

## بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل تحت تأثیر آبشکن‌های بالادست و پایین‌دست

شهاب نیر<sup>۱</sup>، سعید فرزین\*<sup>۲</sup>، حجت کرمی<sup>۲</sup> و محمد رستمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، آستادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان و <sup>۲</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

### چکیده

فرسایش و آبشستگی از مهمترین مسائل نگران کننده در ارتباط با کناره‌های رودخانه و سواحل می‌باشد. استفاده از آبشکن‌ها، از جمله روش‌های نوین کنترل و کاهش فرسایش می‌باشد. آبشکن‌ها به اشکال مختلفی نظیر آبشکن ساده، L شکل و T شکل هستند. در این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر هندسه مختلف آبشکن‌های بالادست و پایین‌دست بر آبشستگی آبشکن T شکل میانی برای سری آبشکن‌های ترکیبی مطالعه شده است و بهترین ترکیب جهت افزایش کارایی آبشکن‌ها مشخص شده است. آزمایش‌ها در شرایط آستانه حرکت بستر متحرک، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که متوسط عمق آبشستگی اطراف آبشکن T شکل میانی، حدود ۰/۸ برابر عمق جریان است. بهترین عملکرد آبشکن T شکل میانی زمان رخ می‌دهد که آبشکن بالادست L شکل و آبشکن پایین‌دست T شکل باشد (L T T). در واقع کمترین حجم و متوسط عمق آبشستگی با توجه به همه موقعیت‌ها نیز مربوط به همین ترکیب است. حجم فرسایش با استفاده از نرم‌افزار Surfer محاسبه شده است. متوسط حجم آبشستگی این ترکیب، ۰/۰۶۳ مترمکعب و متوسط عمق آبشستگی در حدود ۱/۲۱ برابر عمق جریان می‌باشد. در محل آبشکن اول تمام حجم فرسایش یافته در سمت موافق آبشکن‌ها است که با عبور از محدوده آبشکن‌ها، فرسایش به سمت مخالف هدایت می‌شود. آبشکن‌های ترکیبی پیشنهادی (L T T) پتانسیل بالایی جهت استفاده در رودخانه‌ها به منظور کاهش فرسایش بستر و دیواره‌ها را دارا می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آبشکن‌های سری، آبشکن T شکل میانی، ترکیب بهینه، عمق آبشستگی، مطالعه آزمایشگاهی

### مقدمه

می‌باشد. از دیدگاه کلی آبشکن‌ها در دو گروه عمده شامل آبشکن باز و بسته طبقه‌بندی می‌شوند. آبشکن‌های بسته یا نفوذناپذیر از جمله سازه‌های حفاظتی می‌باشند که برای دور ساختن جریان از ساحل و حواشی آسیب‌پذیر رودخانه می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. در این نوع سازه‌ها، سرعت جریان آب در میدان آبشکن تقلیل یافته و با ترسیب مواد رسوبی

بهربرداری انسان از رودخانه‌های طبیعی و ضرورت حفاظت پایدار از این سامانه‌های حیاتی برای استفاده نسل‌های آینده، باعث شده تا مسأله جلوگیری از فرسایش بستر و دیواره رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن، همواره مورد توجه باشد. یکی از این روش‌های ساماندهی، احداث آبشکن‌های رودخانه‌ای

در نهایت از بین می‌روند. Dehghani و همکاران (۲۰۰۹) آبستگي موضعی اطراف آبشکن سری L شکل را مطالعه کردند و مشخص شد که حداکثر عمق آبستگي اطراف آبشکن اول اتفاق می‌افتد. توسعه آبستگي اطراف آبشکن نفوذناپذیر به‌وسیله Ardeshir و همکاران (۲۰۱۰) بررسی شد. نتایج نشان داد، قسمت اعظم آبستگي در بستر ماسه‌ای و بستر شنی در زمان‌های اولیه اتفاق می‌افتد. Saneie (۲۰۱۰) اثر آبشکن محافظ قائم بر آبستگي دماغه اولین آبشکن را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. ایشان بیان داشتند که میزان آبستگي در دماغه اولین آبشکن، با عمق آب بالادست و فاصله آن از اولین آبشکن ارتباط مستقیم دارد. این میزان آبستگي، با افزایش نسبی طول آبشکن محافظ به طول اولین آبشکن، ارتباط معکوس دارد. Mousavi و Naeini (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف آبشکن T شکل را در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که الگوی جریان شکل گرفته پیرامون آبشکن T شکل، تشکیل دو گردابه پاد ساعت‌گرد در بالادست و پایین‌دست آبشکن را به همراه خواهد داشت.

در پژوهشی دیگر، Saneie (۲۰۱۱) اثر تنگ‌شدگی و زاویه در کاهش آبستگي را تحلیل کرد. ایشان همچنین راه‌های کاهش فرسایش در دماغه اولین آبشکن را آزمایش نمودند. برای این منظور از یک آبشکن کوتاه‌تر (فرعی) در بالادست اولین آبشکن استفاده شد. نهایتاً نتایج را بر اساس برآزش رگرسیونی بر داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت رابطه‌ای جهت تخمین میزان کاهش آبستگي دماغه اولین آبشکن نسبت به دو حالت بدون آبشکن فرعی و با آن ارائه دادند. Karami و همکاران (۲۰۱۱) جهت کاهش عمق آبستگي آبشکن‌های سری، از یک آبشکن محافظ در بالادست استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که در شرایطی که آبشکن محافظ به درستی طراحی شود، قادر خواهد بود تا متوسط حداکثر عمق آبستگي را در آبشکن‌های سری کاهش دهد. Hoseini و همکاران (۲۰۱۲) آبشکن‌های احداث شده بر روی زنجان‌رود را مورد ارزیابی اقتصادی قرار دادند و ادعان نمودند که علی‌رغم عدم هم‌خوانی برخی از مشخصات هندسی

شرایط لازم پایداری در امتداد کناره‌ها فراهم می‌شود. آبشکن‌های نفوذناپذیر دارای اشکال مختلفی نظیر آبشکن ساده، L شکل و T شکل می‌باشند. هر یک از این آبشکن‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود هستند که نسبت به سایر شکل‌ها آن‌ها را متمایز می‌کند.

