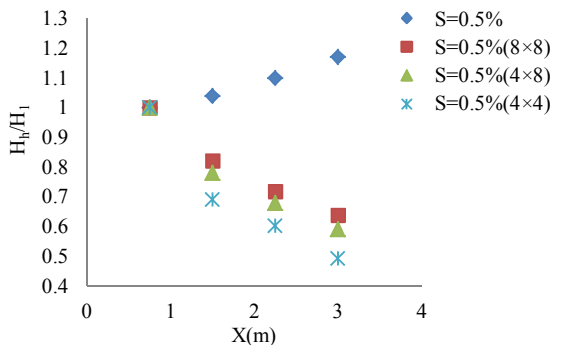
با رسیدن سیال به مانع‌ها استوانه‌ای شکل، خطوط جریان از هم جدا شده و با انحراف از مسیر حرکتشان واگرا می‌شوند و با توجه به سرعت حرکت سیال با طی کردن فاصله‌ای بعد از مانع این خطوط موازی شده و به صورت موازی و یکنواخت ادامه پیدا می‌کنند. ناحیه ویک ایجاد شده در پشت هر مانع در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- خطوط جریان اطراف مانع استوانه‌ای شکل

با ناموازی شدن خطوط جریان، تلاطم و افت انرژی در جریان بیشتر می‌شود. با قرار گرفتن مانع‌ها در انتهای ناحیه ویک امکان موازی بودن خطوط جریان کاهش یافته و تلاطم خطوط جریان بیشینه می‌شود.

تماس رأس جریان با مانع‌های کاهش می‌یابد و به دنبال آن تلاطم و مجموع نیروهای کاهنده حاصل از برخورد جریان با مانع کاهش می‌یابد در نتیجه ارتفاع رأس جریان کمتر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت خطوط جریان، طول ناحیه و یک ایجاد شده پشت مانع‌ها افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال حضور مانع‌های در فاصله اپتیمم تغییر می‌کند.



شکل ۵- تغییرات ارتفاع رأس جریان غلیظ نمکی برای سیال غلیظ ۱۰ گرم در لیتر در سه شیب ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ درصد

### تأثیر تراکم مانع‌های استوانه‌ای شکل بر سرعت رأس جریان غلیظ نمکی

بررسی تغییرات سرعت رأس جریان در بستر بامانع و بدون مانع برای سه غلظت از سیال غلیظ در سه شیب بستر متفاوت نشان می‌دهد که در بستر بدون مانع و بستر با

سرعت رأس از نسبت این متغیرها در مقطع‌های ۲، ۳ و ۴ به مقطع ۱ استفاده شد.

مقدار  $H_H/H_1$  نسبت ارتفاع رأس جریان در مقطع‌های ۲، ۳ و ۴ را به مقطع ۱ و مقدار  $U_H/U_1$  نسبت سرعت رأس جریان در مقطع‌های ۲، ۳ و ۴ را به مقطع ۱ نشان می‌دهد.

تغییرات غلظت جریان نمکی بسیار کم است به دلیل اینکه تغییرات آن فقط تابع شدت اختلاط است و ته‌نشینی ندارد، از این رو تأثیر آن در عدد فرود دنسیمتریک در نظر گرفته می‌شود.

