

## Experimental Study of the Effects of Hydraulic and Geometric Parameters of the Sediment Transport Tunnel on the Deviation Flow and Transmitted Sediment

PEJMAN AMINIYAN<sup>1\*</sup>, AHMAD AHMADI<sup>2</sup>, SAMAD EMAMGHOLIZADEH<sup>3</sup>

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
  2. Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
  3. Associated Professor, Department of Agricultural Engineering Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
- (Received: May. 15, 2018- Revised: Sep. 11, 2018- Accepted: Oct. 1, 2018)

### ABSTRACT

In recent decades, although dam construction has been increased, but most of them have experienced huge sedimentation problems during operation. To solve this problem scientifically and efficiently, Sediment Bypass Tunnels (SBTs) could be incorporated. SBTs are division channels that transfer the flow containing sediments from the upstream to the downstream of the dam reservoir. In this experimental study, the effect of division channel width on deviated flow rate and sediment rate into the secondary channels has been investigated. For this purpose, Froude number and flow depth as variables were studied in three different widths of the diversion channel. The results of this study reveals that increasing Froude number reduces the deviated flow rate and sediment rate to the lateral channel up to 20 and 44% respectively. On the other hand, 33% width reduction of the diversion channel could result a reduction of 8.5% in the deviated flow rate and 50% increase in the width could increase 13% the deviated sediment rate into the lateral channel. The performance index was greater than one and ranged from 1.6 to 3.77. Hence the 90-degree diversion channel has a good performance for sediment transportation. By decreasing Froude number and increasing flow depth in a diversion channel (with dimensionless width=0.41), it is possible to find the optimum choice for sediment transportation by which the highest sediments could be deviated by the lowest deviated flow rate.

Keywords: Sediment Bypass Tunnels (SBTs), sediment transfer, deviated flow

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عوامل هیدرولیکی و هندسی تونل انتقال رسوب بر جریان و رسوب انتقال یافته

پژمان امینیان<sup>۱\*</sup>، احمد احمدی<sup>۲</sup>، صمد امامقلی زاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۶/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۹)

### چکیده

در چند دهه اخیر، هرچند سدسازی روند افزایشی داشته است، ولی متأسفانه اکثر این سدها در دوره بهره‌برداری با مشکل رسوب‌گذاری مواجه می‌باشند. به‌عنوان یک راه علمی می‌توان جهت رفع این مسئله به ساخت تونل‌های انتقال رسوب اشاره کرد. تونل‌ها کانال‌های انحرافی هستند که جریان حاوی رسوبات را از بالادست مخزن سد به پایین‌دست آن منتقل می‌نمایند. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر عرض کانال انحرافی بر میزان دبی و رسوب انحرافی به کانال فرعی بررسی شده است. در این راستا در سه عرض مختلف کانال انحرافی، متغیرهای عدد فرود جریان و عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از این تحقیق بیانگر آن است که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی منحرف‌شده به کانال و کاهش ۴۴ درصدی رسوب منحرف‌شده به کانال فرعی می‌شود. از طرفی کاهش ۳۳ درصدی عرض کانال انحرافی می‌تواند کاهش ۸/۵ درصدی دبی انحرافی به کانال فرعی را به دنبال داشته باشد و افزایش ۵۰ درصدی عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش ۱۳ درصدی رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد. شاخص عملکرد بزرگ‌تر از ۱ بوده و از مقدار ۱/۶ الی ۳/۷۷ متغیر است و در نتیجه کانال انحرافی ۹۰ درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد. با کاهش عدد فرود و افزایش عمق جریان و با مقدار عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر ۰/۴۱ می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود، به‌گونه‌ای که با کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوب منحرف شود.

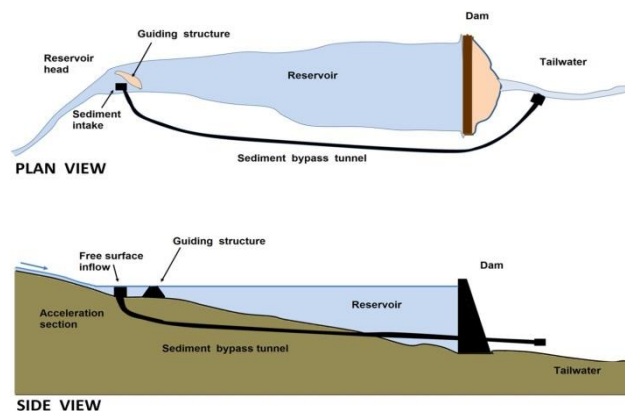
**واژه‌های کلیدی:** کانال انحرافی، انتقال رسوب، دبی انحرافی

### مقدمه

رسوبات به بدنه سد برسند، امکان تجمع رسوب در خروجی‌ها و بلوکه کردن دریچه‌های آبنگیر نیروگاه و خروجی‌های عمقی را سبب می‌شوند. به‌علاوه رسوباتی که به خروجی‌های مربوط به تأسیسات نیروگاه برق‌آبی می‌رسند می‌توانند توربین‌ها و حفاظ دریچه‌های تحتانی مخازن را دچار فرسایش و خوردگی نمایند. همچنین بار وارده به بدنه سد نیز افزایش خواهد یافت. به‌عنوان یک‌راه علمی می‌توان به ساخت تونل‌های انتقال رسوب اشاره کرد. آن‌ها کانال‌های انحرافی هستند که جریان حاوی رسوبات را از بالادست مخزن سد به پایین‌دست آن منتقل می‌نمایند. در این سیستم هم با حرکت رسوبات انباشته‌شده در مخزن و هم هدایت رسوبات آورده‌شده توسط رودخانه به سمت این تونل‌ها، رسوبات منحرف و به پایین‌دست مخزن منتقل می‌شوند (شکل ۱) (White, 2001).