آبشکن‌ها می‌توانند به‌صورت تک و یا سری در مسیرهای مستقیم و یا قوسی استفاده شوند. مهمترین مسأله در استفاده از آبشکن‌ها، آبستگي اطراف آن‌ها است. در واقع با احداث این سازه‌ها در بستر رودخانه و یا کناره‌های سواحل و خلیج‌ها بیشترین عاملی که کارایی یک آبشکن را تهدید می‌کند، آبستگي است. جهت کاهش آبستگي، همواره مدل‌های مختلفی از آبشکن‌ها استفاده شده است. یکی از این نوع آبشکن‌ها که به آن اشاره شد، آبشکن T شکل می‌باشد. این آبشکن دارای یک باله است که این باله باعث می‌شود، شرایط هیدرولیک جریان اطراف آن پیچیدگی خاص خود را داشته باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، تا کنون مطالعات چندی به‌وسیله محققین انجام شده است که در ادامه به اهم آن‌ها در دو دهه اخیر اشاره می‌شود. Saneie (۲۰۰۶) به انجام مطالعاتی به‌منظور بررسی تأثیر درصد انسداد در آبستگي اطراف آبشکن‌ها پرداخت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، هر قدر طول آبشکن بلندتر و درصد انسداد بیشتر باشد، میزان آبستگي نیز افزایش می‌یابد و با افزایش عمق جریان نیز در دبی ثابت میزان آبستگي کاهش می‌یابد. Hashemi Najafi (۲۰۰۸) آزمایش‌هایی را بر روی آبستگي آبشکن L شکل انجام داد. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبستگي در آبشکن L شکل با زبانه به سمت بالادست، از آبشکن ساده بیشتر است. در آزمایش‌هایی که به‌وسیله Vaghefi و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد، الگوی آبستگي در اطراف آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه تعیین شد. نتایج نشان داد که با افزایش طول آبشکن، آبستگي بیشینه و ابعاد چاله آبستگي بیشتر می‌شود. در حالی که میزان آبستگي در پایین‌دست آبشکن و سواحل خارجی کاهش می‌یابد. همچنین، بیان داشتند که گردابه‌های عمقی بالادست، از گردابه‌های پایین‌دست بزرگ‌تر هستند و با حرکت به سمت پایین‌دست، کوچک‌تر می‌شوند و

با استفاده از روش‌های حفاظتی، در برابر آبشستگی محافظت شود. در تحقیقات Mehraein و همکاران (۲۰۱۷) آبشستگی اطراف آبشکن T شکل را در شرایط مستغرق و غیر مستغرق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت طول آبشکن به متوسط اندازه رسوبات، بر ابعاد حفره آبشستگی اثر ثانویه دارد. همچنین، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی با توجه به نسبت استغراق و سایر عوامل مؤثر ارائه کردند. Jarrahzade و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر زاویه فرارگیری آبشکن‌ها در شرایط مستغرق، بر ابعاد هندسی آبشستگی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی و کمترین عرض حفره آبشستگی برای آبشکن نفوذناپذیر در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. همچنین، بیان داشتند که بیشترین کشیدگی چاله آبشستگی در زاویه ۹۰ درجه شکل می‌گیرد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تا کنون موضوع آبشستگی پیرامون آبشکن‌های سری سه‌تایی با ترکیب‌های مختلف و لحاظ تأثیر آبشکن بالادست و پایین‌دست بر مقدار آبشستگی آبشکن میانی، مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش آزمایشگاهی با در نظر گرفتن آبشکن T شکل در وسط سری سه‌تایی آبشکن‌ها، اثر حضور آبشکن‌های ساده، L و T شکل در ترکیب‌های مختلف در بالادست و پایین‌دست آبشکن میانی بررسی می‌شود. در این راستا، با انجام آزمایش‌های متفاوت، حجم و عمق آبشستگی در اطراف آبشکن T میانی و بستر فرسایش‌پذیر اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه، نتایج جهت یافتن ترکیب بهینه با توجه به آبشکن میانی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

### مواد و روش‌ها

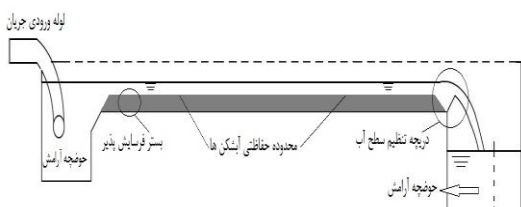
پارامترهای متعددی در عملکرد آبشکن‌ها برای حفاظت سواحل مؤثر می‌باشند. به‌منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر آبشستگی در دماغه سری آبشکن‌ها، تحلیل ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شده است. از جمله عوامل مؤثر در این زمینه طبق رابطه (۱) عبارت‌اند از:

آبشکن‌های اجرا شده با اصول فنی و معیارهای طراحی، پروژه یاد شده به اهداف اصلی اقتصادی خود دست یافته است. تحقیقات Abbasi و همکاران (۲۰۱۲) حاکی از آن است که با توجه به پارامترهای سرعت جریان و حداکثر عمق آبشستگی، نسبت فاصله به طول آبشکن در مسیر مستقیم برای آبشکن‌های مستقیم برابر سه و برای آبشکن‌های T شکل، برابر چهار پیشنهاد می‌شود. همچنین، انتخاب نسبت فاصله به طول بزرگ‌تر از چهار در هیچ‌یک از آبشکن‌های مستقیم و T شکل توصیه نمی‌شود. استفاده از آبشکن T شکل، به لحاظ داشتن عمق آبشستگی کمتر دماغه و پایداری سازه بر آبشکن مستقیم ارجحیت دارد.