### تأثیر تراکم مانع‌های استوانه‌ای شکل بر ارتفاع رأس جریان غلیظ نمکی

بررسی تغییرات ارتفاع رأس در سه شیب و سه غلظت مختلف نشان می‌دهد که ارتفاع رأس جریان در بستر بدون مانع در طول فلوم روند افزایشی دارد، در حالیکه در بستر بامانع این روند به طور کامل کاهشی است. در بستر بدون مانع به دلیل تنش برشی که در مرز سیال تمیز و سیال غلیظ ایجاد می‌شود، مقداری از سیال تمیز وارد سیال غلیظ شده که سبب افزایش ارتفاع رأس در امتداد حرکت در طول فلوم می‌شود. برای نمونه تغییرات ارتفاع رأس در سه شیب برای سیال غلیظ ۱۰ گرم در لیتر در شکل ۵ نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در بستر مانع‌دار هرچه تعداد مانع‌های در بستر فلوم بیشتر می‌شود روند کاهشی ارتفاع رأس شدت می‌گیرد، از این رو در چیدمان  $4 \times 4$  که بیشترین تعداد مانع‌ها را دارد، بیشترین نرخ کاهش ارتفاع مشاهده می‌شود و به ترتیب در چیدمان  $8 \times 8$  و  $4 \times 8$  شدت کاهش ارتفاع رأس کاهش می‌یابد. در بستر بدون مانع با افزایش غلظت یا افزایش شیب بستر با بالا رفتن سرعت جریان و افزایش تنش برشی در مرز بین دو سیال، میزان اختلاط بالا می‌رود و در نتیجه شدت افزایش ارتفاع رأس بالا می‌رود اما در بستر با مانع این روند به طور کامل معکوس شده است. یکی از دلایل‌های این موضوع می‌تواند این باشد که با افزایش شیب بستر و افزایش غلظت سیال غلیظ، ارتفاع رأس جریان کم و سرعت حرکت آن بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه با افزایش سرعت رأس، شدت برخورد جریان با مانع‌ها افزایش می‌یابد ولی تأثیر آن بسیار کم بوده پس با کاهش ارتفاع رأس در واقع سطح

### تأثیر تراکم مانع‌های استوانه‌ای شکل بر دبی عبوری

#### رأس جریان غلیظ نمکی

یکی از نکته‌های مهم در کنترل جریان غلیظ، دبی رأس عبوری است. برای بررسی دقیق این موضوع، تغییرات دبی رأس جریان غلیظ که با استفاده از سرعت و ارتفاع رأس جریان غلیظ به دست آمد، برای شیب بستر ۱/۲۵ و ۲ درصد در سه غلظت مختلف سیال غلیظ در جدول ۱ نشان داده شده است.

بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که بیشترین نرخ کاهش دبی رأس در بستر با مانع‌های متراکم‌تر رخ می‌دهد. با افزایش غلظت سیال غلیظ و یا افزایش شیب بستر، سطح برخورد جریان با مانع‌ها کاهش می‌یابد که سبب کاهش اختلاط سیال غلیظ با سیال تمیز شده و در نتیجه مقدار کاهش دبی عبوری رأس در امتداد بستر مانع‌دار کاهش می‌یابد.

#### بررسی رابطه دبی عبوری نسبی رأس جریان با عدد

$$Fr_{den1}$$

منظور از  $Fr_{den1}$  عدد فرود دنسیمتریک مقطع اول است. با افزایش شیب بستر جریان و یا افزایش غلظت سیال غلیظ، عدد فرود دنسیمتریک آن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود دنسیمتریک و کاهش سطح برخورد جریان غلیظ با مانع‌های، نسبت دبی عبوری رأس در مقاطع مختلف در امتداد بستر مانع‌دار افزایش می‌یابد. شکل ۷ ارتباط دبی نسبی عبوری رأس در مقابل عدد فرود دنسیمتریک مقطع اول را نشان می‌دهد.

