

بررسی آزمایشگاهی اثر مانع‌های متوالی روی کنترل پیشانی جریان غلیظ در مخازن سد

سید زانیار نیکخواه^۱، سید محمود کاشفی پور^۲ و مهدی دریائی^{۳*}

چکیده

عامل اصلی حرکت رسوبات در مخزن سد، جریان غلیظ است. از این رو، ارائه‌ی راهکارهایی درباره‌ی کنترل جریان غلیظ بسیار ضروری است. در تحقیق حاضر، ۴ حالت مختلف از کارگذاری ۳ مانع متوالی برای کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع موانع با ۳ نسبت از ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ و به صورت ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ و $h_p=0/5$ در نظر گرفته شد. در ۳ حالت از کارگذاری موانع، ارتفاع موانع یکسان و در حالت چهارم، سه مانع به صورت صعودی با اندازه‌های مذکور در مقابل جریان قرار داده شدند. آزمایش‌ها در ۳ شیب صفر، ۱/۵ و ۲/۵ درصد، با دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و دبی ثابت ۱ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که به کار بردن مانع‌های متوالی بر روی مقادیر سرعت و غلظت پیشانی تأثیرگذار است. همچنین، بیشترین درصد مهار جریان غلیظ در شرایط شیب صفر درصد و $h_p=1$ برای دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر به ترتیب به میزان ۸۴ و ۸۷ درصد و کمترین آن در شرایط شیب ۲/۵ درصد و $h_p=0/5$ و به میزان ۲۵ و ۳۱ درصد حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: جریان کدر، شیب بستر، کنترل پیشانی جریان غلیظ، مانع‌های متوالی، مخازن سد.

ارجاع: نیکخواه س. ز. کاشفی پور س. م. و دریائی م. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی اثر مانع‌های متوالی روی کنترل پیشانی جریان غلیظ در مخازن سد. مجله پژوهش آب ایران. ۳۶: ۶۵-۷۴.

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

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

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: Mehdi.Daryaei@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۴

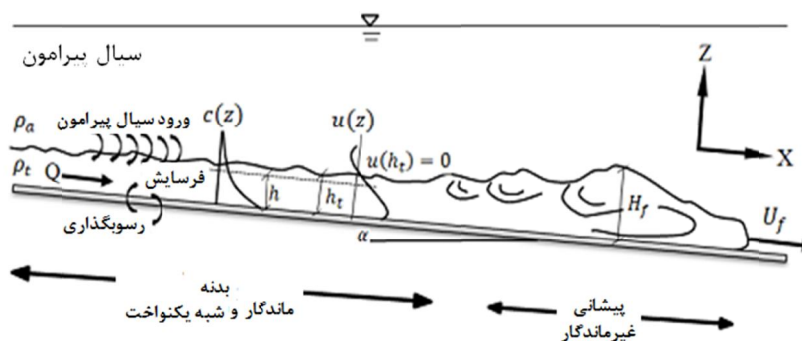
مقدمه

امروزه با توجه به بحران کمبود آب در کشور، مدیریت صحیح در بهره‌برداری از منابع آب شیرین موجود، امری بسیار ضروری است. مخازن سدها، از جمله مهم‌ترین منابع آب شیرین هستند. در صورت از دست رفتن حجم مفید مخازن، ظرفیت آنها در مهار و نگهداری آب، کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عامل در کاهش حجم مفید مخازن، رسوبات است. مهم‌ترین عامل انتقال رسوبات در مخازن سد، جریان غلیظ است. جریان غلیظ، جریانی است که به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر روی شتاب جاذبه

به وجود می‌آید. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح است، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} \quad (1)$$

که در این معادله: g ، شتاب ثقل بر حسب $(\frac{m}{s^2})$ ؛ g' ، شتاب ثقل کاهش یافته بر حسب $(\frac{m}{s^2})$ ؛ ρ_a و ρ_t ، به‌ترتیب دانسیته سیال پیرامون و سیال غلیظ و بر حسب (kg/m^3) هستند. در شکل ۱، شماتیکی از حرکت جریان غلیظ ارائه شده است.



شکل ۱- شماتیکی از حرکت جریان غلیظ (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶)

عمودی، جت ۴۵ درجه و دیوار حباب انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیر مانع مشبک روی کنترل جریان غلیظ از سایر روش‌ها کمتر است. دریایی و همکاران (۱۳۹۳ الف) اثر مانع و زبری را بر کنترل جریان غلیظ رسوبی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کارگذاری زبری می‌توان ارتفاع مانع را برای کنترل جریان غلیظ کاهش داد. دریایی و همکاران (۱۳۹۳ ب) مطالعاتی را روی اثر زبری کف روی سرعت پیشانی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از زبری با ایجاد تلاطم و افزایش دخول سیال پیرامون به درون بدنه و پیشانی جریان غلیظ از غلظت و سرعت آن می‌کاهد. قربانی‌مقدم و قمشی (۱۳۹۴) آزمایش‌هایی را برای بررسی اثر مانع‌های استوانه‌ای شکل با آرایش زیگزاگی بر روی جریان غلیظ نمکی انجام دادند. نتایج آن‌ها به این صورت بود که مانع‌ها، سرعت و ارتفاع رأس جریان غلیظ را کاهش می‌دهند و با افزایش تراکم مانع‌ها، شدت کاهش سرعت و ارتفاع بیشتر می‌شود. ورجاوند و همکاران (۲۰۱۵) اثر زبری کف را روی جریان غلیظ نمکی بررسی کردند. برای