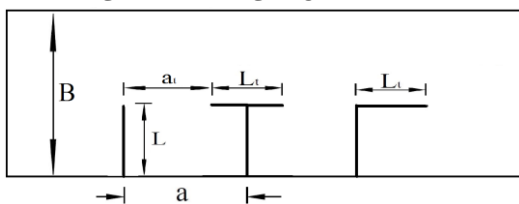
Karami و همکاران (۲۰۱۴) آبشستگی اطراف آبشکن‌های سری ساده را بررسی کردند و بیان داشتند که ۸۰ درصد آبشستگی در ۲۰ درصد اول زمان آزمایش رخ می‌دهد. Pandey و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی و محاسبه حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن پرداختند و سه رابطه جدید جهت محاسبه حداکثر عمق و طول آبشستگی در بالادست و پایین‌دست ارائه دادند. Amirbahadori (۲۰۱۵) در تحقیقات آزمایشگاهی خود بر روی تأثیر طول بر عمق آبشستگی در دو آبشکن متوالی نشان داد که با افزایش طول آبشکن عمق آبشستگی به میزان ۶۲/۵ درصد در آبشکن اول و ۱۷/۹ درصد در آبشکن دوم افزایش می‌یابد. در تمامی آزمایش‌ها آبشکن اول سبب کاهش آبشستگی در آبشکن دوم شده است و به‌عنوان یک محافظ برای آبشکن دوم عمل می‌کند. اثر آبشکن ساده بر کاهش فرسایش کناره در قوس رودخانه به‌وسیله Zare و Honar (۲۰۱۶) در شرایط آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی در پای آبشکن‌ها مربوط به آبشکن عمودی است و در هر سه نوع آرایش عمودی، دافع و جاذب، آبشکن اول بیشترین عمق آبشستگی و آبشکن آخر از کمترین عمق برخوردار است. Iranshahi و همکاران (۲۰۱۶) آبشکن سر سپری را به‌صورت سری در قوس تند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، میزان آبشستگی برای آبشکن اول بیش از آبشکن دوم و سوم می‌باشد. این مسأله نشان‌دهنده آن است که بستر پیرامون آبشکن اول باید

حرکت ( $\frac{U}{U_{cr}} = 0.95$ ) در نظر گرفته شده است. دبی

به کار برده شده در پژوهش حاضر با توجه به شرایط آستانه حرکت ذرات بستر، ابعاد کانال و عمق مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها، با استفاده از راهنمای نشریه ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور تعیین شد. همچنین، آبشکن‌ها در طولی قرار داده شده‌اند که جریان توسعه یافته باشد. پارامترهای هندسی آبشکن‌ها در شکل ۲ آمده است که در آن  $L/B = 23\%$  و  $a=3L$ ،  $L_t/L = 1$  با توجه به مطالعات محققین پیشین و ارائه مقادیر بهینه به وسیله ایشان انتخاب شده است. جهت انجام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال، ابتدا بستر از پایین‌دست کانال به صورت کامل اشباع شده و بعد از آن جریان به آرامی وارد فلوم آزمایشگاهی شد. بعد از بالا آمدن عمق جریان و ثابت شدن دبی مورد نیاز، ارتفاع دریچه کنترل عمق در پایین‌دست به آرامی تغییر داده شد تا عمق شش سانتی‌متر در کانال ایجاد شود. با ثابت شدن عمق و دبی جریان آبستنگی در اطراف آبشکن‌ها آغاز شد که تغییرات آن نیز به صورت منظم برداشت و ثبت شد.



شکل ۱- مقطع طولی کانال آزمایشگاهی



شکل ۲- پارامترهای هندسی در آبشکن‌های مدل شده و کانال

ترکیب‌های مختلفی از آبشکن‌های ساده، L و T شکل به صورت سری سه‌تایی در آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. در همه این ترکیب‌ها، آبشکن دوم، T شکل بوده است. نه ترکیب مورد استفاده در آزمایش‌های این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

$$f\left(B, L, a, L_t, a_t, \sigma_g, d_{50}, y, d_s, u, u_{cr}, \rho_s, g, \rho_w, K_s\right) = 0 \quad (1)$$

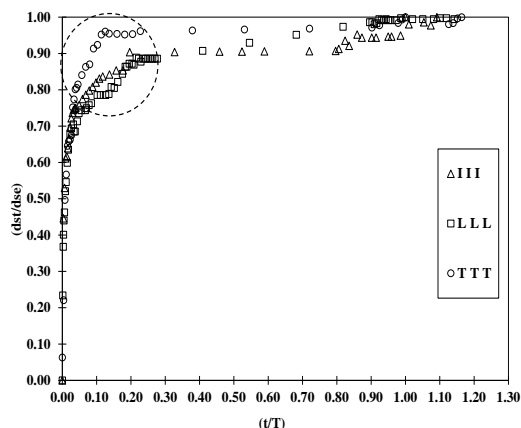
که در آن، B عرض کانال، L طول جان آبشکن، a فاصله اصلی آبشکن‌ها،  $L_t$  طول بال آبشکن،  $a_t$  فاصله فرعی آبشکن‌ها،  $\sigma_g$  انحراف معیار ذرات بستر،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر، y عمق جریان،  $d_s$  بیشترین عمق آبستنگی، u سرعت متوسط جریان،  $u_{cr}$  سرعت بحرانی،  $\rho_s$  جرم مخصوص رسوبات،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب، g شتاب ثقل و  $K_s$  ضریب شکل آبشکن می‌باشند. با حذف پارامترهایی که در این پژوهش ثابت فرض شده‌اند و همچنین، پارامترهایی که از اهمیت کمتری برخوردارند، رابطه (۲) حاصل می‌شود.

$$\frac{ds}{y} = f(a_t, K_s) \quad (2)$$

با توجه به اثر این پارامترها بر آبستنگی آبشکن‌ها، مقایسه ترکیب‌های مختلف با هدف حداقل کردن عمق آبستنگی آبشکن میانی انجام می‌گیرد. جهت انجام آزمایش‌ها از یک فلوم به طول ۱۴ متر و عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر واقع در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی استفاده شده است (شکل ۱). قطر متوسط رسوبات و انحراف معیار هندسی آن‌ها که در انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به ترتیب برابر  $D_{50}=1\text{mm}$  و  $\sigma_g=1.41$  می‌باشد. آبشکن‌ها، از جنس پلاکسی گلاس ساخته شده و ابعاد آن ۳۵ سانتی‌متر برای جان آبشکن‌ها (L) و ۳۵ سانتی‌متر برای باله آن ( $L_t$ ) در نظر گرفته شد. فاصله جان آبشکن‌های سری، سه برابر طول آبشکن است.

برای اندازه‌گیری عمق آبستنگی از دستگاه بسترسنج استفاده شده است. با حرکت این دستگاه در راستای طول و عرض عمق نقاط مورد نظر بدون برخورد حسگر با بستر فرسایش‌پذیر اندازه‌گیری می‌شود و نتایج به وسیله اپراتور ثبت می‌شود. دقت اندازه‌گیری این دستگاه یک میلی‌متر است. دبی مورد استفاده ۲۸/۵ لیتر بر ثانیه است که با توجه به عمق شش سانتی‌متری جریان بر روی بستر و همچنین، عدد فرود حدود ۰/۴۲، شرایط جریان به صورت آستانه

آزمایش‌ها و ترکیب‌های مختلف در نظر گرفته شد تا بیش از ۹۰ درصد آبشستگی نهایی در ترکیب‌ها حاصل شود.