#### بررسی رابطه دبی عبوری نسبی رأس جریان با

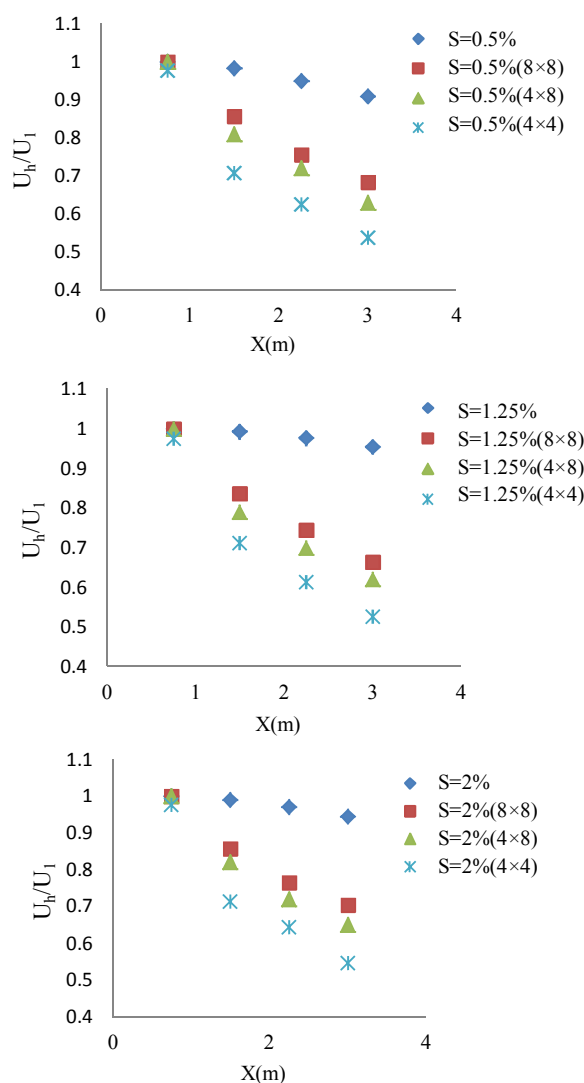
$$\frac{T}{d} \text{ و } \frac{P}{d}$$

به منظور بررسی این موضوع، شکل ۸ رسم شده است که تغییرات دبی عبوری نسبی رأس جریان را در مقابل عدد  $\frac{T}{d}$  و  $\frac{P}{d}$  در یک مقطع برای دو شیب بستر در دو غلظت مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه قطر مانع‌ها در طول تمام آزمایش‌ها ثابت بوده است، تغییرات  $\frac{T}{d}$  و  $\frac{P}{d}$  فقط تابع تغییرات فاصله عرضی (P) و فاصله طولی (T) مانع‌ها از هم است. شکل ۸ بیانگر تراکم مانع‌ها و چیدمان و نظم آن‌ها نیز است. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که در یک نسبت از  $\frac{P}{d}$  یا  $\frac{T}{d}$  دبی عبوری در چیدمانی از مانع‌های کمتر است که آن‌ها بیشتر

مانع سرعت رأس جریان روند کاهشی داشته است، اما روند کاهش سرعت در بستر با مانع شدت بیشتری دارد. برای نمایش این تغییرات، به‌عنوان نمونه، شکل ۶ برای سیال غلیظ ۲۰ گرم در لیتر در سه شیب بستر رسم شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد در چیدمان  $4 \times 4$  بیشترین کاهش سرعت رخ داده و در چیدمان  $4 \times 8$  کاهش سرعت شدت کمتری داشته است. همچنین شدت کاهش سرعت در چیدمان  $8 \times 8$  کمترین است. نتایج نشان می‌دهد که در بستر با مانع با افزایش شیب یا افزایش غلظت سیال غلیظ که سبب کاهش ارتفاع و افزایش سرعت رأس جریان می‌شوند، نرخ کاهش سرعت رأس کاهش می‌یابد.



شکل ۶- بررسی تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ برای سیال غلیظ ۲۰ گرم در لیتر در سه شیب ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ درصد

به نتایج آزمایش‌ها، تغییرات شیب به دلیل تغییراتی که در سرعت و ارتفاع رأس ایجاد می‌کند باعث تغییراتی در دبی عبوری رأس می‌شود اما این تغییرات بسیار کم است. برای نمونه، تغییرات دبی عبوری رأس در سومین مقطع نمونه برداری، برای سیال غلیظ ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر در برابر تغییرات شیب بستر در شکل ۹ نشان داده شده است.

باشد. با افزایش فاصله عرضی یا فاصله طولی مانع‌های به دلیل کاهش تراکم مانع‌های نسبت اختلاط کاهش می‌یابد و نسبت دبی عبوری رأس افزایش می‌یابد.