یکی از اثرات مهم پس از ساخت سدها مسئله رسوب‌گذاری در آن‌ها است که بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره‌شده در دریاچه سد را با مشکل مواجه می‌سازد. از این رو شناخت مسئله رسوب‌گذاری در سدها و چگونگی مقابله با آن بسیار با اهمیت است. در چند دهه اخیر، هرچند سدسازی از نظر کمی و تعدد روند افزایشی داشته است، ولی متأسفانه اکثر این سدها در دوره بهره‌برداری با مشکل رسوب‌گذاری مواجه می‌باشند (Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam, 2014). به علت ورود رسوبات و تجمع آن در داخل مخزن سد، ظرفیت ذخیره مؤثر آب کاهش می‌یابد. این امر به‌نوبه خود باعث کاهش انرژی برق‌آبی، کاهش اراضی تحت پوشش آبیاری و از دست رفتن ظرفیت تعدیل طغیان خواهد شد. اگر

مقایسه توزیع رسوبات ته‌نشین شده در سدهای فوق با مدل‌های نظری توزیع رسوب نشان داد که هیچ‌کدام از چهار مدل دقت و کارایی لازم را نداشته و با خطای بسیار وضعیت مخزن را برآورد کرده‌اند. در این مطالعه در مجموع مدل کاهش سطح به روش برلندومیلر به مراتب بهتر از سایر مدل‌ها نتیجه داد. (Kolahdouzan et al., 2002) با بهره‌گیری از مدل‌های عددی یک‌بعدی و دوبعدی، رسوب‌گذاری در مخزن سد چم‌گردلان را شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب و تغییرات بستر در مخزن سد، توسط روش تفاضل‌های محدود در حجم کنترل حل شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد که فرضیات ساده‌کننده در مدل یک‌بعدی باعث ایجاد خطاهای قابل‌توجهی در شبیه‌سازی این مخزن (که شرایط دوبعدی دارد) شده است. همچنین مشخص شد که مدل‌سازی طولانی‌مدت ریخت‌شناسی (مورفولوژی) در مخازن را می‌توان با فرضیات مناسب عملی کرد و در این راستا می‌توان از نتایج مدل یک‌بعدی که اجرای آن نیاز به زمان زیادی ندارد برای انتخاب دوره‌های مؤثر رسوب‌گذاری در مخزن سد استفاده کرد. به‌طورکلی استفاده از مدل‌های یک‌بعدی در کنار مدل‌های دوبعدی در کاهش مدت اجرای شبیه‌سازی و سرعت بخشیدن به نتایج مناسب، مفید تشخیص داده شد. (Bakhtiyari and Nikoufar, 2005) با استفاده از تحلیل عددی دوبعدی، رسوب‌گذاری در مخزن سد بوکان (شهید کاظمی) را مورد مطالعه قرار دادند. رفتار هیدرودینامیک و رسوب مخزن در شرایط مختلف برای مدت ۵۰ روز شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی شد. در این مطالعه تأیید گردید که در محاسبه نیمرخ طولی بستر، نیاز به محاسبه کل سال نیست و فقط در نظر گرفتن فصل بارندگی کافی است. چراکه رسوب‌گذاری در مخزن عمدتاً زمانی رخ می‌دهد که جریان ورودی به مخزن سیلابی باشد و این عمل تنها در فصول بارندگی امکان‌پذیر است. مطابق با یافته‌های Auel and Boes (2011) تونل انتقال رسوب متشکل از یک ساختار هدایتی نصب‌شده در مخزن، یک مدخل آبرگیری با یک دریچه، یک مقطع شتاب‌دهنده‌ی شیب تند و کوتاه، بخش تونل عبوری با شیب ملایم و یک ساختار خروجی است. بسته به موقعیت مدخل آبرگیر، یعنی اینکه آیا در رأس و یا میانه مخزن باشد، عموماً دو نوع تونل انتقال رسوب مختلف وجود دارد. یکی، جریان ورودی با شرایط سطح آزاد در دلتا و دیگری که معمولاً در زیر رسوبات است، به‌صورت تحت‌فشار عمل می‌کند. این تونل‌های انحرافی بایستی به‌اندازه کافی شیب داشته باشند تا از رسوب‌گذاری در آن‌ها جلوگیری شود و درعین‌حال بایستی این



شکل ۱. سیستم تونل انتقال رسوب با یک مخزن طراحی‌شده ابتدای مخزن تحت شرایط سطح آزاد (Auel and Boes, 2011)