شکل ۴- درصد نسبی عمق آبشستگی با توجه به درصد نسبی زمان آبشستگی

### نتایج و بحث

هدف از انجام آزمایش‌ها، بررسی و مقایسه عمق و حجم آبشستگی در اطراف آبشکن‌های سری سه‌تایی با اشکال هندسی مختلف می‌باشد. جدول ۲ عمق و حجم آبشستگی برداشت شده در آبشکن‌های سری با دبی ۲۸/۵ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در این جدول،  $d_{s1}$ ،  $d_{s2}$  و  $d_{s3}$  به ترتیب بیشترین عمق آبشستگی در آبشکن اول، آبشکن دوم و آبشکن سوم هستند.  $d_{s, ave}$  عمق آبشستگی متوسط،  $V$  حجم فرسایش بستر و  $\gamma$  عمق جریان است. بر اساس نتایج جدول ۲، تفاوت معناداری در عمق آبشستگی آبشکن T شکل میانی وجود دارد. این تفاوت می‌تواند به دلیل شکل‌های مختلف آبشکن‌های مجاور ( $K_s$ ) باشد. لذا نتایج را بر اساس عمق آبشستگی هر موقعیت، عمق آبشستگی متوسط هر ترکیب و حجم آبشستگی بستر، مورد بررسی قرار داده می‌شود.

**عمق آبشستگی موضعی در آبشکن‌ها:** با توجه به نتایج همه آزمایش‌ها، متوسط عمق آبشستگی موضعی برای آبشکن T شکل میانی تقریباً ۰/۸ برابر عمق جریان است. این آبشستگی برای حالتی که آبشکن بالادست آن L شکل باشد، حدود ۰/۶ برابر عمق جریان است که کمترین مقدار متوسط را با توجه به آبشکن بالادستی خود دارد. این در حالی است که عمق آبشستگی آبشکن L شکل بالادست، در حدود

به‌طور مثال، ترکیب T4 یعنی آبشکن L شکل در موقعیت اول، آبشکن T در موقعیت دوم و آبشکن ساده I در موقعیت سوم است. نحوه قرارگیری آبشکن‌ها در فلوم آزمایشگاهی برای یکی از ترکیب‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- نحوه چیدمان آبشکن‌های سری سه‌تایی

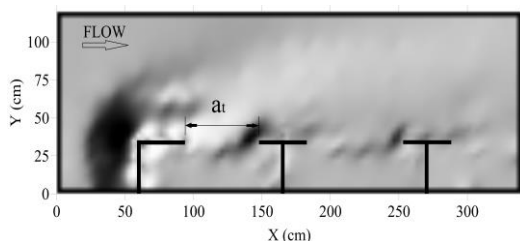
Test No.	SD1	SD2	SD3
T1	I	T	I
T2	I	T	L
T3	I	T	T
T4	L	T	I
T5	L	T	L
T6	L	T	T
T7	T	T	I
T8	T	T	L
T9	T	T	T



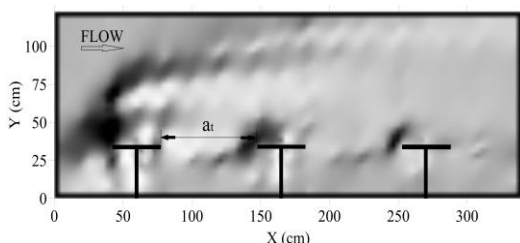
شکل ۳- آبشکن‌های مورد استفاده در یکی از ترکیب‌ها

به‌منظور مقایسه ترکیب‌های مختلف، آزمایش‌های شاهد جهت رسیدن به یک مدت زمان مناسب جهت بررسی همه تست‌ها انجام شد. بر این اساس، آزمایش آبشکن‌های سری (III)، (LLL) و (TTT) به مدت ۳۰ ساعت انجام شد و عمق آبشستگی در زمان‌های مشخص برداشت شد. بر اساس شکل ۴، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که ترکیب (TTT) در مدت ۱۰ درصد زمان تعادل به بیش از ۹۰ درصد عمق تعادلی خود رسیده و زمان کمتری را نسبت به سایر ترکیب‌ها برای رسیدن به تعادل نیاز دارد. در ترکیب‌های (IID) و (LLL) مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا آبشستگی به تعادل برسد و در ۱۵ درصد از زمان تعادل به بیش از ۸۰ درصد آبشستگی نهایی می‌رسد. لذا، با توجه به زمان آزمایش‌های شاهد انجام شده، مدت پنج ساعت جهت انجام همه

بهترین آبشکن برای بالادست آبشکن T شکل میانی، آبشکن L شکل می‌باشد که حداقل آبستگی را برای این آبشکن ایجاد می‌کند. در صورت استفاده از آبشکن L شکل، فاصله  $a_{t12}$  نسبت به آبشکن I و T به ترتیب در حدود ۵۰ و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- رسوب‌گذاری و فرسایش در محدوده آبشکن‌ها، (الف)

ترکیب T6 و (ب) ترکیب T9

جهت بررسی آبستگی آبشکن T شکل میانی، با توجه به شرایط رژیم جریان، مشاهده می‌شود که جریان گردابه‌ای برگشتی در پایین‌دست هر آبشکن شکل می‌گیرد. میزان برگشت این گردابه نیز با توجه به هندسه آبشکن پایین‌دست متفاوت است. در واقع وجود زبانه (باله) در فضای بین دو آبشکن، در شکل گردابه‌های ایجاد شده تفاوت ایجاد می‌کند. اما تأثیر آبشکن پایین‌دست نسبت به آبشکن بالادست به دلیل شدت جریان و یا سرعت آن بسیار کمتر است. با توجه به آبستگی آبشکن میانی و هندسه آبشکن پایین‌دست، در حالتی که آبشکن پایین‌دست T شکل می‌باشد، کمترین میزان فرسایش برای آبشکن میانی ایجاد می‌شود. این میزان آبستگی در حدود  $0.73$  برابر عمق جریان است. فاصله  $a_{t23}$  نیز در حالتی که از آبشکن T شکل استفاده شود، در حدود ۱۷ درصد نسبت به سایر آبشکن‌ها کمتر است. اختلاف عمق آبستگی با توجه به آبشکن پایین‌دست برای هندسه‌های مختلف اندک است، اما نمی‌توان از این

$2/7$  برابر عمق جریان است که تقریباً بیشترین عمق آبستگی را دارد. علت این نتایج می‌تواند به دلیل ایجاد میدان گردابه‌ای بسیار آرام در بین دو آبشکن اول و دوم باشد. در واقع آبشکن اول که به شکل L می‌باشد، مانع از ورود جریان قوی به میدان دو آبشکن می‌شود.