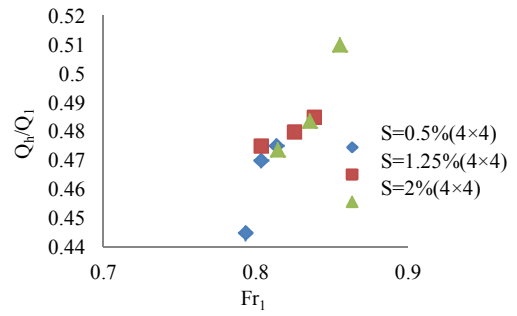
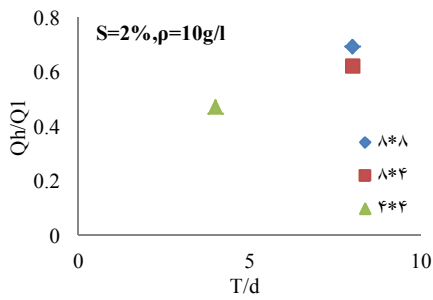
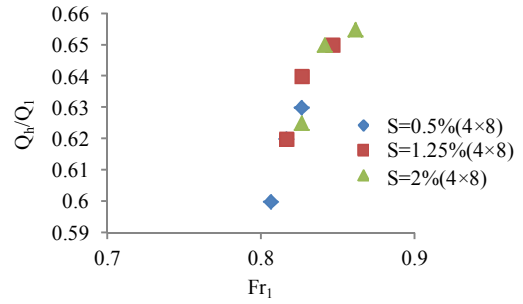
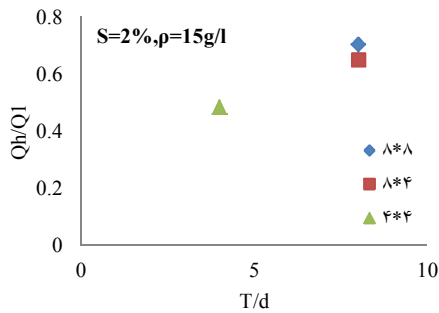
### بررسی رابطه افت دبی رأس جریان با پارامتر بی بعد

S

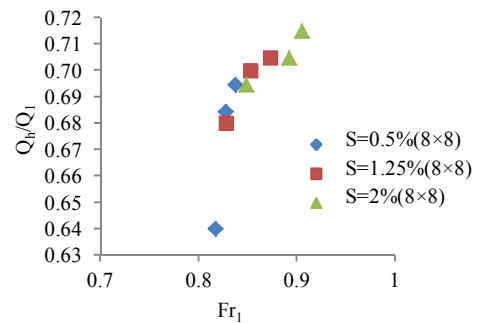
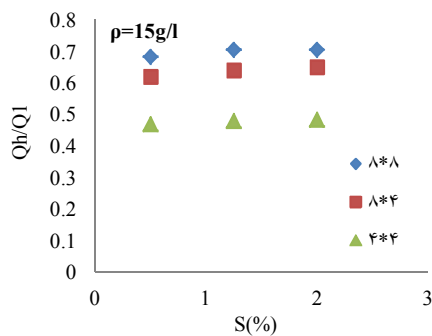
بررسی نتایج نشان می‌دهد که دبی عبوری رأس در همه شیب‌ها برای موانعی با تراکم بیشتر، کمتر است. با توجه