تاکنون مطالعات بسیاری درباره شناخت پدیده‌ی جریان غلیظ انجام شده است. لانگ (۱۹۷۰) با گذاشتن تک مانع مقابل جریان غلیظ به این نتیجه رسید که اگر تقریباً ارتفاع مانع دو برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ باشد، جریان غلیظ کامل مهار می‌شود. پرینوس (۱۹۹۹) مطالعاتی درباره تأثیر شکل مانع بر روی کنترل جریان غلیظ انجام داد. او در آزمایش‌های خود از دو مانع به شکل نیم‌دایره و مثلثی با ارتفاع یکسان استفاده کرد و به این نتیجه رسید که شکل مانع تأثیر معنی‌داری در کنترل جریان غلیظ نخواهد داشت. موریس و الکساندر (۲۰۰۳) مطالعاتی درباره تغییر در جهت جریان در اثر یک مانع گوه‌ای شکل با دیواره‌ی قائم انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان داد که یک مانع نسبتاً کوچک می‌تواند بر الگوی جریان و ضخامت رسوبگذاری تا فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ای تأثیر بگذارد. اوهی و اشلیس (۲۰۰۷)، مطالعاتی بر روی راهکارهای کنترل جریان غلیظ با استفاده از مانع غیرمشبک، مانع مشبک به‌صورت شبکه‌ی ژئوتکستایل عمودی، جت

دوم که در بالای فلوم تعبیه شد، خود به دو قسمت تفکیک می‌شد. با پرشدن قسمت اول، آب به قسمت مجاور سرریز شده و این کار باعث می‌شد تا همیشه تراز محلول آب و نمک ثابت نگه داشته شود (شکل ۲). با بازکردن شیر خروجی تانک بالا، محلول آب و نمک به قسمت ابتدای فلوم در بالادست دریاچه منتقل می‌شد. برای مشاهده‌ی حرکت جریان غلیظ و تشخیص آن از آب زلال، به محلول آب و نمک در مخزن اختلاط، پرمنگنات اضافه شد. پس از هم‌سطح شدن آب ساکن و محلول آب و نمک در بالادست و پایین‌دست دریاچه، دریاچه باز شده و جریان غلیظ به دلیل اختلاف چگالی با سیال پیرامون شروع به حرکت می‌کرد. برای برداشت غلظت پیشانی جریان غلیظ (C_f) از سیفون (شکل ۳) استفاده شد. در انتهای هر کدام از لوله‌های این وسیله، یک شیلنگ و در انتهای هر شیلنگ، یک سرنگ با حجم ۱۵۰ سی‌سی قرار داده شد تا با ایجاد مکش از پیشانی نمونه‌برداری انجام شود. با استفاده از این سیفون نمونه‌گیری از پیشانی جریان غلیظ در فواصل ۳۴ و ۶۶ میلی‌متری از کف انجام و متوسط غلظت در این دو نقطه به‌عنوان غلظت متوسط پیشانی در نظر گرفته شد.

برای تعیین غلظت، میزان EC نمونه‌های به‌دست‌آمده با استفاده از دستگاه EC سنج اندازه‌گیری و با استفاده از معادله‌ی (۱)، میزان غلظت در دو نقطه تعیین شد.

$$C(\text{gr/lit}) = (0.0009EC^2) + (0.51EC) - 0.8862 \quad R^2 = 0.98 \quad (1)$$

در این معادله EC، هدایت هیدرولیکی بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر است. معادله‌ی ۱، از کالیبره کردن EC سنج با اندازه‌گیری EC غلظت‌های مشخص از محلول آب و نمک در آزمایشگاه به‌دست آمد. مانع‌های مورد استفاده از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده و در فواصل ۲، ۲/۵ و ۳ متری از ابتدای دریاچه‌ی کشویی به‌صورت متوالی قرار داده شدند (شکل ۴). ارتفاع موانع با ۳ نسبت از متوسط ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ برای حالت‌های شاهد (بدون وجود سری موانع) و به‌صورت ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ = h_r در نظر گرفته شد (h_r = $\frac{hm}{h}$ که h_m، ارتفاع مانع و h، متوسط ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ برای نمونه‌های شاهد است). متوسط ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ برای حالات شاهد برابر ۵ سانتی‌متر تعیین شد. بدین صورت که در ابتدا با استفاده از دستگاه DOP2000 پروفیل سرعت