جدول ۲- عمق و حجم آبستگی آبشکن‌های ترکیب‌های

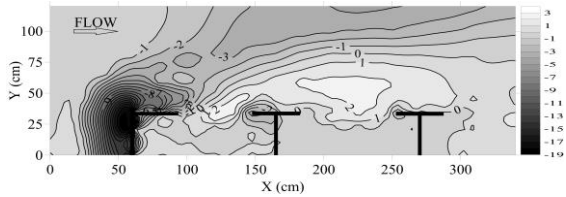
مختلف نسبت به عمق جریان

Test No.	$d_{s1}/y$	$d_{s2}/y$	$d_{s3}/y$	$d_{s\text{ave}}/y$	$V$ (m <sup>3</sup> )
T1	۲/۶	۰/۷	۰/۹	۱/۴۲	۰/۰۶۸
T2	۲/۶	۰/۷	۰/۶	۱/۳۳	۰/۰۶۶
T3	۲/۷	۰/۷	۰/۵	۱/۳۱	۰/۰۶۷
T4	۲/۷	۰/۶	۰/۹	۱/۴۱	۰/۰۷۱
T5	۲/۷	۰/۶	۰/۷	۱/۳۴	۰/۰۶۵
T6	۲/۷	۰/۶	۰/۳	۱/۲۱	۰/۰۶۳
T7	۲/۳	۰/۹	۱/۱	۱/۴۵	۰/۰۷۶
T8	۲/۵	۱/۲	۱	۱/۵۴	۰/۰۷۱
T9	۲/۵	۰/۹	۰/۵	۱/۳۰	۰/۰۹

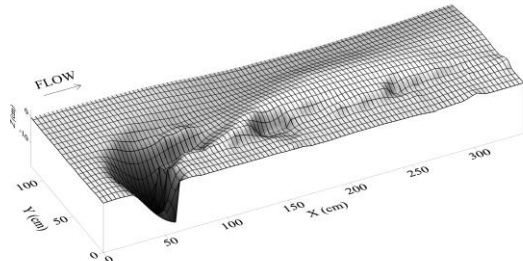
شکل ۵ محدوده رسوب‌گذاری و فرسایش را برای

ترکیب‌های T6 و T9 نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۵- الف مشاهده می‌شود که مقدار  $a_t$  با توجه به هندسه دو آبشکن متوالی، نسبت به سایر ترکیب‌ها حداقل می‌باشد. این مقدار، نسبت به حالت بدون زبانه، ۵۰ درصد کاهش داشته است. این فاصله حداقلی و همچنین، عدم ورود جریان قوی به میدان دو آبشکن باعث می‌شود تا فرسایش بسیار کاهش یابد. علاوه بر اینکه با این چیدمان، فرسایش حداقل می‌شود، عامل دیگری نیز وجود دارد که این فرسایش را به حداقل مقدار خود می‌رساند. این عامل، ورود رسوبات معلق و متحرک ناشی از فرسایش آبشکن اول به داخل حفره آبستگی آبشکن دوم است. ورود رسوبات بالادست باعث کاهش عمق آبستگی آبشکن میانی می‌شود و بین ورود رسوبات و فرسایش حفره آن یک تعادل ایجاد می‌شود. اما با توجه به شکل ۵- ب، فاصله دو آبشکن اول و دوم از یکدیگر در حدود ۳۳ درصد نسبت به حالت بدون زبانه کمتر است. این مسأله باعث شده تا نسبت به ترکیب T6، جریان با قدرت بیشتری به آبشکن میانی برسد. در این حالت بنابراین

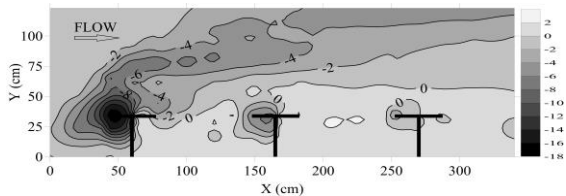
یکی از تفاوت‌های عمده که در کارکرد آبشکن L شکل و T شکل وجود دارد، تفاوت در حفره آبشستگی است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حفره آبشستگی در آبشکن L شکل در قسمت (ب) تا دیواره کناری رسیده و فرسایش ایجاد کرده است. اما در شکل ۶- ت، حفره آبشکن T شکل اول به دیواره نرسیده و از آن محافظت کرده است.



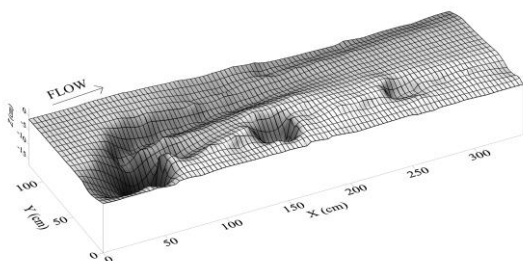
الف) عمق آبشستگی (سانتی‌متر) در ترکیب T6



ب) بستر فرسایش پذیر ترکیب T6



پ) عمق آبشستگی (سانتی‌متر) در ترکیب T9



ت) بستر فرسایش پذیر ترکیب T9

شکل ۶- آبشستگی نهایی پیرامون ترکیب‌های T6 و T9

**حجم آبشستگی بستر فرسایش پذیر:** مقایسه از نظر حجم فرسایش، رویکردی دیگر در جهت بررسی کارکرد آبشکن‌های سری است. در واقع مجاورت آبشکن‌ها با هندسه‌های مختلف در کنار هم باعث

تأثیر چشم پوشی کرد. نهایتاً با در نظر گرفتن مقادیر حداقلی آبشستگی برای آبشکن میانی، می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین هندسه برای بالادست، آبشکن L شکل و برای پایین دست، آبشکن T شکل می‌باشد. بنابراین با توجه به جدول ۱، ترکیبی که این دو حالت را هم‌زمان داراست T6(L T T) می‌باشد. در این حالت فاصله  $a_{t12}$  و  $a_{t23}$  به ترتیب در حدود ۵۰ و ۳۳ درصد از حالت بدون زبانه کمتر است. این سری آبشکن مجموعاً بیشترین کاهش فاصله در تمام ترکیب‌ها را دارا است.