جدول ۱- تغییرات نسبی دبی رأس جریان غلیظ

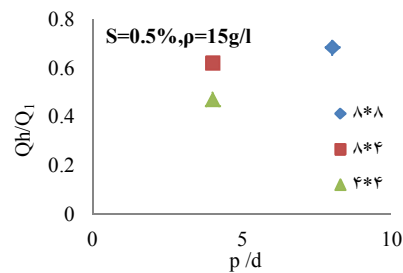
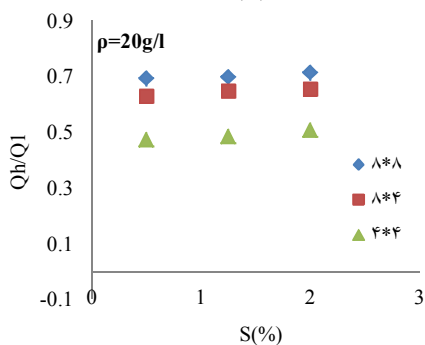
چیدمان مانع‌های	شیب بستر (٪)	غلظت سیال (g/l)	فاصله از مبدا (m)	Q <sub>2</sub> /Q <sub>1</sub>	چیدمان مانع‌های	شیب بستر (٪)	غلظت سیال (g/l)	فاصله از مبدا (m)	Q <sub>2</sub> /Q <sub>1</sub>	چیدمان مانع‌های	شیب بستر (٪)	غلظت سیال (g/l)	فاصله از مبدا (m)	Q <sub>2</sub> /Q <sub>1</sub>					
															چیدمان مانع‌های	شیب بستر (٪)	غلظت سیال (g/l)	فاصله از مبدا (m)	Q <sub>2</sub> /Q <sub>1</sub>
	۱/۲۵	۱۰	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱۰	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱۰	۰/۷۵	۱	۱	۱/۲۵	۱۰	۰/۷۵	۱		
	۱/۲۵	۱۰	۱/۵	۱/۰۳	۱/۲۵	۱۰	۱/۵	۰/۷۹	۱/۲۵	۱۰	۱/۵	۰/۷۳	۱/۲۵	۱۰	۱/۵	۰/۵۴			
	۱/۲۵	۱۰	۲/۲۵	۱/۰۶	۱/۲۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۶۸	۱/۲۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۶۲	۱/۲۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۴۸			
	۱/۲۵	۱۰	۳	۱/۰۸	۱/۲۵	۱۰	۳	۰/۶۰	۱/۲۵	۱۰	۳	۰/۵۳	۱/۲۵	۱۰	۳	۰/۳۶			
	۱/۲۵	۱۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱۵	۰/۷۵	۱			
	۱/۲۵	۱۵	۱/۵	۱/۰۱	۱/۲۵	۱۵	۱/۵	۰/۸۰	۱/۲۵	۱۵	۱/۵	۰/۷۲	۱/۲۵	۱۵	۱/۵	۰/۵۵			
	۱/۲۵	۱۵	۲/۲۵	۱/۰۲	۱/۲۵	۱۵	۲/۲۵	۰/۷۰	۱/۲۵	۱۵	۲/۲۵	۰/۶۴	۱/۲۵	۱۵	۲/۲۵	۰/۴۸			
	۱/۲۵	۱۵	۳	۱/۰۴	۱/۲۵	۱۵	۳	۰/۶۰	۱/۲۵	۱۵	۳	۰/۵۵	۱/۲۵	۱۵	۳	۰/۳۸			
	۱/۲۵	۲۰	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۲۰	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۲۰	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۲۰	۰/۷۵	۱			
	۱/۲۵	۲۰	۱/۵	۱	۱/۲۵	۲۰	۱/۵	۰/۸۱	۱/۲۵	۲۰	۱/۵	۰/۷۴	۱/۲۵	۲۰	۱/۵	۰/۵۶			
	۱/۲۵	۲۰	۲/۲۵	۱/۰۲	۱/۲۵	۲۰	۲/۲۵	۰/۷۰	۱/۲۵	۲۰	۲/۲۵	۰/۶۵	۱/۲۵	۲۰	۲/۲۵	۰/۴۹			
	۱/۲۵	۲۰	۳	۱/۰۳	۱/۲۵	۲۰	۳	۰/۶۲	۱/۲۵	۲۰	۳	۰/۵۶	۱/۲۵	۲۰	۳	۰/۳۹			
بستر بدون مانع	۲	۱۰	۰/۷۵	۱	۸×۸	۲	۱۰	۰/۷۵	۱	۴×۸	۲	۱۰	۰/۷۵	۱	۴×۴	۲	۱۰	۰/۷۵	۱
	۲	۱۰	۱/۵	۱/۰۱		۲	۱۰	۱/۵	۰/۸۰		۲	۱۰	۱/۵	۰/۷۴		۲	۱۰	۱/۵	۰/۵۵
	۲	۱۰	۲/۲۵	۱/۰۳		۲	۱۰	۲/۲۵	۰/۶۹		۲	۱۰	۲/۲۵	۰/۶۳		۲	۱۰	۲/۲۵	۰/۴۷
	۲	۱۰	۳	۱/۰۶		۲	۱۰	۳	۰/۶۱		۲	۱۰	۳	۰/۵۵		۲	۱۰	۳	۰/۳۷
	۲	۱۵	۰/۷۵	۱		۲	۱۵	۰/۷۵	۱		۲	۱۵	۰/۷۵	۱		۲	۱۵	۰/۷۵	۱
	۲	۱۵	۱/۵	۱/۰۱		۲	۱۵	۱/۵	۰/۸۰		۲	۱۵	۱/۵	۰/۷۴		۲	۱۵	۱/۵	۰/۵۸
	۲	۱۵	۲/۲۵	۱/۰۴		۲	۱۵	۲/۲۵	۰/۷۰		۲	۱۵	۲/۲۵	۰/۶۵		۲	۱۵	۲/۲۵	۰/۴۸
	۲	۱۵	۳	۱/۰۷		۲	۱۵	۳	۰/۶۲		۲	۱۵	۳	۰/۵۶		۲	۱۵	۳	۰/۳۸
	۲	۲۰	۰/۷۵	۱		۲	۲۰	۰/۷۵	۱		۲	۲۰	۰/۷۵	۱		۲	۲۰	۰/۷۵	۱
	۲	۲۰	۱/۵	۱/۰۲		۲	۲۰	۱/۵	۰/۸۱		۲	۲۰	۱/۵	۰/۷۴		۲	۲۰	۱/۵	۰/۵۹
	۲	۲۰	۲/۲۵	۱/۰۴		۲	۲۰	۲/۲۵	۰/۷۲		۲	۲۰	۲/۲۵	۰/۶۶		۲	۲۰	۲/۲۵	۰/۵۱
	۲	۲۰	۳	۱/۰۵		۲	۲۰	۳	۰/۶۲		۲	۲۰	۳	۰/۵۸		۲	۲۰	۳	۰/۴۰