این هدف، از زبری‌های مخروطی و استوانه‌ای با سه ارتفاع مختلف استفاده شد. اصغری‌پری و همکاران (۲۰۱۷) اثر ارتفاع تک مانع را بر روی کنترل جریان غلیظ برای دو نوع جریان غلیظ زیربحرانی و فوق‌بحرانی مورد مطالعه قرار داده و رابطه‌ای را برای میزان کنترل جریان غلیظ بر حسب ارتفاع مانع ارائه دادند. هو و لین (۲۰۱۵) جریان غلیظ را در دو شیب، یکی بدون پوشش و دیگری با پوششی از گیاهان مقاوم با ارتفاع بلند مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افت در انرژی به‌دلیل ورود سیال پیرامون به درون بدنه‌ی جریان غلیظ در شیب تندتر و بدون حضور پوشش گیاهی اتفاق خواهد افتاد. همان‌طور که بیان شد، تحقیقات لانگ (۱۹۷۰) نشان داد که با قرار دادن مانعی با ارتفاع ۲ برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ می‌توان آن را به طور کامل مهار کرد. اما باید توجه داشت که علاوه بر مسائل اقتصادی برای ساخت مانعی به ارتفاع ۲ برابر بدنه‌ی جریان غلیظ، استفاده از مانعی با این ارتفاع منجر به تشکیل جریان راکد پشت آن می‌شود که در صورت شکست مانع، حجم زیادی از رسوبات به سمت بدنه‌ی سد حرکت خواهند کرد. بنابراین، ارائه‌ی راهکاری به منظور کاهش ارتفاع مانع ضروری است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر استفاده از موانع با تعداد بیشتر و با ارتفاع کمتر روی کنترل پیشانی جریان غلیظ است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلومی به طول ۷۸۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر با شیب متغیر ۱- تا ۳/۸۶ درصد انجام شد. فلوم توسط یک دریاچه‌ی کشویی به دو قسمت تقسیم می‌شد. سمت راست این دریاچه با آب زلال پر می‌شد. سطح آب زلال توسط دریاچه‌ی موجود در انتهای فلوم ثابت نگه داشته می‌شد. در سمت چپ دریاچه، محلول آب و نمک به‌عنوان سیال غلیظ وارد می‌شد. این دریاچه قادر بود با سرعت بالا، باز و محلول آب و نمک را با دبی مشخص وارد آب زلال کند. فلوم دارای یک مخزن اختلاط به حجم ۱۰۰۰ لیتر و یک تانک در بالا برای ثابت نگه‌داشتن هد محلول آب و نمک بود. هر کدام از این مخزن‌ها، مجهز به همزن بودند. ابتدا، محلول آب و نمک در مخزن پایینی با غلظت مورد نظر تهیه و سپس، به وسیله‌ی پمپ کوچکی به مخزن بالا پمپ می‌شد. مخزن

$$Fr_d = \frac{U_f}{\sqrt{g'H_f \cos\theta}} \quad (3)$$

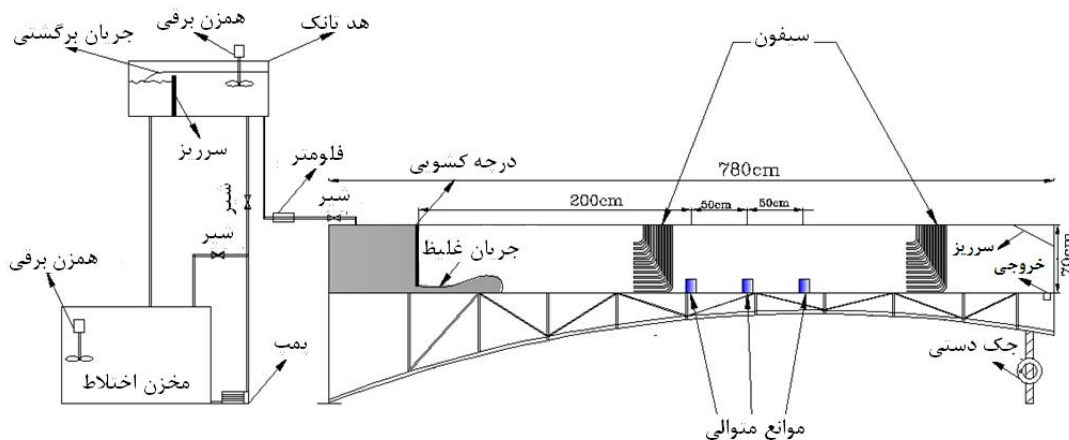
که در این معادله Fr_d ، عدد فرود دنسیمیتریک و θ ، زاویه‌ی شیب کف بستر با امتداد افق است. برای ساده‌نویسی در متن، هر کدام از سناریوهای تعریف‌شده با استفاده از علائم اختصاری مشخص و در جدول ۱ تعریف شدند. لازم به ذکر است در آزمایش‌های ۱ تا ۹ در دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، ارتفاع هر سه مانع ثابت و معادل مقدار h_r است؛ اما در آزمایش‌های ۱۰ تا ۱۲ مانع سه‌گانه به سه اندازه معادل ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به ترتیب صعودی (h_i) در مقابل جریان غلیظ قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های ۱۳ تا ۱۵ به‌عنوان شاهد (W) و بدون کارگذاری مانع هستند.

مقادیر غلظت در بالادست مانع، در مقطعی با فاصله‌ی ۰/۵ متری بالادست اولین مانع و در پایین‌دست مانع، در مقطعی با فاصله‌ی ۱ متری پایین‌دست آخرین مانع، جایی که آشفتگی ناشی از برخورد جریان غلیظ با مانع از بین رفته و جریان دوباره به‌صورت کامل تشکیل می‌شود، برداشت شدند. سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در هر نقطه با استفاده از برجسب‌های اندازه‌گیری نصب شده در طول فلوم و فیلم‌برداری از حرکت جریان غلیظ تعیین شدند. بدین صورت که ارتفاع پیشانی از روی برجسب‌ها خوانده می‌شد و سرعت پیشانی از تقسیم مسافت طی شده توسط پیشانی به زمان پیمودن آن مسافت (برای هر ۰/۵ متر از مسیر حرکت)، تعیین می‌شد. در شکل ۵، نمایی از فلوم مورد استفاده ضمن عبور جریان غلیظ و برجسب‌های موجود ارائه شده است.