**عمق آبشستگی متوسط آبشکن‌های سری:** با دقت در جدول ۲ مشخص می‌شود که ترکیب T6 دارای کمترین مقدار متوسط آبشستگی نیز می‌باشد که مقدار آن ۱/۲۱ برابر عمق جریان است. یعنی این ترکیب علاوه بر این که بهترین عملکرد را برای آبشکن میانی دارد، به صورت عملکرد یکپارچه نیز دارای کمترین مقدار متوسط آبشستگی است. همچنین، بعد از آن، ترکیب T9 دارای کمترین مقدار متوسط آبشستگی است. هندسه آبشکن سوم در این ترکیب، همانند ترکیب T6 به صورت T شکل است.

شکل ۶ تصویری سه بعدی و توپوگرافی از آبشستگی ترکیب‌های T6 و T9 را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار Surfer ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در محل آبشکن دوم، آبشستگی بیشتر در نوک باله در بالادست اتفاق افتاده است. علاوه بر آبشستگی، رسوب‌گذاری در این ترکیب‌ها نیز قابل مشاهده است. با توجه به شکل‌های ۶- الف و ب مشخص است که در رسوب‌گذاری آبشکن بالادست، پشته‌های آن دیواره‌های حفره آبشستگی آبشکن میانی را تشکیل داده‌اند. در محدوده بین آبشکن‌های دوم و سوم نیز مشاهده می‌شود که رسوب‌گذاری تا وسط مقطع عرضی کانال نیز ادامه دارد. اما با توجه به شکل‌های ۶- پ و ت، برای ترکیب T9 عمق آبشستگی آبشکن دوم بیشتر است. در واقع تأثیر فاصله دماغه آبشکن‌ها از یکدیگر با این مقایسه بهتر مشخص می‌شود. در این ترکیب به دلیل بیشتر بودن فاصله  $(a_t)$ ، حفره آبشکن دوم کمتر تحت تأثیر رسوب‌گذاری آبشکن اول است.

شده است. علت این شرایط آن است که آبشکن اول با منحرف کردن جریان به سمت مخالف، از شدت آن در اطراف آبشکن دوم کم می‌کند و در واقع شدت جریان در طرف مقابل بیشتر شده و فرسایش در طرف مقابل ایجاد می‌شود. با فرسایش محدوده مخالف آبشکن‌های دوم و سوم، ترسیب در قسمت میانی بستر در محدوده آبشکن دوم اتفاق می‌افتد. نتیجه این فرایند در شکل ۶- الف نیز قابل مشاهده است.

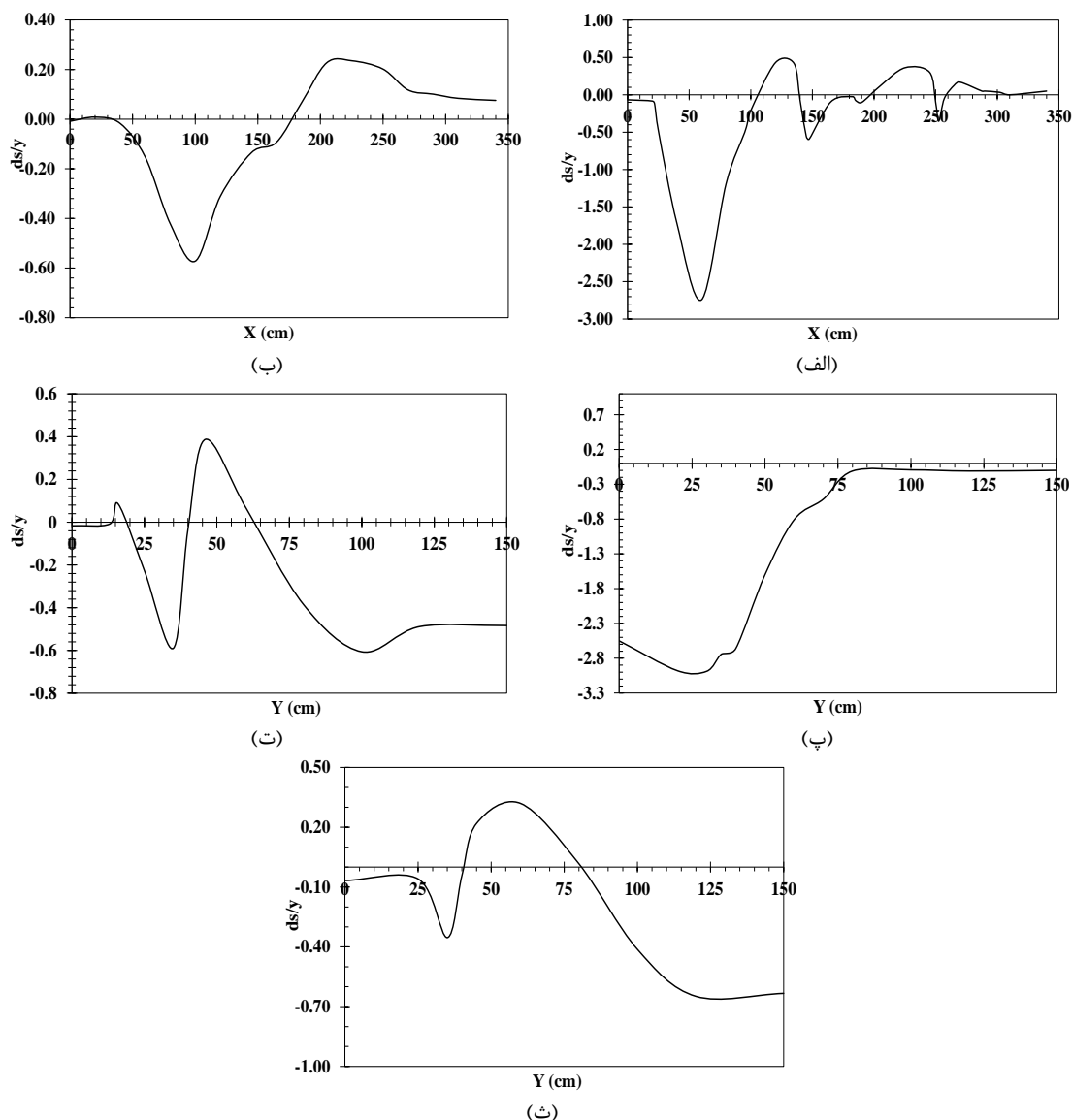
مقطع دیگری جهت بررسی در شکل ۷- پ مشخص شده است. این مقطع در محل نوک دماغه آبشکن اول می‌باشد. مشاهده می‌شود که تمام آبشستگی در سمت آبشکن می‌باشد. فرسایش از دیواره شروع شده و تا وسط کانال ادامه دارد، که بیشترین عمق فرسایش آن اندکی قبل از نوک دماغه ایجاد شده است. شکل ۷- ت محدوده آبشستگی اطراف دماغه آبشکن دوم را نمایش می‌دهد. در این شکل، بستر از دیواره تا نزدیکی نوک باله دارای فرسایش نیست و با نزدیک شدن به نوک آبشکن، آبشستگی آغاز می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آبشستگی در این آبشکن به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت اول حفره‌ای است که اطراف نوک باله ایجاد می‌شود که بلافاصله بعد از نوک باله روند فرسایش تغییر کرده و رسوب‌گذاری آغاز می‌شود. علت اصلی این رسوب‌گذاری آبشکن L شکل بالادست و همچنین، هندسه آبشکن میانی است. قسمت دوم، سطح شسته شده‌ای است که بعد از مقطع میانی کانال ایجاد شده است که به دلیل تنگ‌شدگی کانال در محل آبشکن‌ها، افزایش سرعت جریان و انتقال حجم جریان به سمت مخالف آبشکن‌ها می‌باشد.