ادامه شکل ۸-



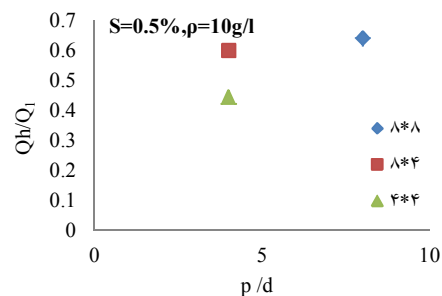
شکل ۷- رابطه دبی نسبی عبوری رأس در مقابل عدد فرود  
دسیمتریک مقطع اول



شکل ۹- رابطه دبی نسبی رأس جریان نسبت به تغییرات شیب

بررسی رابطه دبی عبوری رأس جریان با پارامتر  $\frac{x}{d}$  بی بعد

همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با پیشروی در طول فلوم یا همان افزایش نسبت  $\frac{x}{d}$  دبی عبوری رأس روند کاهشی داشته، اما شدت کاهش آن در



شکل ۸- تغییرات دبی عبوری رأس جریان را در مقابل

عدد  $\frac{T}{d}$  و  $\frac{p}{d}$



جریان با ناحیه ورتکس حول مانع سبب تلاطم و برهم زنی جریان در مقیاس بسیار کوچک می شود. قرار گرفتن مانع ها در انتهای ناحیه ویک مانع دیگر سبب تشدید شدت برخورد خطوط جریان با مانع می شود و تلاطم و برهم زنی جریان حداکثر می شود. افزایش تعداد مانع ها در سطح فلوم احتمال برخورد خطوط جریان با مانع و حضور مانع ها در انتهای ناحیه ویک مانع دیگر را بالا می برد و سبب افزایش راندمان مانع ها می شود.

سرعت رأس جریان در بستر مانع دار مانند بستر بدون مانع روند کاهشی دارد اما شدت کاهش آن در بستر مانع دار بیشتر از بستر بدون مانع است. شدت کاهش سرعت رأس جریان در چیدمان ۴×۴ بیشترین مقدار را دارد و در چیدمان ۴×۸ مقدار آن کم می شود تا اینکه در چیدمان ۸×۸ به دلیل تراکم کم مانع های کمترین مقدار را دارد.

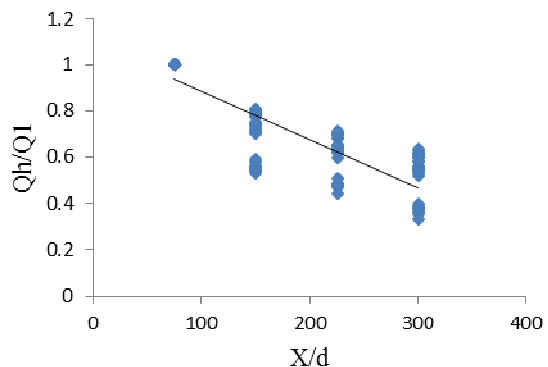
ارتفاع رأس جریان در بستر بدون مانع به دلیل اختلاط کم بین سیال غلیظ و سیال پیرامون در طول فلوم روند افزایشی دارد اما در بستر مانع دار به دلیل شدت اختلاط بالا، روند کاهشی دارد. بیشترین کاهش ارتفاع در چیدمان ۴×۴ و کمترین در چیدمان ۸×۸ رخ می دهد. شدت کاهش ارتفاع و سرعت در بستر مانع دار در ۳ چیدمان مختلف با افزایش شیب بستر و همچنین افزایش غلظت سیال غلیظ کاهش می یابد. شدت اختلاط رأس در بستر مانع دار بیشتر از بستر بدون مانع است و به دنبال آن شدت کاهش دبی رأس در بستر مانع دار با افزایش تراکم مانع ها، افزایش می یابد. بیشترین شدت کاهش دبی عبوری رأس در چیدمان ۴×۴ و کمترین شدت آن در چیدمان ۸×۸ رخ می دهد. در چیدمان ۴×۸ شدت کاهش دبی کمتر از چیدمان ۴×۴ و بیشتر از چیدمان ۸×۸ است. با افزایش شیب بستر و افزایش غلظت سیال غلیظ، شدت کاهش دبی و شدت اختلاط کاهش می یابد.