اولین تونل انتقال رسوب در اوایل قرن ۲۰ در ژاپن و سوئیس ساخته‌شده است و حدود یک دهه روی کاهش نرخ ساخت آن کار کردند (Vischer, 1997). تونل انتقال رسوب نوع یک از سد آشی در کشور ژاپن حجم زیادی از رسوبات شکل‌گرفته بعد از راه‌اندازی آن در سال ۱۹۹۸ را کاهش داده و حتی در یک سیل بزرگ رخ‌داده در اثر یک گردباد در سال ۲۰۱۱، به محدودسازی جریان داخلی رسوبات داخل مخزن کمک می‌کند (Boes et al., 2014). تحقیقات اخیر بیشتر بر مقاومت تونل‌ها در مقابل فرسایش هیدرولیکی و همچنین ترکیب تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌های عددی متمرکز است (Cajot et al., 2012; Boes et al., 2014). آن‌ها خصوصیات جریان و غلظت رسوبات معلق را در یک مدل با مقیاسی از نمونه واقعی آن مورد بررسی قرار داده‌اند که به‌عنوان ابزاری برای کالیبره کردن مطالعات مدل‌های عددی قبلی بدل شده است. (Emamgholizadeh and Samadi, 2008) تحقیقی بر روی امکان‌پذیری تخلیه رسوبات با استفاده از روش رسوب‌شویی و سیستم تونل انحراف در بالاست سد مخزنی دز انجام دادند و اظهار داشتند با ساخت سد مستغرق در ۹ کیلومتری سد دز و همچنین ساخت تونلی به قطر ۸/۲۸ متر و طول ۱۵ کیلومتر امکان تخلیه ۱۱/۳ میلیون مترمکعب رسوب وجود دارد. (Shabanlou, 2000) چگونگی توزیع رسوب در مخزن ۱۰ سد شامل دز، قشلاق، کرج، لتیان، اکباتان، درودزن، طرق، کارده، مغان و زاینده‌رود را مطالعه کردند. آنان با توجه به بهره‌برداری سال‌های متمادی از این سدها فرض کردند که فرآیند رسوب‌گذاری در این سدها روند نسبتاً ثابتی پیدا کرده است. آن‌ها با استفاده از منحنی‌های حجم - ارتفاع و ارتفاع - سطح اولیه و ثانویه سدهای مورد مطالعه، اقدام به انجام روش‌های کاهش و افزایش سطح به دو طریق برلندومیلر و مودی کردند تا میزان دقت هر یک در تخمین رسوب مخازن مشخص گردد.

درجه توسط Karami et al. (2010) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاهش عمق، کاهش قدرت جریان ثانویه و در نتیجه کاهش ورود رسوب به آبگیر را در پی دارد.

Salemnia and Shafaei-Bajestan (2011) اثر تغییر نسبت آبگیری بر میزان رسوب بستر ورودی به آبگیر در کانال ذوزنقه‌ای با زاویه آبگیری ۶۰ درجه نسبت به جهت جریان را با و بدون نصب صفحات مستغرق بررسی کردند. نتایج بررسی این محققان نشان داد که با افزایش نسبت آبگیری از ۷/۵ به ۱۶ درصد میزان رسوب ورودی به آبگیر در هر دو حالت با و بدون صفحات مستغرق به طور متوسط به میزان ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. (Jafari-Mianaei and Ayyoubzadeh (2014) با مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب دیواره کانال اصلی بر میزان رسوب ورودی به آبگیر جانبی با و بدون نصب صفحات مستغرق به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحات مستغرق در دو حالت دیواره قائم و دیواره شیب‌دار کانال اصلی میزان رسوب ورودی به آبگیر را کاهش می‌دهد اما این میزان کاهش در حالت دیواره شیب‌دار و به ویژه در نسبت‌های آبگیری کم در مقایسه با حالت دیواره قائم به مراتب بیشتر است به طوری که در حالت دیواره شیب‌دار با نصب صفحات مستغرق و در نسبت دبی انحرافی ۱۲ درصد میزان رسوب ورودی به کانال آبگیر تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. (Hashid et al. (2015) در مطالعه‌ای خصوصیات جریان عبوری از آبگیرهای جانبی دایره‌ای را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که ضریب شدت جریان این نوع آبگیرها به عدد فرود و نسبت عرض روزنه به عرض کانال اصلی بستگی دارد. با جمع‌بندی مطالعات گذشته می‌توان دریافت که اکثر مطالعات مربوط به تونل انتقال رسوب به صورت میدانی یا موردی بوده و در ارتباط با کانال‌های آبگیر نیز اکثر تحقیقات بر روی الگوی جریان در کانال‌های انحرافی و بهینه‌سازی زاویه کانال فرعی و استفاده از سازه‌های کنترل رسوب جهت کاهش نرخ رسوب ورودی به کانال فرعی متمرکز بوده است؛ بنابراین برای اینکه در جریان انحرافی کمتر، رسوب بیشتری منتقل شود نیاز به مطالعه آزمایشگاهی داشته تا تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن دیده شود. لذا در این تحقیق سعی بر آن شده است تا با تغییر عرض دهانه ورودی کانال فرعی ۹۰ درجه انتقال رسوب، اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر میزان انتقال رسوب بررسی گردد.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد

شیب تا حد ممکن ملایم باشد که با محدود کردن سرعت جریان از فرسایش در آن‌ها جلوگیری شود. تاکنون تحقیق و بررسی کاملی بر روی میزان افزایش رسوبات ورودی به تونل‌های انتقال رسوبات صورت نپذیرفته است اما تحقیقات متعددی برای تعیین و بررسی رسوب ورودی به کانال‌های آبگیر صورت گرفته که این تحقیقات و آزمایش‌ها در جهت کاهش رسوبات ورودی بوده است. نحوه تغییرات نسبت رسوب به نسبت جریان منحرف‌شده بر روی آبگیر در مسیر مستقیم در تحقیقات (Barkdoll (1997 دارای حداکثری در نسبت دبی انحرافی حدود ۳۸ درصد است. البته آزمایش‌های این محقق در شرایط بدون تزریق رسوب انجام شده است، بنابراین به مرور با حمل رسوبات بستر و افزایش عمق، قدرت حمل جریان کاهش یافته و با افزایش نسبت دبی انحرافی، نسبت رسوب ورودی به آبگیر به سمت صفر میل نموده است. (Barkdoll et al. (1999 در مطالعات خود روی آبگیر جانبی که در مسیر مستقیم و با زاویه آبگیری 90 درجه انجام گردید، نشان دادند که نسبت دبی انحرافی بیشترین تأثیر را روی نسبت رسوب انحرافی دارد. (Izadpanah and Salehi (2003) با انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی قوس ۹۰ درجه و با تغییر محل قرارگیری کانال آبگیر به این نتیجه رسیدند که موقعیت ۷۵ درجه در قوس نسبت به ۶۵ و ۷۰ درجه، رسوب کمتری را منحرف خواهد کرد. (Pirestani (2004) با انجام آزمایش‌هایی در زوایای مختلف کانال با موقعیت‌های مکانی و عددهای فرود، زاویه ۶۰ درجه را برای موقعیت ۱۱۵ درجه در خم ۱۸۰ درجه مناسب دانسته است. تحقیقات صورت گرفته توسط (Abbasi (2003 بر آبگیر در مسیر مستقیم رودخانه نشان داد که حضور آستانه، باعث کاهش عرض گردابه در ابتدای آبگیر شده و در نتیجه باعث کاهش ورود رسوبات و عرض رسوب‌گذاری در دهانه آبگیر خواهد شد. همچنین میزان تأثیر آستانه در نسبت انحراف‌های بالا نسبت به نسبت‌های پائین انحراف مؤثرتر است. (Behbahani and Shafaei Bajestan (2004) با انجام آزمایش‌هایی بر روی آبگیر ۷۵ و ۹۰ درجه به این نتیجه دست یافتند که دبی انحرافی بیشترین وابستگی را به عدد فرود بالادست آبگیر دارد و نسبت دبی انحرافی در زاویه ۷۵ درجه با شرایط مشابه، کمتر از نسبت دبی انحرافی شاخه فرعی با زاویه ۹۰ درجه است. همچنین بعد طولی سطح جداشدگی در انحراف ۹۰ درجه با نسبت متغیر دبی انحرافی، تغییرات زیادی از خود نشان نداده و در بعد عرض، سطح جداشدگی در زاویه انحراف ۷۵ درجه، عرض بیشتری را به خود اختصاص داد که با افزایش نسبت دبی انحرافی، سطح جداشدگی مذکور کاهش یافت. ورود رسوب از کانال اصلی با مقطع ذوزنقه به آبگیر 30

شاهرود، بر روی یک فلوم تحقیقاتی شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر انجام شده است. جنس کف از ورق فلزی رنگ‌آمیزی شده و دیوارها شیشه به ضخامت ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. محل قرارگیری کانال فرعی که کانالی مستطیلی و به طول ۲/۲ متر است به فاصله ۴ متری از ابتدای کانال اصلی تعبیه گردید. با بکارگیری متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر رفتار جریان ورودی به تونل‌های انتقال رسوب می‌توان رابطه‌ای را جهت تعیین نسبت رسوب انحرافی به دست آورد. بدین منظور ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، متغیرهای بدون بعد مؤثر بر این ناحیه، مشخص و سپس به بررسی چگونگی تأثیر آن‌ها پرداخته شد. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارت‌اند از: عرض کانال اصلی (B)، عرض کانال انحرافی (b)، شیب طولی کانال اصلی ( $S_0$ )، سرعت متوسط جریان در کانال اصلی (U)، عمق جریان در کانال اصلی ( $Q_m$ )، دبی جریان در کانال اصلی، دبی رسوب در کانال انحرافی ( $Q_l$ )، دبی رسوب در کانال اصلی  $Q_{sm}$  و دبی رسوب در کانال انحرافی  $Q_{sl}$ ، قطر متوسط مصالح ( $d_{50}$ )، جرم مخصوص رسوبات ( $\rho_s$ ) و انحراف استاندارد توزیع اندازه مصالح ( $\sigma_g$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و لزجت سینماتیکی سیال (۷).

شده شدن کامل رسوبات آزمایش ادامه می‌یافت. (شکل ۲)

سپس رسوبات در انتهای کانال اصلی و کانال فرعی جمع‌آوری می‌شد و سپس رسوبات در الک‌های مخصوص زهکشی شده و پس از قرار دادن آن‌ها در گرمخانه، وزن رسوبات اندازه‌گیری شد (شکل ۲). آزمایش‌ها در سه عرض مختلف کانال فرعی و با ثابت نگه‌داشتن عمق‌های ۵۰، ۷۰ و ۹۸ میلی‌متر برای هر کدام در ۵ دبی متفاوت که منجر به ۵ عدد فرود مختلف شده است به شرح جدول (۱) به صورت ۴۵ آزمایش مجزا صورت پذیرفت.

