

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکل‌های مختلف آبشکن بر تغییرات زمانی آبستگی پیرامون آنها

شهاب نیر<sup>۱</sup>، سعید فرزین<sup>۲\*</sup>، حجت کرمی<sup>۳</sup> و محمد رستمی<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد؛ و استادیاران گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۴- استادیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱

### چکیده

رودخانه پدیده‌ای است طبیعی و فعال که کناره‌ها و بستر آن همواره در حال تغییر و فرسایش است. همین امر سبب شده تا مسیر رودخانه طی زمان دستخوش تغییرات و تحولات اساسی شود. روش‌هایی گوناگون برای کاهش فرسایش کناری وجود دارد که یکی از آنها استفاده از آبشکن است. در این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر آبشکن‌های سری ساده، T شکل و L شکل در کانال مستقیم بر تغییرات زمانی آبستگی اطراف آنها بررسی، مقایسه و تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آبشکن T شکل در ۱۰ درصد اول مدت زمان آبستگی به بیش از ۹۰ درصد آبستگی تعادلی می‌رسد. برای آبشکن ساده و L شکل در ۱۵ درصد اول مدت زمان آبستگی، این مقدار بیش از ۸۰ درصد است. همچنین، بیشترین عمق آبستگی در آبشکن ساده و L شکل دیده شده است، این مقدار در حدود سه برابر عمق جریان است. آبشکن T شکل در حدود  $0.3y$  عمق جریان است) کمتر از سایر هندسه‌ها در جایگاه اول آبستگی دارد. عمق حداکثر آبستگی در همه هندسه‌ها کمی عقب‌تر از نوک دماغه ایجاد می‌شود. نتایج مقایسه عمق آبستگی اطراف سه نوع آبشکن در مقاطع مختلف نشان می‌دهد که آبستگی متوسط آبشکن T شکل نسبت به آبستگی متوسط آبشکن ساده  $0.4y$  و نسبت به آبستگی متوسط آبشکن L شکل  $0.25y$  کمتر است. سرانجام اینکه برای محاسبه تغییرات زمانی آبستگی، با توجه به شکل هندسی آبشکن، رابطه‌ای پیشنهاد گردید. عمق آبستگی حاصل از این آزمایش‌ها و رابطه پیشنهادی با رابطه‌های تخمینی دیگر محققان مقایسه شد. همچنین دیده شد که بیشترین فرسایش در ساحل مقابل آبشکن‌ها مربوط به آبشکن L شکل است.

### واژه‌های کلیدی

آبشکن ساده، آبشکن‌های سری، آبشکن L شکل، آبشکن T شکل، عمق آبستگی

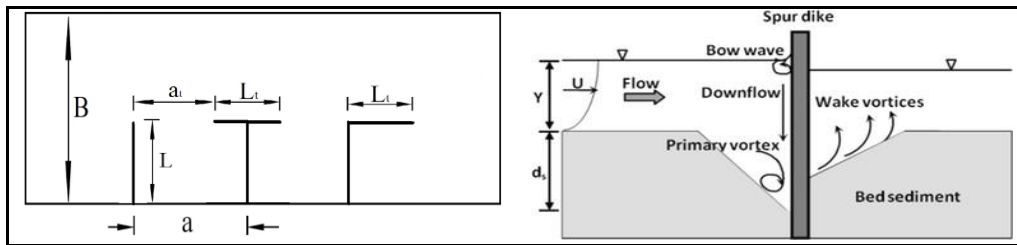
### مقدمه

نتیجه تغییرات طبیعی جریان در کانال یا تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند ساخت و ساز در محدوده کانال یا برداشت مصالح از بستر روی دهد. برای کنترل فرسایش در کناره‌های رودخانه یا بسترهای فرسایش‌پذیر از روش‌های مختلف استفاده می‌شود. حفاظت رودخانه در برابر فرسایش و تخریب ناشی از جریان آب با استفاده از

جریان در کانال‌های باز با بستر متحرک معمولاً با انتقال رسوبات همراه است. آبستگی پدیده‌ای است طبیعی که در اثر انتقال جریان آب و رسوبات، در بستر و کناره‌های فرسایش‌پذیر کانال‌ها و رودخانه‌ها به وجود می‌آید (Kayaturk, 2005). فرسایش و آبستگی می‌تواند در