با مقایسه مقطع عرضی در محل آبشکن اول مشاهده می‌شود که قسمت عمده حجم فرسایش به سمت مخالف آبشکن‌ها منتقل شده است. در نهایت با توجه به شکل ۷- ث که مقطع عرضی در محل دماغه آبشکن سوم است، کل آبشستگی به سمت مخالف انتقال داده شده و فقط قسمت اندکی اطراف دماغه شسته شده است. همچنین، ارتفاع رسوب‌گذاری به دلیل کاهش فرسایش بالادست کاهش یافته است.

می‌شود تا حجم فرسایش در هر ترکیب متفاوت باشد. عمده حجم فرسایش ایجاد شده برای ترکیب‌ها ناشی از آبشستگی در آبشکن اول است که بیشترین حجم را دارا است. بر اساس جدول ۲، آبشستگی در ترکیب T6 کمترین مقدار حجم را دارد. این ترکیب در مقایسه با سری آبشکن‌های (I I D) در حدود ۲۷ درصد و در مقایسه با سری‌های (L L L) و (T T T) در حدود ۳۰ درصد، حجم فرسایش کمتری دارد. همچنین، حجم آبشستگی ترکیب T6 به میزان ۱۷ درصد کمتر از متوسط نه ترکیب مورد آزمایش در این پژوهش است. بنابراین، این ترکیب علاوه بر این‌که از نظر کارکرد آبشکن میانی و متوسط عمق آبشستگی بهترین عملکرد را دارد، در ارتباط با حجم فرسایش نیز بهترین نتیجه را می‌دهد. علت این امر، عملکرد مناسب آبشکن L شکل در بالادست سایر آبشکن‌ها و همچنین، عمق آبشستگی موضعی و عمق آبشستگی متوسط کمتر نسبت به سایر ترکیب‌ها می‌باشد.

با توجه به شکل ۷، جهت بررسی دقیق‌تر حجم آبشستگی آبشکن‌ها در ترکیب T6، چند مقطع طولی و عرضی را بررسی شد تا شرایط حجم فرسایش یافته بیشتر مشخص شود. همان‌طور که در شکل ۷- الف مشخص است، در محل نوک دماغه بالادست هر آبشکن، بیشترین عمق آبشستگی موضعی وجود دارد. به علت حجم ذرات معلق در جریان، قدرت آن کاهش یافته و فرسایش کاهش می‌یابد. ذرات شسته شده در نوک دماغه به تدریج با عبور از آبشکن ته‌نشین شده و اطراف آبشکن در پایین‌دست رسوب‌گذاری می‌شود. این محدوده رسوب‌گذاری تا نزدیکی دماغه آبشکن بعدی ادامه دارد. همچنین، با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که عمق آبشستگی در آبشکن اول بیش از آبشکن دوم و سوم است و بیش از ۲/۷ برابر عمق جریان است. نهایتاً آبشستگی آبشکن دوم نیز از آبشکن سوم بیشتر است که این حالت به علت فاصله بین آبشکن‌ها و عرض تنگ‌شدگی می‌باشد. با توجه به شکل ۷- ب، بستر در محل قرارگیری آبشکن اول دارای فرسایشی در حدود ۰/۶ برابر عمق جریان است. اما با نزدیک شدن به آبشکن دوم، فرسایش کاهش یافته و بعد از عبور از آبشکن دوم رسوب‌گذاری ایجاد





شکل ۷- عمق بی بعد آبشستگی برای ترکیب T6 (L T T)، الف) مقطع طولی در محل نوک آبشکن‌ها، ب) مقطع طولی در وسط کانال، پ) مقطع عرضی در محل نوک دماغه آبشکن اول، ت) مقطع عرضی در محل نوک دماغه آبشکن دوم و ث) مقطع عرضی در محل نوک دماغه آبشکن سوم

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آبشستگی اطراف ترکیب‌های مختلفی از آبشکن‌های سری در حالتی که آبشکن دوم ثابت و به صورت T شکل است، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. آبشکن‌های واقع در بالادست و پایین‌دست آبشکن دوم، با هندسه‌های مختلف ممکن شامل I، L و T شکل جانمایی شد. آزمایش‌ها با دبی ۲۸/۵ لیتر بر ثانیه و در حالت آستانه حرکت ذرات انجام گرفت. جهت مقایسه نحوه عملکرد ترکیب‌ها، آزمایش شاهد انجام شد و مدت زمان پنج ساعت برای داشتن بیش از ۹۰ درصد آبشستگی در همه ترکیب‌ها در نظر

گرفته شد. تغییرات عمق بستر فرسایش‌پذیر در تمام طول کانال آزمایشگاهی، اندازه‌گیری و برداشت شد. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، شکل هندسی آبشکن‌ها ( $K_s$ ) و فاصله باله آبشکن‌ها ( $a_t$ ) از یکدیگر، بر عمق و حجم فرسایش تأثیرگذار است. اهم نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد.

۱- عمق آبشستگی آبشکن T در جایگاه دوم، به طور متوسط برای همه ترکیب‌ها حدوداً ۰/۸ برابر عمق جریان می‌باشد.