شاهرود، بر روی یک فلوم تحقیقاتی شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر انجام شده است. جنس کف از ورق فلزی رنگ‌آمیزی شده و دیوارها شیشه به ضخامت ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. محل قرارگیری کانال فرعی که کانالی مستطیلی و به طول ۲/۲ متر است به فاصله ۴ متری از ابتدای کانال اصلی تعبیه گردید. با بکارگیری متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر رفتار جریان ورودی به تونل‌های انتقال رسوب می‌توان رابطه‌ای را جهت تعیین نسبت رسوب انحرافی به دست آورد. بدین منظور ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، متغیرهای بدون بعد مؤثر بر این ناحیه، مشخص و سپس به بررسی چگونگی تأثیر آن‌ها پرداخته شد. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارت‌اند از: عرض کانال اصلی (B)، عرض کانال انحرافی (b)، شیب طولی کانال اصلی ( $S_0$ )، سرعت متوسط جریان در کانال اصلی (U)، عمق جریان در کانال اصلی ( $Q_m$ )، دبی جریان در کانال اصلی، دبی رسوب در کانال انحرافی ( $Q_l$ )، دبی رسوب در کانال اصلی  $Q_{sm}$  و دبی رسوب در کانال انحرافی  $Q_{sl}$ ، قطر متوسط مصالح ( $d_{50}$ )، جرم مخصوص رسوبات ( $\rho_s$ ) و انحراف استاندارد توزیع اندازه مصالح ( $\sigma_g$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و لزجت سینماتیکی سیال (۷).

حال با تعریف پارامترهای  $Q_r = Q_l/Q_m$  و  $Q_s = Q_{sl}/Q_{sm}$  رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید:

$$f(Q_r, Q_s, U, S_0, b, y, B, \theta, d_{50}, \sigma_g, \nu, \rho, \rho_s, g) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

با استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام و حذف عامل‌های ثابت رابطه بدون بعد ذیل ارائه می‌گردد.

رابطه (۲)

$$Q_s = f\left(Q_r, Fr, \frac{b}{B}\right)$$

قبل از هر آزمایش ابتدا مصالح بستر که ماسه یکنواخت با قطر متوسط حدود ۱/۱ میلی‌متر بود در کف کانال و در



شکل ۲- شسته شدن رسوبات در کانال اصلی

جدول ۱- مقادیر متغیرها در آزمایش‌ها در عرض کانال انحرافی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر

شماره آزمایش	عمق جریان (سانتیمتر)	دبی کانال اصلی (لیتر بر ثانیه)	دبی کانال فرعی (لیتر بر ثانیه)	نسبت دبی انحرافی به دبی کل	نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل	عدد فرود
۱	۵۰	۱۳/۵	۳/۵	٪۲۶/۲	٪۵۴/۳	۰/۶۴
۲	۵۰	۱۵/۲۵	۳/۲	٪۲۱	٪۴۷	۰/۷۳
۳	۵۰	۱۷	۲/۹	٪۱۷	٪۴۰	۰/۸۱
۴	۵۰	۱۸/۵	۲/۶	٪۱۳/۸	٪۳۳/۳	۰/۸۸
۵	۵۰	۲۰	۲/۲	٪۱۱/۲	٪۲۶/۳	۰/۹۵
۶	۷۰	۲۳	۶/۸	٪۲۹/۷	٪۶۸/۶	۰/۶۶
۷	۷۰	۲۵/۵	۶/۷	٪۲۶/۲	٪۵۹/۳	۰/۷۳
۸	۷۰	۲۸	۶/۵	٪۲۳/۴	٪۵۰	۰/۸
۹	۷۰	۳۱	۴/۷	٪۱۵/۱	٪۳۶/۹	۰/۸۹
۱۰	۷۰	۳۴	۳/۲	٪۹/۳	٪۲۳/۸	۰/۹۸
۱۱	۹۸	۳۸	۱۱/۹	٪۳۱/۳	٪۷۷/۸	۰/۶۶
۱۲	۹۸	۴۲	۱۱/۷	٪۲۷/۸	٪۷۰/۱	۰/۷۳
۱۳	۹۸	۴۶	۱۱/۵	٪۲۵	٪۶۱/۹	۰/۸
۱۴	۹۸	۵۱	۸	٪۱۵/۶	٪۴۱/۱	۰/۸۸
۱۵	۹۸	۵۶	۵/۲	٪۹/۳	٪۲۱/۲	۰/۹۷

### نتایج و بحث

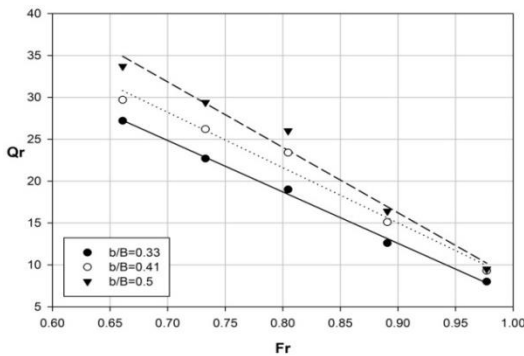
شکل (۳) تأثیر تغییر عرض کانال انحرافی را بر میزان دبی منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض کانال انحرافی میزان انحراف آب به کانال فرعی بیشتر می‌شود و این امر مستقل از عمق جریان بوده و برای تمام اعماق صادق است. علت این امر آن است که با افزایش عرض کانال انحرافی، قدرت چرخش جریان و نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد و سبب می‌شود مقادیر بیشتری از دبی به کانال فرعی وارد شود. عدد فرود عاملی تأثیرگذار بر میزان دبی انحرافی جریان به کانال انتقال رسوب است و با افزایش عدد فرود، نسبت دبی انحرافی برای هر سه عرض کانال انحرافی و سه عمق آزمایش کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان اصلی در بالادست، سرعت جریان در کانال اصلی افزایش می‌یابد (در عمق ثابت) و افزایش سرعت سبب کاهش نیروی گریز از مرکز و قدرت چرخش جریان به سمت کانال انحرافی خواهد شد. با بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی انحرافی به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها، مقادیر دبی انحرافی

تقریباً ثابت هستند در صورتی‌که در پایین‌ترین عدد فرود، اختلاف در درصد دبی انحرافی مشهود است و با ۱/۵ برابر کردن عرض کانال انحرافی میزان دبی منحرف شده برای  $\frac{y}{B} = 0.83$  به میزان  $\frac{y}{B} = 1.17$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 1.63$  به میزان  $\frac{y}{B} = 1.63$  درصد افزایش می‌یابد. کاهش ۳۳ درصدی عرض کانال انحرافی می‌تواند کاهش ۸/۵ درصدی دبی انحرافی به کانال فرعی را به دنبال داشته باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که افزایش عدد فرود به همراه کاهش عرض کانال انحرافی می‌تواند در کاهش دبی انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد.