آبشکن‌ها از روش‌های مناسب در مهندسی رودخانه است. آبشکن‌ها شکل‌های مختلف دارند که متناسب با نیاز و با توجه به شرایط موجود در طبیعت و رودخانه از آنها استفاده می‌شود. آبشکن‌های ساده، L شکل و T شکل از مهم‌ترین آبشکن‌ها هستند که هر یک از این هندسه‌ها مزایا و کاربرد خاص خود را دارد. مهم‌ترین عاملی که پایداری آبشکن‌ها را تهدید می‌کند آبشستگی اطراف آنهاست که این

آبشستگی برای شکل‌های مختلف آبشکن متفاوت است. از پارامترهای مهم در مبحث آبشستگی اطراف آبشکن‌ها می‌توان به عمق آبشستگی ( $ds$ )، عمق جریان ( $y$ )، پارامترهای جریان مانند سرعت ( $u$ )، گردابه‌های پدید آمده در اطراف آبشکن، طول آبشکن ( $L$ )، طول باله آبشکن ( $L_t$ )، فاصله بین آبشکن‌ها ( $a$ )، فاصله بین آبشکن‌ها ( $a_t$ ) و نسبت تنگ‌شدگی ( $L/B$ ) اشاره کرد. این پارامترها در شکل ۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱- پارامترهای مهم در بررسی آبشکن

رسیدند. نوروژی و همکاران (Norouzi et al., 2009) نیز در مطالعات آزمایشگاهی خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر مصالح، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. کرمی و همکاران (Karami et al., 2011) برای کاهش عمق آبشستگی آبشکن‌های سری از یک آبشکن محافظ در بالادست استفاده کردند؛ نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد آبشکن محافظ اگر به‌درستی طراحی شود قادر خواهد بود تا متوسط حداکثر عمق آبشستگی را در آبشکن‌های سری کاهش دهد. این محققان همچنین پارامترهای ابعادی را برای طراحی بهینه آبشکن محافظ ارائه کردند. روند توسعه آبشستگی اطراف آبشکن نفوذناپذیر را اردشیر و همکاران (Ardeshir et al., 2011) بررسی کردند. عباسی و ملک‌نژاد (Abbasi & Maleknejad, 2012) با مطالعه نسبت فاصله آبشکن‌ها به طول آنها اعلام کردند که نسبت سه و چهار به ترتیب برای آبشکن‌های مستقیم و T شکل نسبت‌هایی مناسب هستند. مهرنهاد و قدسیان (Mehrnhad & Ghodsian, 2012) با

چندین محقق آبشستگی اطراف آبشکن‌ها را بررسی کرده‌اند که در اینجا به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. گارد و همکاران (Garde et al., 1961) با اجرای آزمایش‌هایی روی ۴ اندازه آبشکن با نسبت‌های انقباض مختلف نشان دادند که حداکثر عمق آبشستگی تابعی از نسبت تنگ‌شدگی، عمق جریان، زاویه آبشکن با کانال، عدد فرود جریان و ضریب حرکت رسوبات بستر است. کوهنل و همکاران (Kuhnle et al., 1999) با اجرای آزمایش‌هایی دریافتند که نسبت تنگ‌شدگی و عمق جریان رابطه قطعی با حجم گودال آبشستگی اطراف آبشکن دارد. قدسیان و تهرانی (Ghodsian & Tehrani, 2001) با مطالعات آزمایشگاهی روابطی را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی و میزان گسترش آبشستگی به سمت بالادست، پایین‌دست و در جهت محور آبشکن ارائه دادند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2009) آبشستگی محلی اطراف آبشکن ساده در جریان آشفته را آزمایش و شبیه‌سازی کردند و به تطابق‌هایی بالا در نتایج آزمایشگاهی و عددی