۲- بهترین عملکرد برای آبشکن بالادست، مربوط به آبشکن L شکل است که باعث می‌شود، آبشکن T

دارد.

۹- در محدوده آبشکن اول، تمام حجم فرسایش یافته در سمت موافق آبشکن‌ها است.

۱۰- در محل آبشکن دوم، حجم آبشستگی به دو قسمت تبدیل شده است و قسمت عمده آن به سمت مخالف منتقل می‌شود.

۱۱- محدوده رسوب‌گذاری در ترکیب T6 بیشتر بین آبشکن دوم و سوم است که تا وسط مقطع عرضی ادامه دارد.

۱۲- محدوده آبشستگی با عبور از آبشکن‌ها به تدریج به سمت مخالف منتقل شده و دیواره مجاور را به خوبی حمایت می‌کند و مانع از فرسایش آن می‌شود.

در نهایت، با توجه به موارد گفته‌شده بهترین ترکیب در آزمایش‌های انجام شده مربوط به سری آبشکن‌های (L T T) است. این ترکیب، از لحاظ عمق آبشستگی و حجم فرسایش بسیار مناسب عمل می‌کنند. لذا با بهره‌گیری از این نتایج مهندسیین طراح با توجه به اهداف طراحی، می‌توانند ترکیب بهینه را انتخاب کنند.

شکل میانی در حدود ۰/۶ برابر عمق جریان فرسایش داشته باشد.

۳- عمق آبشستگی آبشکن L شکل در جایگاه اول حدوداً ۲/۷ برابر عمق جریان است.

۴- مناسب‌ترین عملکرد برای آبشکن پایین‌دست مربوط به آبشکن T است. در حضور این آبشکن در پایین‌دست، آبشکن میانی ۰/۷۳ برابر عمق جریان دچار فرسایش می‌شود.

۵- ترکیب T6 (L T T)، بهترین ترکیب برای حداقل کردن فرسایش آبشکن‌ها است.

۶- در ترکیب T6 فاصله  $a_{t23}$  و  $a_{t12}$  به ترتیب ۵۰ و ۳۳ درصد کمتر از حالت بدون زبانه (III) است. این سری آبشکن مجموعاً بیشترین کاهش فاصله را در بین ترکیب‌های این پژوهش دارا است.

۷- کمترین عمق آبشستگی متوسط در ترکیب‌ها، مربوط به ترکیب T6 است که به‌طور متوسط ۱/۲۱ برابر عمق جریان فرسایش دارد.

۸- بهترین حجم آبشستگی نیز مربوط به ترکیب T6 است که نسبت به سایر ترکیب‌ها کمترین مقدار را

#### منابع مورد استفاده

1. Abbasi, A.A. and M. Malek Nejad. 2012. Experimental study of the impact of direct permeable spur dike parameters and the T-shaped on the scouring around them. The Iranian Society of Irrigation and Water Engineering, second year, 8 (in Persian).
2. Amirbahadori Arbat, A. 2015. Experimental study of the combined effect of the length, roughness and angle of spur dike on the scour depth in two successive spur dike. MSc Thesis, University of Agricultural Sciences, Tabriz, 143 pages (in Persian).
3. Ardeshir, A., H. Karami, M. Sanei and S.A. Salamatian. 2010. Investigating the temporal development of scour around spur dike in the direct channel and predicting it with artificial neural networks. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 4(13): 39-50 (in Persian).
4. Dehghani, A.A., M. Barzali, R. Fazloulou and M. Zea Tabar Ahmadi. 2009. Experimental study of scouring around a series of L-head groynes. Journal of Water and Soil Conservation, 16(3): 141-162 (in Persian).
5. Hashemi Najafi, F. 2008. Experimental investigation of scouring around L-head groynes under clear water condition. MSc Thesis, Tarbiat Modares University, 156 pages.
6. Hoseini, A., A. Saberi and M. Habibi. 2012. Investigating economical evaluation of groins in Zanjanrood River. Watershed Engineering and Management, 3(4): 205-213 (in Persian).
7. Iranshahi, M., M. Ghodsian and M. Vaghefi. 2016. Flow field and scouring around series of triplex spur dikes in sharp bend. Modares Civil Engineering Journal, 16(3): 1-12 (in Persian).
8. Jarrahzade, F., S.M. Kashefipour and M. Shafai Bajestan. 2017. The effects of permeable, impermeable and bandal-like spur-dike angel on geometric dimensions of scouring in submerged conditions. Irrigation Sciences and Engineering, 40(2): 1-14.
9. Karami, H., A. Ardeshir, K. Behzadian and M. Ghodsian. 2011. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes. Journal of Hydraulic Research, 49(6): 809-813.
10. Karami, H., H. Bassar, A. Ardeshir and S.H. Hosseini. 2014. Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. Water and Environment Journal, 28(1): 124-134.

11. Mehraein, M., M. Ghodsian, M.K. Mashizi and M. Vaghefi. 2017. Experimental study on flow pattern and scour hole dimensions around a T-Shaped Spur Dike in a Channel Bend under Emerged and Submerged Conditions. *International Journal of Civil Engineering*, 1-16.
12. Mousavi Naeni, S.A., M. Vaghefi and M. Ghodsian. 2010. Experimental investigation of relative radius on flow pattern around a T shape spur dike in 90 degree bend with rigid bed. *Bimonthly Journal of Water and Wastewater*, 23(1): 15-23 (in Persian).
13. Pandey, M., Z. Ahmad and P.K. Sharma. 2015. Estimation of maximum scour depth near a spur dike. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(3): 270-278.
14. Saneie, M. 2006. Laboratory evaluation of the effect of blockage on local scouring of spur dike. 7th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz.
15. Saneie, M. 2010. Effect of minor spur dike on erosion reduction at first spur dike in fine material. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2(3): 179-186 (in Persian).
16. Saneie, M. 2011. Experimental study on effect of minor spur dike to reduce main spur dike scouring. *Watershed Engineering and Management*, 3(3): 140-148 (in Persian).
17. Vaghefi, M., M. Ghodsian and S.A.A. Salehi Neyshabouri. 2009. Experimental study on scouring around single t-shaped spur dike on a 90 degree bend. *Iran-Water Resources Research*, 4(3): 57-69 (in Persian).
18. Vice presidency for strategic planning and supervision. 2011. Guideline for estimation of local scour. No. 549 (in Persian).
19. Zare, M. and T. Honar. 2016. The Effect of groyne on reduction of the scour depth around bridge piers in river bends. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74): 167-192 (in Persian).