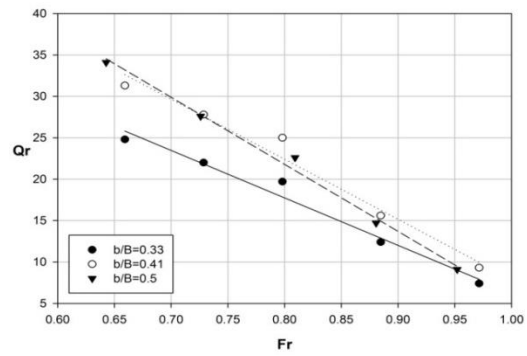
شکل (۴) تأثیر تغییر عرض کانال انحرافی را بر میزان رسوب منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود جریان و کاهش عرض کانال انحرافی میزان رسوب منحرف شده کاهش می‌یابد و این امر مستقل از عمق جریان است. جریان پرسرعت در سطح آب نسبت به جریان کم‌سرعت کف کانال احتیاج به نیروی بیشتری برای تغییر مسیر دارد. هر چه نسبت سرعت جریان ورودی به کانال فرعی به سرعت جریان در کانال اصلی افزایش پیدا کند بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی که عامل مؤثر در

با توجه به نتایج کمی می‌توان گفت که هرچه میزان رسوب انحرافی بیشتر و دبی منحرف‌شده کمتر باشد نتایج بهتر بوده و عملکرد مناسب‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر اگر شرایط هیدرولیکی و هندسی به‌گونه‌ای باشد که با دبی انحرافی کمتر، رسوب بیشتری منحرف شود کارآیی بهتری حاصل می‌شود. بنابراین با تعریف پارامتر  $\eta$  (نسبت رسوب منحرف‌شده به دبی انحرافی) به‌عنوان شاخص عملکرد، به بررسی شرایط آزمایش‌ها پرداخته شد. شکل (۵) نشان‌دهنده مقایسه میزان عملکرد کانال انحرافی در حالت‌های ذکر شده است. با توجه به شکل، شیب هر نمودار بیانگر مقدار شاخص عملکرد خواهد بود و هر چه این شاخص بیشتر باشد کانال فرعی رسوب بیشتر و دبی کمتری را منحرف می‌کند. شرایطی مطلوب است که مقدار شاخص عملکرد بزرگتر از ۱ باشد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که در همه حالات مقادیر شاخص عملکرد بزرگتر از ۱ بوده و از مقدار  $1/6$  الی  $3/77$  متغیر است و در نتیجه کانال انحرافی (۴) درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد. نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که مقدار رسوب منحرف‌شده بیشتر از مقدار دبی انحرافی بوده و هرچه قدر عدد فرود کاهش یابد شرایط مطلوب‌تر و مقدار شاخص عملکرد بیشتر می‌شود.

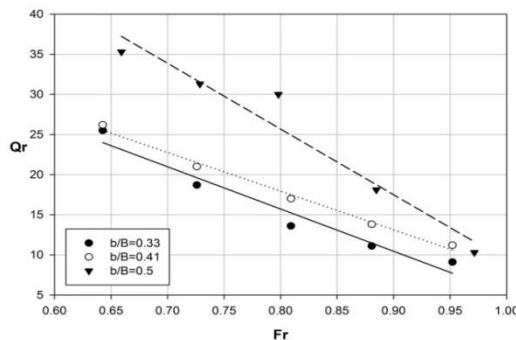
انتقال رسوبات است، افزوده می‌گردد. افزایش عدد فرود جریان به دلیل کاهش نیروی گریز از مرکز سبب کاهش سرعت ورودی به کانال انحرافی می‌گردد و این امر از قدرت جریان ثانویه ایجادشده در کانال فرعی و همچنین انتقال رسوب در آن می‌کاهد. از طرفی افزایش عرض کانال سبب چرخش بهتر آب به کانال فرعی شده و سبب انتقال بهتر رسوبات می‌شود. با بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۴ درصدی رسوب منحرف‌شده به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها، مقادیر رسوب منحرف‌شده تقریباً ثابت هستند در صورتی که در پایین‌ترین عدد فرود، اختلاف در درصد رسوب انحرافی مشهود است و با  $1/5$  برابر کردن عرض کانال انحرافی میزان رسوب منحرف‌شده برای  $\frac{y}{B} = 0/83$  به میزان  $20/3$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 1/17$  به میزان  $9/37$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 1/63$  به میزان  $9/68$  درصد افزایش می‌یابد. افزایش  $1/5$  برابر عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش ۱۳ درصدی رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که کاهش عدد فرود به همراه افزایش عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد.