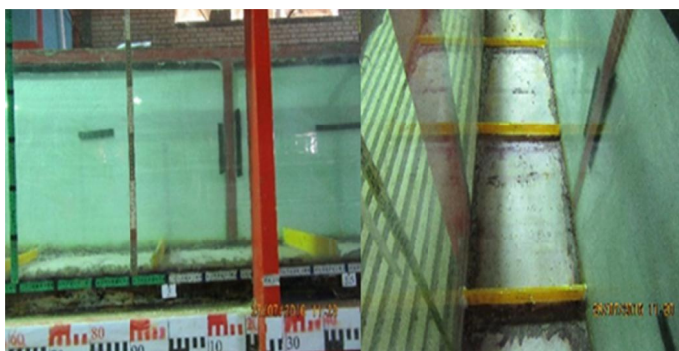
در حالات شاهد برداشت شد. سپس با استفاده از معادله‌ی (۲) ارتفاع بدنه در هر کدام از حالات شاهد محاسبه شده و میانگین آنها به‌عنوان متوسط ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ (h) مورد استفاده قرار گرفت.

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz = \int_0^{h_t} u dz \quad (2)$$

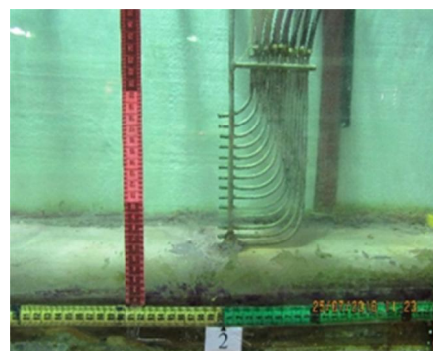
در این معادله: U ، سرعت متوسط بدنه‌ی جریان غلیظ؛ h ، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ؛ u ، سرعت بدنه در هر فاصله z از کف فلوم؛ و h_t ، ارتفاعی است که در آن $u = 0$ است. دستگاه $DOP2000$ قادر به برداشت ۱۵۰ پروفیل سرعت در مقطع و به‌صورت یک‌بعدی در زمان انجام آزمایش است. ارتفاع مانع مورد استفاده برابر ۲/۵، ۳/۷۵ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در سه حالت از کارگذاری مانع، ارتفاع آن‌ها یک اندازه و در حالت چهارم، سه مانع به‌صورت صعودی برای اندازه‌های مذکور در مقابل جریان کارگذاری شدند. فاصله‌ی مانع‌ها از هم ثابت و برابر ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در انجام آزمایش‌ها، دبی جریان غلیظ ثابت و برابر ۱ لیتر بر ثانیه بود. همچنین، جریان غلیظ مورد استفاده در این تحقیق از نوع نمکی است که با غلظت ثابت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها در ۳ شیب صفر، ۱/۵ و ۲/۵ درصد انجام شدند. همچنین تعداد ۶ آزمایش بدون در نظر گرفتن مانع‌ها در شرایط مذکور و به‌عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شدند. در مجموع، ۳۰ سری آزمایش انجام شد. برای تعیین حالت زیربحرانی و فوق‌بحرانی جریان غلیظ از عدد فرود دنسیمیتریک مطابق معادله‌ی (۳) استفاده شد:



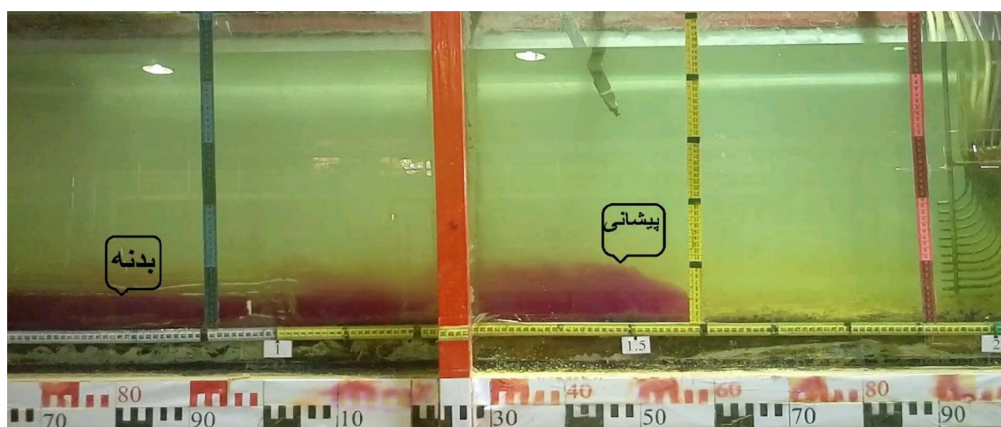
شکل ۲- شماتیکی از فلوم و تجهیزات



شکل ۴- کارگذاری سری موانع در فلوم



شکل ۳- نمونه گیر سیفونی



شکل ۵- نمایی از حرکت جریان غلیظ و برجسب‌های نصب‌شده

جدول ۱- علایم اختصاری سناریوهای تعریف‌شده

ب) غلظت ۱۰ گرم بر لیتر			الف) غلظت ۲۰ گرم بر لیتر		
علایم	شیب (درصد)	h_r	علایم	شیب (درصد)	h_r
$C_1 h_{r(0.5)} S_0$	۰		$C_2 h_{r(0.5)} S_0$	۰	
$C_1 h_{r(0.5)} S_{1.5}$	۱/۵	۰/۵	$C_2 h_{r(0.5)} S_{1.5}$	۱/۵	۰/۵
$C_1 h_{r(0.5)} S_{2.5}$	۲/۵		$C_2 h_{r(0.5)} S_{2.5}$	۲/۵	
$C_1 h_{r(0.75)} S_0$	۰		$C_2 h_{r(0.75)} S_0$	۰	
$C_1 h_{r(0.75)} S_{1.5}$	۱/۵	۰/۷۵	$C_2 h_{r(0.75)} S_{1.5}$	۱/۵	۰/۷۵
$C_1 h_{r(0.75)} S_{2.5}$	۲/۵		$C_2 h_{r(0.75)} S_{2.5}$	۲/۵	
$C_1 h_{r(1)} S_0$	۰		$C_2 h_{r(1)} S_0$	۰	
$C_1 h_{r(1)} S_{1.5}$	۱/۵	۱	$C_2 h_{r(1)} S_{1.5}$	۱/۵	۱
$C_1 h_{r(1)} S_{2.5}$	۲/۵		$C_2 h_{r(1)} S_{2.5}$	۲/۵	
$C_1 h_{r(i)} S_0$	۰		$C_2 h_{r(i)} S_0$	۰	
$C_1 h_{r(i)} S_{1.5}$	۱/۵	حالت صعودی	$C_2 h_{r(i)} S_{1.5}$	۱/۵	حالت صعودی
$C_1 h_{r(i)} S_{2.5}$	۲/۵		$C_2 h_{r(i)} S_{2.5}$	۲/۵	
$C_1 W S_0$	۰		$C_2 W S_0$	۰	
$C_1 W S_{1.5}$	۱/۵	حالت شاهد	$C_2 W S_{1.5}$	۱/۵	حالت شاهد
$C_1 W S_{2.5}$	۲/۵		$C_2 W S_{2.5}$	۲/۵	

بررسی تغییرات سرعت

نتایج حاصل از سرعت پیشانی جریان غلیظ در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، پیشانی جریان غلیظ در همه‌ی شیب‌ها و هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، تا قبل از رسیدن به موانع تقریباً دارای سرعت یکسانی بوده است. با برخورد پیشانی جریان به اولین مانع، سرعت پیشانی کاهش چشمگیری داشته است که این روند کاهشی تا بعد از عبور از آخرین مانع ادامه دارد. در شیب‌های صفر درصد، بعد از عبور پیشانی از موانع و کاهش سرعت در طول عبور از موانع، پیشانی جریان باقیمانده‌ی مسیر تا انتهای فلوم را با سرعت تقریباً ثابت حرکت می‌کند. در شیب ۱/۵ درصد، بعد از عبور پیشانی از آخرین مانع، به دلیل شیب فلوم که عاملی مثبت برای افزایش سرعت پیشانی است، سرعت پیشانی روند صعودی دارد. این عامل در شیب ۲/۵ درصد محسوس‌تر است. دلیل افزایش سرعت بعد از مانع‌ها با افزایش شیب فلوم، افزایش مؤلفه‌ی وزن جریان غلیظ در جهت حرکت است. با افزایش ارتفاع مانع‌ها، درصد کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ بیشتر و افزایش شیب موجب کم‌شدن این درصد نسبت به شیب‌های ملایم‌تر شده است.

مقدار دبی پیشانی جریان غلیظ به صورت زیر محاسبه شد:

$$Q_f = C_f \times H_f \times U_f \times b \quad (۴)$$

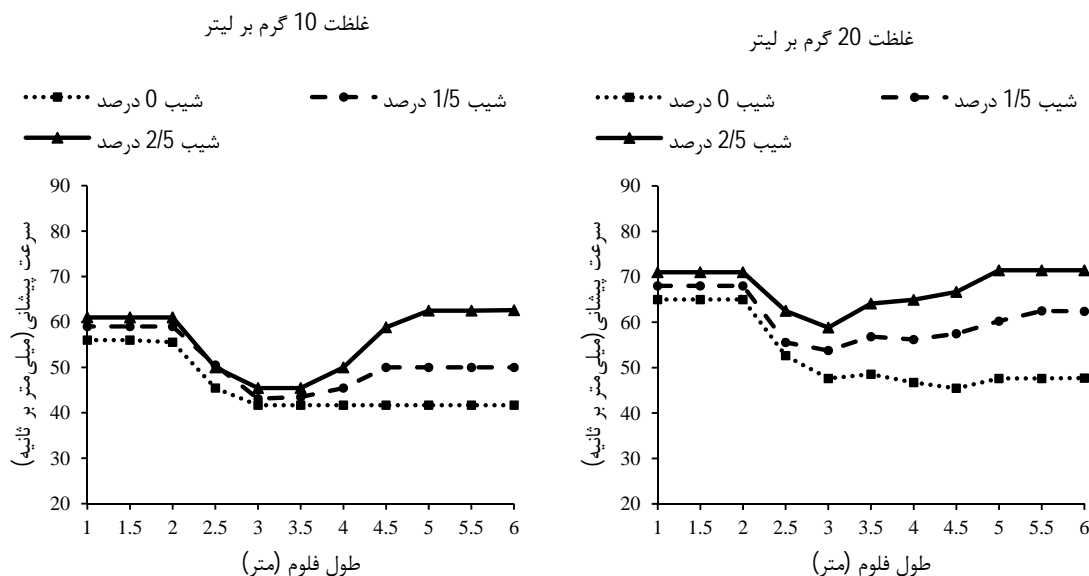
که Q_f دبی پیشانی جریان غلیظ (gr/s) و b عرض کف فلوم و برابر ۰/۳۵ متر است. برای تعیین میزان درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ از معادله‌ی زیر استفاده شد:

$$\Delta Q_f = \frac{Q_{fa} - Q_{fb}}{Q_{fa}} \times 100 \quad (۵)$$

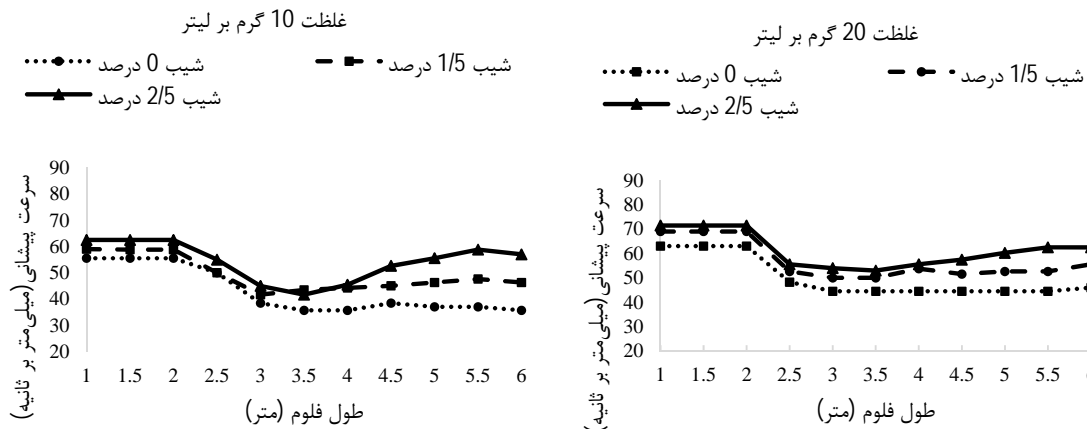
که در این معادله ΔQ_f درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ و Q_{fa} و Q_{fb} به ترتیب دبی پیشانی جریان غلیظ در قبل و بعد از مانع‌ها و بر حسب gr/s هستند.

نتایج و بحث

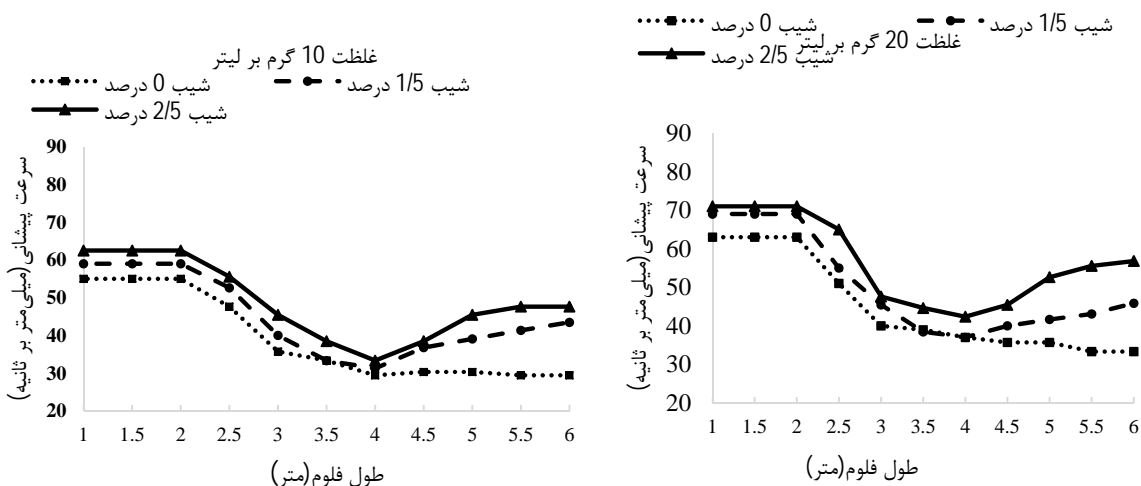
همان‌طور که بیان شد، هدف از انجام تحقیق، بررسی عملکرد استفاده از مانع‌های متوالی بر روی کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ است. در این قسمت، ابتدا تغییرات سرعت پیشانی در طول مسیر حرکت جریان غلیظ و سپس، نتایج حاصل از تأثیر موانع متوالی روی کنترل جریان غلیظ ارائه شده است. محدوده‌ی اعداد فرود دنسیمتریک در آزمایش‌ها به صورت $0.42 < Fr_d < 0.72$ برآورد شد و از این‌رو، در کلیه‌ی آزمایش‌ها جریان در حالت زیربحرانی قرار داشت.



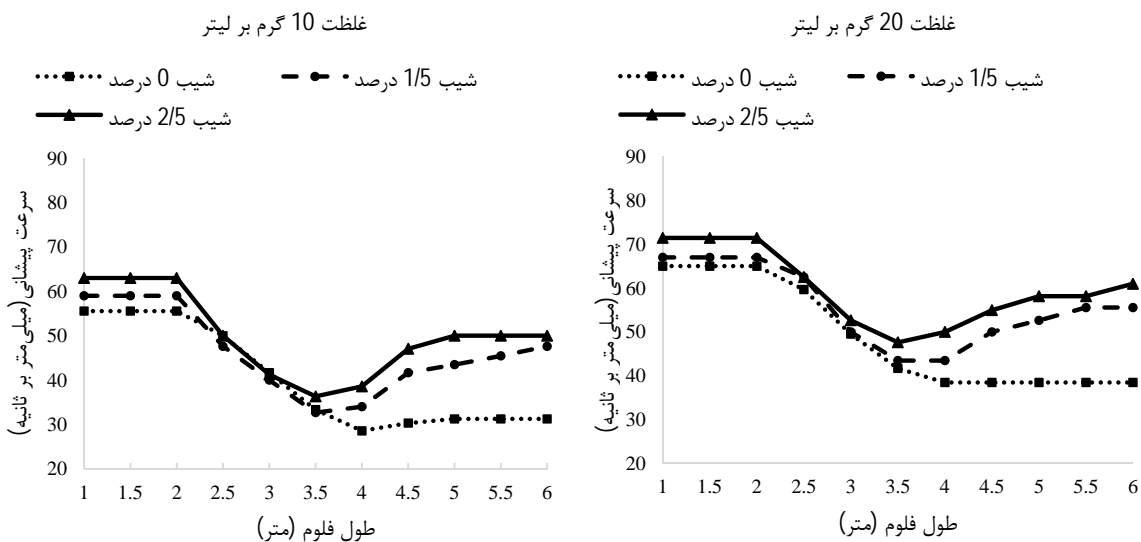
شکل ۶- تغییرات سرعت پیشانی در طول فلوم در کارگذاری مانع‌های $h_r = 0/5$