است که گروه شمع‌ها و آبشکن‌ها دقیقاً به یکدیگر چسبیده باشند. تحقیقات مهرآیین و همکاران (Mehraein *et al.*, 2015) نشان داده است که به دلیل پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی رسوب، ابتدای فرایند آبشستگی در نوک دماغه‌هاست که آن را در مورد پارامترهای مختلف آشفستگی به اثبات رسانیدند و بیان داشتند که نوسانات سرعت در راستای عرض و عمق کانال در نوک بالادست آبشکن بیشتر است. واقفی و همکاران (Vaghefi *et al.*, 2017) تأثیر آبشکن T شکل در خم را بررسی کردند و نشان دادند که جریان ثانویه از ۳۰ درجه آغاز می‌شود و تا ۶۵ درجه به صورت کاهشی ادامه دارد؛ در این مطالعه، گردابه و جریان معکوس در بالادست و پایین‌دست آبشکن و تغییرات جریان ثانویه نیز بررسی شده است. روابطی که تا کنون برای پیش‌بینی عمق آبشستگی با توجه به تغییرات زمانی ارائه شده در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. پارامترهای استفاده شده در این جدول به صورت زیر تعریف می‌شوند:  $t$  = مدت زمان آبشستگی،  $d_{st}$  = حداکثر عمق آبشستگی در زمان  $t$ ،  $T_e$  = زمان رسیدن به عمق آبشستگی تعادلی (زمانی که تغییرات حداکثر عمق آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر به ازای ۲ ساعت آزمایش باشد) (Dey & Barbhuiya, 2005)  $d_{se}$  = حداکثر عمق آبشستگی تعادلی،  $U$  = سرعت جریان،  $U_{cr}$  = سرعت بحرانی جریان،  $F_d$  = عدد فرود ذره،  $D_{50}$  = قطر متوسط ذرات بستر،  $Y$  = عمق جریان،  $L$  = طول تکیه‌گاه در جهت عمود بر جریان،  $b$  = عرض تکیه‌گاه،  $g$  = شتاب ثقل،  $S$  = چگالی نسبی ذرات،  $\Delta = S - 1$ ،  $\sigma_g$  = انحراف معیار هندسی قطر ذرات،  $\theta_a$  = زاویه حمله جریان،  $T_s = t D_{50} (\Delta g D_{50})^{0.5} / L^2$ ،  $T_R = t (\Delta g D_{50}) / L_R$ ،  $N_s$  = ضریب شکل تکیه‌گاه (که برای حالت مستطیلی برابر با  $(1/25)$  و  $L_R = L^{2/3} Y^{1/3}$

بررسی آزمایشگاهی آبشکن T شکل دریافتند که سرعت گسترش آبشستگی برای ماسه ریزدانه بیشتر از ماسه درشت‌دانه است. همچنین بیان داشتند که تغییر ابعاد چاله آبشستگی حساسیت زیادی نسبت به طول آبشکن دارد. در حالی که این حساسیت نسبت به قطر مصالح بستر کمتر است. مطالعه آزمایشگاهی نوربخش و همکاران (Noorbakhsh *et al.*, 2013) نشان داده است که با افزایش عدد فرود ( $Fr$ ) و طول آبشکن، میزان عمق و دیگر ابعاد چاله آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق استغراق در ناحیه‌ای محدود، میزان آبشستگی و گسترش پشته‌ها ابتدا افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. اقبالی و همکاران (Eghbali *et al.*, 2013) روند توسعه زمانی ابعاد حفره آبشستگی اطراف آبشکن بالدار را بررسی و روابطی جهت پیش‌بینی آن ارائه کردند. نتایج این بررسی نشان داده است که قسمت اعظم آبشستگی در بستر ماسه‌ای و بستر شنی در زمان‌های اولیه اتفاق می‌افتد. در پژوهشی دیگر، کرمی و همکاران (Karami *et al.*, 2014) آبشستگی اطراف آبشکن‌های سری ساده را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که ۸۰ درصد آبشستگی‌ها در ۲۰ درصد اول زمان آزمایش رخ می‌دهد. پاندی و همکاران (Pandey *et al.*, 2015) با بررسی عمق آبشستگی اطراف آبشکن، سه رابطه جدید برای محاسبه حداکثر عمق و طول آبشستگی در بالادست و پایین‌دست ارائه دادند. سادات و تومیناگا (Sadat & Tominaga, 2015) با بررسی فاصله بهینه آبشکن و گروه شمع‌ها در بالادست، جهت کاهش آبشستگی، گزارش داده‌اند که وقتی فاصله گروه شمع‌ها از صفر به چهار برابر طول آبشکن افزایش می‌یابد، حجم و عمق آبشستگی موضعی کاهش می‌یابد و سرعت جریان در دماغه آبشکن حداکثر خواهد بود. فاصله صفر در این تحقیق این‌گونه تعریف شده