(ب)

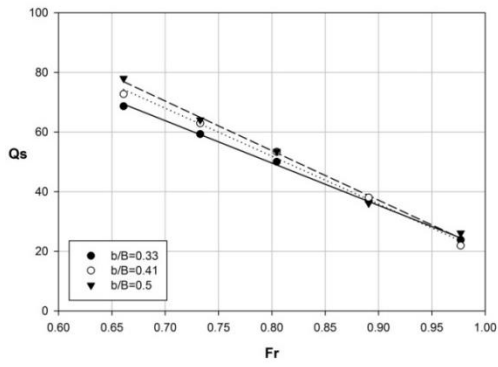


(الف)

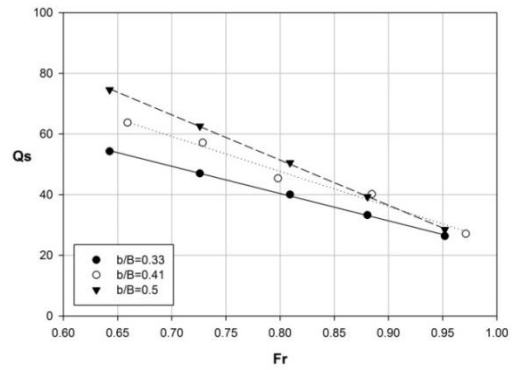


(ج)

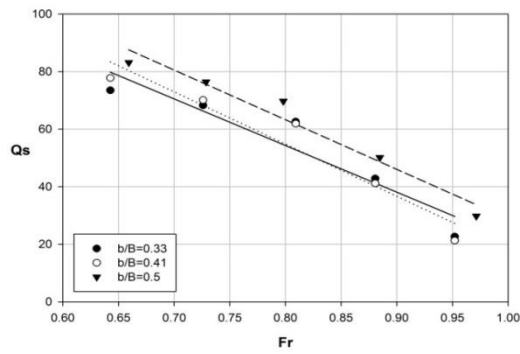
شکل ۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی با عدد فرود (الف)  $\frac{y}{B} = 0/83$ ، (ب)  $\frac{y}{B} = 1/17$ ، (ج)  $\frac{y}{B} = 1/63$



(ب)

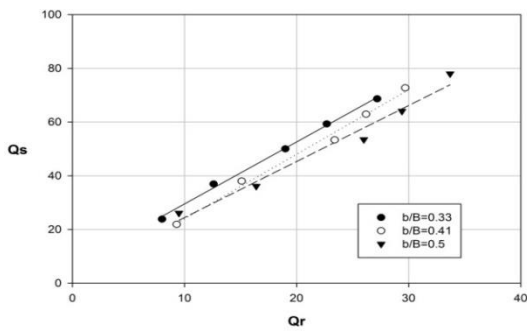


(الف)

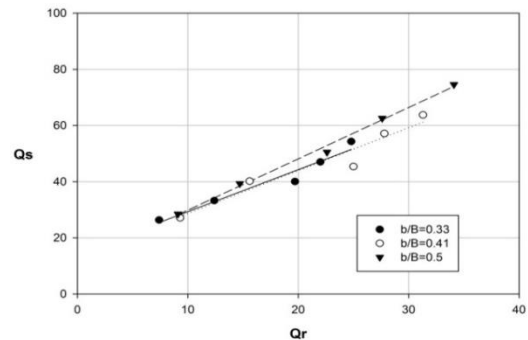


(ج)

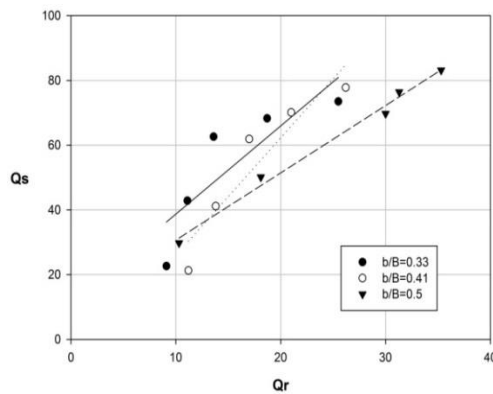
شکل ۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی با عدد فرود الف)  $\frac{y}{B} = 0.83$ ، ب)  $\frac{y}{B} = 1/17$ ، ج)  $\frac{y}{B} = 1/63$



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی با عدد فرود الف)  $\frac{y}{B} = 0.83$ ، ب)  $\frac{y}{B} = 1/17$ ، ج)  $\frac{y}{B} = 1/63$



افزایش عمق و با مقدار عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر  $0/41$  می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به‌گونه‌ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند.

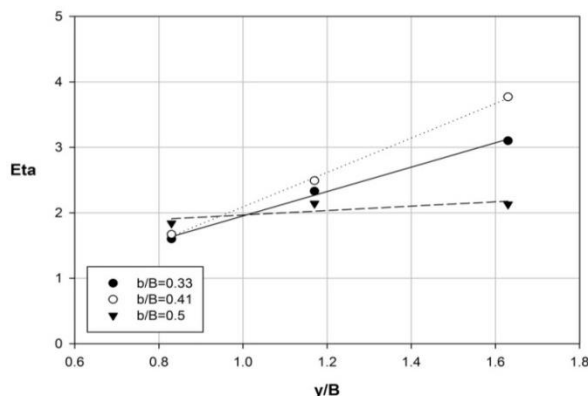
### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر (مطالعه آزمایشگاهی) به بررسی تأثیر عرض کانال انحرافی بر میزان دبی منحرف‌شده و رسوب انحرافی به کانال فرعی پرداخته شد. در این راستا سه عرض مختلف کانال انحرافی، اعداد فرود و اعماق مختلف جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش  $20$  درصدی دبی و کاهش  $44$  درصدی رسوب انحرافی به کانال فرعی می‌شود. کاهش  $33$  درصدی عرض کانال انحرافی می‌تواند کاهش  $8/5$  درصدی دبی انحرافی به کانال فرعی را به دنبال داشته باشد. از طرفی افزایش  $1/5$  برابری عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش  $13$  درصدی رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد. کانال انحرافی  $90$  درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد و با کاهش عدد فرود و افزایش عمق با مقدار عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر  $0/41$  می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود، به‌گونه‌ای که با کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند.