شکل ۷- تغییرات سرعت پیشانی در طول فلوم در کارگذاری مانع های $h_f = 0.75$



شکل ۸- تغییرات سرعت پیشانی در طول فلوم در کارگذاری مانع های $h_f = 1$



شکل ۹- تغییرات سرعت پیشانی در طول فلوم در کارگذاری مانع های $h_{f(0)}$

کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ

در این تحقیق، کنترل یا کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ به‌وسیله‌ی کارگذاری مانع‌های متوالی بررسی شد. در شکل ۱۰، لحظه‌ی برخورد و عبور جریان غلیظ از روی سری موانع نشان داده شده است. مقدار دبی پیشانی جریان غلیظ با استفاده از معادله‌ی (۴) برای هر یک از سناریوهای تعریف شده در قبل و بعد از موانع تعیین شد. میزان کنترل جریان غلیظ از معادله‌ی (۵) محاسبه و مقادیر درصد کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ برای سناریوهای مورد نظر در تحقیق حاضر در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان دریافت که

با افزایش شیب، درصد کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ در تمامی آزمایش‌ها، کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش شیب، سرعت پیشانی جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه، بعد از برخورد با مانع‌ها، جریان از روی مانع‌ها عبور کرده و مقدار کمتری از جریان برگشت داده می‌شود. بیشترین درصد کنترل دبی پیشانی در دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر مربوط به $h_{r(1)}S_0$ و به ترتیب برابر ۸۴ و ۸۷ درصد و کمترین درصد کنترل دبی پیشانی در هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر مربوط به $h_{r(0.5)}S_{2.5}$ و به ترتیب برابر ۲۵ و ۳۱ درصد است.



شکل ۱۰- نمایی از برخورد پیشانی جریان غلیظ با موانع

پیرامون به درون آن شده که این امر منجر به کاهش غلظت و در نتیجه کاهش سرعت آن می‌شود؛ در نتیجه، دبی عبوری جریان غلیظ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در طبیعت جریان غلیظی که منجر به کاهش حجم مفید مخزن سد می‌شود، به‌صورت رسوبی است. حضور موانع علاوه بر تأثیرهای ذکر شده روی پیشانی، با کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ رسوبی منجر به ته‌نشین شدن رسوبات می‌شود که این امر نیز بر کاهش غلظت و سرعت پیشانی تأثیر بسزایی خواهد داشت. از این‌رو، انتظار می‌رود میزان کنترل جریان غلیظ رسوبی با حضور موانع به مراتب بیشتر از کنترل جریان غلیظ نمکی باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اثر مانع‌های متوالی بر کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ نمکی مورد بررسی قرار گرفت. برای

در صورت استفاده از مانع‌های صعودی، درصد کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ در شیب‌های ۰، ۱/۵ و ۲/۵ درصد به ترتیب برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر برابر با ۷۴، ۵۲، ۴۴ و برای غلظت ۲۰ گرم بر لیتر ۷۸، ۵۸ و ۴۸ درصد به دست آمد. در جدول ۳، درصد تغییرات متوسط میزان کنترل دبی پیشانی برای شیب‌ها و غلظت‌های مورد نظر در حالت $h_{r(i)}$ نسبت به سایر حالات ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که متوسط میزان کنترل دبی پیشانی برای حالت $h_{r(i)}$ نسبت به $h_{r(0.5)}$ ، به میزان ۷۲ درصد بیشتر، نسبت به $h_{r(0.75)}$ ، به میزان ۲ درصد کمتر و نسبت به $h_{r(1)}$ ، به میزان ۱۸ درصد کمتر است. با توجه به معادله‌ی (۴) مشاهده می‌شود که پارامترهای غلظت و سرعت پیشانی، دو رکن اساسی در تعیین مقدار دبی پیشانی جریان غلیظ هستند. عبور پیشانی از روی موانع منجر به پخش شدن آن و دخول هر چه بیشتر سیال

پیشانی جریان غلیظ، تأثیر بیشتری نسبت به حالت $h_{r(0.75)}$ دارد. از طرفی، تأثیر حالت $h_{r(i)}$ با حالت $h_{r(0.75)}$ تقریباً برابر بوده و از حالت $h_{r(1)}$ کمتر است. درباره‌ی تأثیر شیب و ارتفاع موانع نیز در تحقیق حاضر نتایج نشان داد که با برخورد پیشانی جریان به اولین مانع، سرعت پیشانی کاهش چشمگیری داشته است که این روند کاهشی تا بعد از عبور از آخرین مانع ادامه دارد. با افزایش ارتفاع مانع‌ها، درصد کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ بیشتر و افزایش شیب موجب کم‌شدن این درصد کاهش نسبت به شیب‌های ملایم‌تر می‌شود.