جدول ۱- روابط پیش‌بینی شده توسط محققان برای پیش‌بینی تغییرات زمانی عمق آبشستگی

شماره	محقق	رابطه
(۱)	Ballio & Orsi, 2001	$d_{st} / d_{se} = 1 - \exp[-0.028(tU / bY)^{0.5}]^{0.28}$
(۲)	Oliveto & Hager, 2002	$d_{st} / L_R = 0.068Ns.\sigma^{-0.5}F_d^{1.5}\log(T_R)$
(۳)	Coleman <i>et al.</i> , 2003	$d_{st} / d_{se} = \exp[-0.07(U_{cr} / U) \ln(t / T) ^{1.5}]$
(۴)	Yanmaz & Kose, 2007	$d_{st} / L = 0.25F_d^{0.85}(L / Y)^{0.15}(\log T_s)^{0.6}$
(۵)	Karami <i>et al.</i> , 2012	$d_{st} / d_{se} = [1 - \exp(-2.48(t / T_e)^{0.31})](U / U_{cr})^{-0.10}$

آبشکن دارد و حداکثر عمق آبشستگی زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات بستر در آستانه حرکت قرار گیرند؛ وی تأثیر دانه‌بندی و عمق جریان را به صورت رابطه تجربی ارائه داد. نیل (Neill, 1973) رابطه ۶ را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌ها پیشنهاد داد.

$$(d_s + y_0) / y_0 = (2.43 / y_0) \left( 2.5q^2 / 9d_{50}^{0.318} \right)^{0.333} \quad (۶)$$

که در آن،  $d_s$  = حداکثر عمق آبشستگی؛  $y_0$  = عمق جریان؛  $q$  = دبی واحد عرض کانال و  $d_{50}$  = قطر متوسط رسوبات بستر. زاغول (Zaghloul, 1983) با آزمایش‌هایی در یک کانال، تاثیر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در بالادست، خصوصیات رسوب و هندسه آبشکن را بر حداکثر عمق آبشستگی و الگوی آبشستگی اطراف آبشکن بررسی کرد و با استفاده از آنالیز ابعادی دریافت که حداکثر عمق آبشستگی تحت تأثیر نسبت بازشدگی و عدد فرود جریان است. فرولیچ (Froehlich, 1989) با استفاده از آنالیز رگرسیونی روی داده‌های آزمایشگاهی معادله‌ای را برای تخمین عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها یا آبشکن‌ها در شرایط آب صاف پیشنهاد کرد.

برای بررسی حداکثر عمق آبشستگی، محققان بسیاری رابطه‌هایی ارائه داده‌اند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. لسی (Lacey, 1936) با بهره جستن از معادله رژیم جریان، معادله‌ای برای پیش‌بینی آبشستگی ارائه کرد. احمد (Ahmad, 1953) رفتار و عملکرد آبشکن‌ها را بررسی و فرمولی برای محاسبه عمق آبشستگی در نوک آبشکن، بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، بیان کرد. او عقیده دارد دانه‌بندی بستر تأثیری بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد اما بر سرعت توسعه آبشستگی اثر می‌گذارد و سرعت توسعه در ماسه‌های ریزتر بیشتر است. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 1961) بر اساس عدد فرود جریان، طول آبشکن و سرعت متوسط جریان در بالادست نیز رابطه‌ای برای محاسبه عمق تعادلی آبشستگی ارائه دادند. لارسن (Laursen, 1962) برای پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش موضعی، رابطه نیمه تجربی با توجه به عمق متوسط جریان در بالادست، طول آبشکن و اعدادی ثابت محاسبه کرد.