### منابع

۱. اصغری پری س. ا. ۱۳۸۸. بررسی اثر ارتفاع مانع بر رسوب گذاری مخزن در جریان غلیظ، رساله دکتری رشته سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۷۵ ص.

۲. قربان مقدم ع. و قمشی م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی تأثیر مانع های استوانه ای شکل بر حرکت رأس جریان

طول فلوم کاهش می یابد. با توجه به ثابت بودن قطر مانع ها در طول آزمایش ها، تغییرات نسبت  $\frac{X}{d}$  تابع تغییرات  $X$  است.

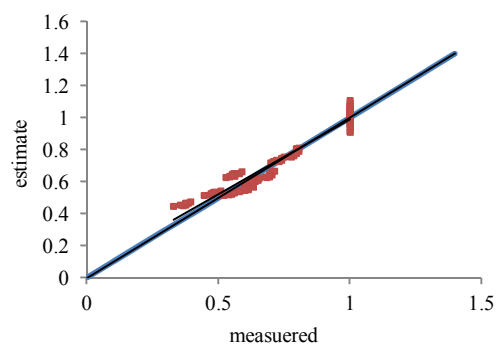


شکل ۱۰- رابطه دبی نسبی رأس با مسافت طی شده

با توجه به اهمیت دبی عبوری رأس در کنترل جریان غلیظ و رابطه ای که با تحلیل ابعادی بین پارامترها برقرار شد، می توان به کمک نرم افزار Spss رابطه ای را برای به دست آوردن دبی رأس در مقاطع مختلف برآزش داد. رابطه (۴) از برآزش ۷۵ درصد از داده های آزمایش ها به دست آمده است.

$$\frac{Q_h}{Q_1} = 5.806 \times Fr^{0.632} \times \left(\frac{T}{d}\right)^{0.184} \times \left(\frac{P}{d}\right)^{0.060} \times \left(\frac{X}{d}\right)^{-0.482} \times s^{0.005} \quad R^2 = 0.94 \quad (4)$$

پارامترهای رابطه (۴) در بخش تحلیل ابعادی کامل شرح داده شده است. قطر مانع های در طول آزمایش ها برابر ۱ سانتی متر بوده است. برای صحت سنجی رابطه (۴)، شکل ۱۱ به کمک ۲۵ درصد از نتایج رسم شده است.



شکل ۱۱- صحت سنجی رابطه (۴)

### نتیجه گیری

با قرار گرفتن مانع های در بستر جریان غلیظ در اطراف هر مانع ناحیه ورتکس و ویک ایجاد می شود که برخورد

غلیظ، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه.

۶۶-۶۵

3. Ghomeshi M. 1995. Reservoir sedimentation modeling” PhD Thesis, University of Wollongong, Australia. 193 p.
4. Keulegan G. H. 1957. The Motion of Saline Fronts in Still Water. Twelfth Progress Report on Model Laws for Density Currents. United States National Bureau Standards Report. 78 p.
5. Lamb M. P. Toniolo H. and Parker G. 2006. Trapping of sustained turbidity currents by intraslope minibasins, Journal of Sedimentology. 53(2): 147-160
6. Oehy C. D. and Schleiss A. J. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. Journal of Hydraulic Engineering. 133(6): 637-648
7. Oehy Ch. 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. 237 p.
8. Prinos P. 1999. Two-dimensional density currents over obstacles, Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, Austria. 234-241.