این منظور، از چهار سری موانع استفاده شد. سری اول، دوم و سوم متشکل از سه مانع هم‌ارتفاع با ارتفاع‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ ($h_{r(0.5)}$)، $h_{r(0.75)}$ و $h_{r(1)}$ و سری چهارم از سه مانع متوالی با ارتفاع‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ به‌صورت صعودی استفاده شد ($h_{r(i)}$). نتایج نشان داد که وجود موانع علاوه بر برگشت‌دادن پیشانی جریان غلیظ به بالادست، منجر به پخش‌شدن آن در سیال پیرامون و کاهش غلظت آن در ادامه‌ی مسیر بعد از موانع می‌شود که این امر، میزان دبی پیشانی جریان غلیظ را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از حالت $h_{r(i)}$ در کنترل دبی

جدول ۲- مقادیر کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ

ب- غلظت ۱۰ گرم بر لیتر			الف- غلظت ۲۰ گرم بر لیتر		
ردیف	سناریو	درصد کنترل پیشانی جریان غلیظ	ردیف	سناریو	درصد کنترل پیشانی جریان غلیظ
۱	$C_1 h_{r(0.5)} S_0$	۳۹	۱	$C_2 h_{r(0.5)} S_0$	۴۶
۲	$C_1 h_{r(0.5)} S_{1.5}$	۳۰	۲	$C_2 h_{r(0.5)} S_{1.5}$	۳۵
۳	$C_1 h_{r(0.5)} S_{2.5}$	۲۵	۳	$C_2 h_{r(0.5)} S_{2.5}$	۳۱
۴	$C_1 h_{r(0.75)} S_0$	۷۳	۴	$C_2 h_{r(0.75)} S_0$	۷۷
۵	$C_1 h_{r(0.75)} S_{1.5}$	۵۳	۵	$C_2 h_{r(0.75)} S_{1.5}$	۵۹
۶	$C_1 h_{r(0.75)} S_{2.5}$	۴۷	۶	$C_2 h_{r(0.75)} S_{2.5}$	۵۳
۷	$C_1 h_{r(1)} S_0$	۸۴	۷	$C_2 h_{r(1)} S_0$	۸۷
۸	$C_1 h_{r(1)} S_{1.5}$	۷۱	۸	$C_2 h_{r(1)} S_{1.5}$	۷۷
۹	$C_1 h_{r(1)} S_{2.5}$	۵۴	۹	$C_2 h_{r(1)} S_{2.5}$	۶۳
۱۰	$C_1 h_{r(i)} S_0$	۷۴	۱۰	$C_2 h_{r(i)} S_0$	۷۸
۱۱	$C_1 h_{r(i)} S_{1.5}$	۵۲	۱۱	$C_2 h_{r(i)} S_{1.5}$	۵۸
۱۲	$C_1 h_{r(i)} S_{2.5}$	۴۴	۱۲	$C_2 h_{r(i)} S_{2.5}$	۴۸

جدول ۳- تغییرات درصد متوسط کنترل پیشانی جریان غلیظ در حالت $h_{r(i)}$ در شیب‌ها و غلظت‌های مورد نظر نسبت به سایر حالات کارگذاری موانع متوالی با اندازه‌ی یکسان

$h_{r(1)}$	$h_{r(0.75)}$	$h_{r(0.5)}$
-۱۸	-۲	+۷۲

منابع

- دریائی م. کاشفی‌پور س. م. و قمشی م. ۱۳۹۳ الف. بررسی تأثیر مانع و زبری در کنترل جریان غلیظ رسوبی. مجله دانش آب و خاک. ۲۴(۴): ۹-۱.
- دریائی م. کاشفی‌پور س. م. و قمشی م. ۱۳۹۳ ب. بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف بر روی سرعت پیشانی و بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی. مجله دانش آب و خاک. ۳۷(۳): ۳۱-۲۱.
- قربانی‌مقدم ع. ا. و قمشی م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی کنترل جریان غلیظ نمکی به کمک مانع‌های استوانه‌ای شکل. مجله پژوهش آب ایران. ۹(۳): ۱۱۱-۱۲۰.
- Altinakar M. S. Graf W. H. and Hopfinger E. J. 1996. Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research. 34(5): 713-718.
- Asghari Pari S. A. Kashefipour S. M. and Ghomeshi M. 2017. An experimental study to

- determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9): 1080-1092.
6. Long R. R. 1970. Blocking effects in flow over obstacles. *Tellus*, 22: 471-480.
 7. Ho H. C. and Lin Y. T. 2015. Gravity currents over a rigid and emergent vegetated slope. *Advances in Water Resources*, 76: 72-80.
 8. Morris S. A. and Alexander J. 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. *Journal of Sedimentary Research*, 73: 621-629.
 9. Ohey Ch. and Schleiss A. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 637-648.
 10. Prinos P. 1999. Two-dimensional density currents over obstacles. 18th IAHR Congress. Graz, Austria. 1004: 12-19.
 11. Varjavand P. Ghomeshi M. Dalir A. H. Farsadizadeh D. and Gorgij A. D. 2015. Experimental observation of saline underflows and turbidity currents flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(11): 834-844.