گیل (Gill, 1972) با دو دانه‌بندی ۱/۵ و ۰/۹۱ میلی‌متر به آزمایش‌هایی دست زد و نتیجه گرفت که حداکثر عمق آبشستگی تعادلی بستگی به اندازه رسوبات بستر و عمق جریان یکنواخت بالادست

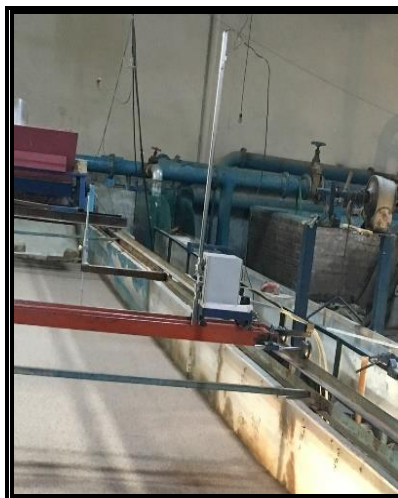
می‌کند. در انتهای مسیر نیز به منظور تنظیم ارتفاع سطح آب، دریچه مستطیلی وجود دارد. در تمام آزمایش‌ها، دبی ثابت و برابر ۲۸/۵ لیتر بر ثانیه است. دبی جریان با استفاده از یک سرریز مستطیلی در انتهای کانال اندازه‌گیری می‌شود. در آزمایش‌ها از ماسه طبیعی رودخانه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده که در آن قطر متوسط و انحراف معیار هندسی ذرات بستر به ترتیب برابر با  $D_{50}=1\text{mm}$  و  $\sigma_g=1.41$  است. با توجه به نشریه شماره ۵۴۹ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، مصالح استفاده شده با انحراف معیار رسوبات کمتر از ۱/۵، دارای دانه‌بندی یکنواخت است. همچنین، با توجه به روند محاسباتی ارائه شده در این نشریه، دبی و سرعت جریان با استفاده از نمودار شیلدز محاسبه شده است.

به دلیل ایجاد شرایط مقایسه‌ای برای آبشستگی‌ها در جریان آب زلال اطراف آبشکن‌ها رسوبات در حالت آستانه حرکت ( $U/U_{cr}=0.95$ ) در نظر گرفته شد. عدد فرود جریان در آزمایش‌ها ۰/۴۶ است. مدت زمان هر آزمایش ۳۰ ساعت در نظر گرفته شد. عمق جریان با توجه به توان پمپ آزمایشگاهی، ۶ سانتی‌متر انتخاب و محاسبه گردید. در تمام آزمایش‌ها از ۳ آبشکن استفاده شد. جنس آبشکن‌ها از پلاکسی گلاس و ابعاد آن ۳۵ سانتی‌متر برای جان آبشکن‌ها ( $L$ ) و ۳۵ سانتی‌متر برای باله آن ( $Lt$ ) در نظر گرفته شد. همچنین، آبشکن‌ها با فاصله سه برابر طول آبشکن در کانال نصب شدند. تغییرات زمانی عمق آبشستگی با استفاده از دستگاه بسترسنج دیجیتالی ساخت مؤسسه دلفت هلند با دقت ۱ میلی‌متر در مدت زمان آزمایش برداشت شد. این دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

ملویل (Melville, 1992) برای پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش موضعی در تکیه‌گاه‌های قائم، رابطه‌های تجربی پیشنهاد داده است. ژانگ و دوو (Zhang & Du, 1997) در فلومی به عرض ۲/۴ و طول ۲۶ متر با بستر ماسه‌ای به قطر متوسط ۰/۶۶ میلی‌متر عمق آبشستگی را در اطراف آبشکن بررسی کردند. پارامترهای اساسی شامل سرعت جریان، عرض کانال و عدد فرود بودند که برای آبشکن‌های عمود بر کانال بررسی شدند. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اکثر آنها و روابط پیش‌بینی آبشستگی برای شکل آبشکن ساده ارائه شده اند و تاکنون عمق آبشستگی آبشکن‌ها با شکل‌های مختلف هندسی مقایسه نشده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط مشابه برای سری آبشکن‌های ساده،  $T$  شکل و  $L$  شکل، عمق آبشستگی آنها در کانال اندازه‌گیری می‌شود و آبشستگی‌ها در هندسه‌های مختلف با هم مقایسه و تحلیل می‌شوند. برای محاسبه تغییرات زمانی آبشستگی پیرامون آبشکن اول، با توجه به شکل هر آبشکن، رابطه‌ای جدید معرفی شده و این رابطه با رابطه‌هایی که دیگر محققان ارائه داده‌اند مقایسه می‌شود.