### REFERENCES

- Abbasi, A. (2003). *Experimental investigation on sediment control at lateral intakes in straight channels*. PhD Thesis on civil engineering, Tarbiat Modares University.
- Auel, C., Boes, R. M. (2011). Sediment bypass tunnel design—review and outlook. *Taylor & Francis Group*, London. pp. 403-412
- Barkdoll, B.D., R. Ettema and A.J. Odgaard. (1999). Sediment control at lateral diversion: limits and enhancements to vane use. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 125(8): 862-870.
- Barkdoll, B. D.(1977). *Sediment control at lateral diversion*, Ph.D. dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa
- Bakhtiyari, N., Nikoufar, B.(2005). Investigation of sedimentation in dams reservoir using two dimensional numerical analysis. *Structural analysis - earthquake*. 8-14, 2 (2). (in Farsi)
- Behbahani, H & Shafaei Bajestan, M. (2004). Investigation on hydraulic conditions at intakes with diversion angles  $90^\circ$  and  $75^\circ$  by using physical model. *Master thesis, water structures engineering*, Shahid Chamran University.
- Boes, R. M., Auel, C., Haggmann, M., Albayrak, I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Reservoir sedimentation*, 221-228.
- Cajot, S., Schleiss, A., Sumi, T., Kantoush, S. (2012). Reservoir sediment management using replenishment: a numerical study of Nunome Dam. *In Proceedings (on CD) of the International Symposium on Dams for a changing world-80th Annual Meeting and 24th Congress of CIGB-ICOLD* (No. EPFL-CONF-178312, pp. 2-131).
- Emamgholizadeh, S., Fathi Moghadam, M. (2014). Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Dam Reservoir. *Journal of Hydrology, ASCE*, 2014.19:674-681.
- Emamgholizadeh, S., Samadi, H. (2008). Desalting of deposited sediment at the upstream of the Dez reservoir in Iran. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 3(1), 25-35.
- Hashid, M., A. Hussain and Z. Ahmad. (2015). Discharge characteristics of lateral circular intakes in open channel flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 46: 87-92

شیب خط نشان داده در شکل (۵) بیانگر متوسط مقدار عملکرد در بازه عدد فرود آزمایش‌ها است. بنابراین جهت تعیین حالت بهینه، مقدار عملکرد برای هر حالت (شیب هرکدام از نمودارهای شکل (۵) محاسبه‌شده و تغییرات آن برحسب پارامتر بدون بعد عمق در شکل (۶) ترسیم شده است.



شکل ۶- تغییرات پارامتر عملکرد برحسب عمق جریان برای عرض‌های مختلف کانال انحرافی

با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت در صورتی که عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر  $0/5$  باشد مقدار عملکرد با افزایش عمق جریان تغییری نمی‌کند اما برای دو مقدار  $0/41$  و  $0/33$  تأثیرگذار بوده و با افزایش عمق جریان، افزایش شاخص عملکرد مشاهده می‌شود. بنابراین با کاهش عدد فرود جریان و از طرفی

- Izadpanah, Z., Salehi Neishabouri, A. (2003). Investigation of sediment transport in lateral intakes. *Journal of Agriculture*, 26:15-24.
- Jafari-Mianaei, S. and Ayyoubzadeh, S. A. 2014. Experimental investigation of the effect of inclined mainchannel wall on the amount of delivered sediment into the lateral intake with/without submerged vanes. *Iranian J. Irrig. Drain.* 4(7): 521-534.
- Karami Moghadam, M., Shafai Bajestan, M., Sedghi, H. (2010). Sediment entry investigation at the 30 degree water intake installed at a trapezoidal channel, *World Applied Sciences Journal* 11 (1):82-88
- Kolahdouzan, M., Behlouli, A., Mohamadian, A. (2002). One-dimensional and two-dimensional simulation of sedimentation of Shahid Cham Gardolan dam (Ilam). *The 6<sup>th</sup> International Symposium on River Engineering*, Shahid Chamran University of Ahvaz. (in Farsi).
- Pirestani, M. (2004). *Investigation on flow pattern and scouring at intakes incurved channels*. PhD Thesis on irrigation engineering, Islamic Azad University, Science and Research center, Tehran Branch. p17.
- Salemnia, A. and Shafaei-Bajestan, M. (2011). Investigation on the effect of submerged vanes on the amount of sediment entrance of trapezoidal channel into the lateral intake by changing the discharge diversion ratio. *Proceeding of the 10th Iranian Hydraulic Conference*. University of Guilan. Rasht. Iran. (in Farsi)
- Shabanlou, S. (2000). *Investigation of sedimentation in some reservoir dams of Iran*, Master thesis for irrigation and drainage, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. ( in Farsi)
- Vischer, D. (1997). Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. *In Proc. 19<sup>th</sup> ICOLD Congress*, Florence, Italy, 1997.
- White, R. (2001). Evacuation of sediments from reservoirs. Thomas Telford.