### مواد و روش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها از یک فلوم به طول ۱۴ متر، از جنس پلاکسی گلاس مهار شده با قاب فولادی، در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی استفاده شده است. کانال آزمایشگاهی به عرض و ارتفاع به ترتیب ۱/۵ و ۰/۶ متر در شکل (۲) نشان داده شده است. این کانال دارای یک مخزن ورودی است که جریان را از طریق تبدیل تنگ شونده به داخل فلوم هدایت



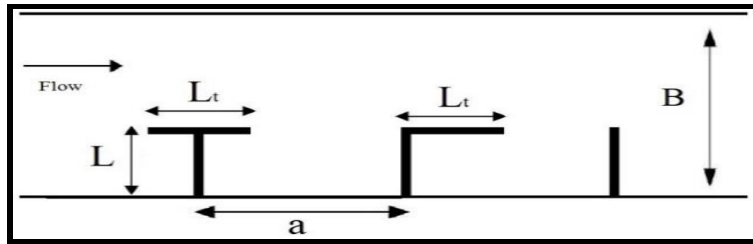
شکل ۲- دستگاه بسترسنج استفاده شده در آزمایش‌ها

پوشش دهد. این معیار تنگ‌شدگی بر اساس محدوده ارائه شده در نشریه ۵۱۶ و ۵۴۹ و همچنین پیشنهادهای محققانی مانند سبحان و کومار (Sobhan & Kumar, 1999)، فیاض‌بخش (Fayazbakhsh, 2003) و موسوی و همکاران (Mosavi et al., 2010) تعیین شده است. در مراجع فوق، به ترتیب  $a=2-5L$ ،  $L/B=20-30\%$  و  $L/B=23\%$  به عنوان مقادیر بهینه تنگ‌شدگی معرفی شده است.

پس از انجام آزمایش و قطع جریان، ۱۷ مقطع عرضی و ۱۰ مقطع طولی به‌طور ثابت و همچنین نقاط میانی در محل‌هایی با تغییرات توپوگرافی بیشتر برداشت شد. پارامترهای هندسی آبشکن‌ها در شکل ۴ آمده است؛ در این شکل،  $L_t/L=1$  و  $a=3L$  و  $L/B=23\%$  است که  $L/B$  تنگ‌شدگی مقطع عرضی کانال را نشان می‌دهد. این ابعاد طوری انتخاب شدند که بیشتر مقادیر پیشنهادی محققان را



شکل ۳- کانال آزمایش و سرریز مستطیلی کانال



شکل ۴- پارامترهای هندسی در آبشکن‌های مدل شده

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i^* - y_i| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}} \quad (10)$$

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، پارامترهای متعددی در عملکرد آبشکن‌ها برای حفاظت از سواحل مؤثرند. برای یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر آبشستگی در دماغه سری آبشکن‌ها، تحلیل‌هایی روی پارامترهای مؤثر انجام شده است. عوامل مؤثر در این زمینه طبق رابطه ۱۱ عبارت‌اند از:

$$f \left( \begin{matrix} B, L, a, L_t, a_t, \sigma_g, d_{50}, y, d_s, \\ u, u_{cr}, \rho_s, g, \rho_w, k_s \end{matrix} \right) \quad (11)$$

که در آن،  
 $B$  = عرض کانال،  $L$  = طول جان آبشکن؛  $a$  = فاصله اصلی آبشکن‌ها؛  $L_t$  = طول باله 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 آبشستگی؛  $u$  = سرعت متوسط جریان؛  $c_r$  = سرعت بحرانی؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص رسوبات؛  $\rho_w$  = جرم مخصوص آب؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $K_s$  = ضریب شکل آبشکن.

پیشتر اشاره شد که شرایط جریان به‌صورت آستانه حرکت ( $U/U_{cr} = 0.95$ ) در نظر گرفته شده است و با استفاده از منحنی شیلدز، دبی مورد استفاده با توجه به ابعاد کانال و عمق جریان محاسبه گردید ( $Q=28.5$  l/s). همچنین آبشکن‌ها در طولی قرار داده شده‌اند که جریان توسعه یافته باشد. با مشخص شدن دبی و شرایط جریان، برای محاسبه طول جریان توسعه یافته از رابطه ۷ استفاده می‌گردد که کرک‌گوز و آردیچ‌اوغلو (Kirkgoz & Ardichoghlu, 1997) آن را برای جریان در کانال‌های باز ارائه داده‌اند.

$$\frac{L}{R} = 76 - 0.0001 \frac{Re}{Fr} \quad (7)$$

که در آن،

$$L = \text{طول جریان توسعه یافته.}$$

بر اساس شرایط حاکم بر آزمایش‌ها و با استفاده از رابطه فوق، طول توسعه یافته جریان، حدود ۳/۵ متر برآورد شد. با در نظر گرفتن طول ۴ متری از ابتدای کانال و همچنین برداشت مقادیر سرعت، کارکرد این طول جهت توسعه جریان بررسی شد. برای ارزیابی دقت رابطه‌های مختلف، از رابطه‌های آماری ۸، ۹ و ۱۰ استفاده شده است. در دو رابطه ۸ و ۹ منظور از  $y_i, y_i^*$  و  $n$  به ترتیب مقادیر آزمایشگاهی، مقادیر حاصل از روابط و تعداد کل داده‌هاست. در رابطه ۱۰ نیز  $Cov(y_i^*, y_i)$  و  $\sigma_{y_i^*}$  و  $\sigma_{y_i}$  به ترتیب کوواریانس مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از روابط و انحراف معیارهای آنهاست.

با حذف پارامترهایی که در این پژوهش ثابت فرض

شده‌اند و همچنین پارامترهایی که اهمیت کمتری دارند، رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$\frac{ds}{y} = f(a_t, K_s) \quad (12)$$

که با توجه به اثر این پارامترها بر آبشستگی آبشکن‌ها، ترکیب‌های مختلف با هدف بررسی حداقل عمق آبشستگی مقایسه می‌شوند.

### نتایج و بحث

هدف از آزمایش‌ها، بررسی تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در دماغه اولین آبشکن در شکل‌های مختلف هندسی است. عمق آبشستگی موضعی در دماغه آبشکن اول از آبشکن‌های سری در زمان‌های مختلف در هر آزمایش بیش از ۵۰ بار اندازه‌گیری و تحلیل و بررسی

شد. نتایج حالت تعادل آبشستگی در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول،  $ds$  عمق آبشستگی است که در آبشکن‌های اول، دوم و سوم به ترتیب با  $ds_1$ ،  $ds_2$  و  $ds_3$  معرفی شده است. متوسط این عمق‌ها نیز با  $ds_{ave}$  مشخص شده است.  $V$  حجم حفره‌های آبشستگی و  $y$  عمق جریان است. مشاهده می‌شود که حداکثر عمق آبشستگی پیرامون آبشکن اول با شکل ساده و  $L$  شکل به یکدیگر نزدیک هستند. در آبشکن  $T$  شکل به دلیل اینکه نوک دماغه در این هندسه در راستای حرکت جریان است و شرایط گردابه‌ها در آن با حالتی که نوک دماغه عمود بر جهت جریان است متفاوت است، کمترین مقدار آبشستگی ایجاد شده است؛ این مقدار در حدود ۳۰ درصد عمق جریان، کمتر از بیشترین مقدار آبشستگی در آبشکن‌های دیگر است.

جدول ۲ - عمق و حجم آبشستگی تعادلی در آبشکن‌های سری

حجم (متر مکعب)	$ds_{ave}/y$	$ds_3/y$	$ds_2/y$	$ds_1/y$	آزمایش
۰/۰۸۷	۱/۸۲	۱/۱۸	۱/۲۸	۳	P1 (III)
۰/۰۸۹	۱/۶۶	۰/۸۲	۱/۱۱	۳/۰۵	P2 (L L L)
۰/۰۹۰	۱/۴۱	۰/۵۳	۰/۹۵	۲/۷۵	P3 (T T T)

اما مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که الگوی

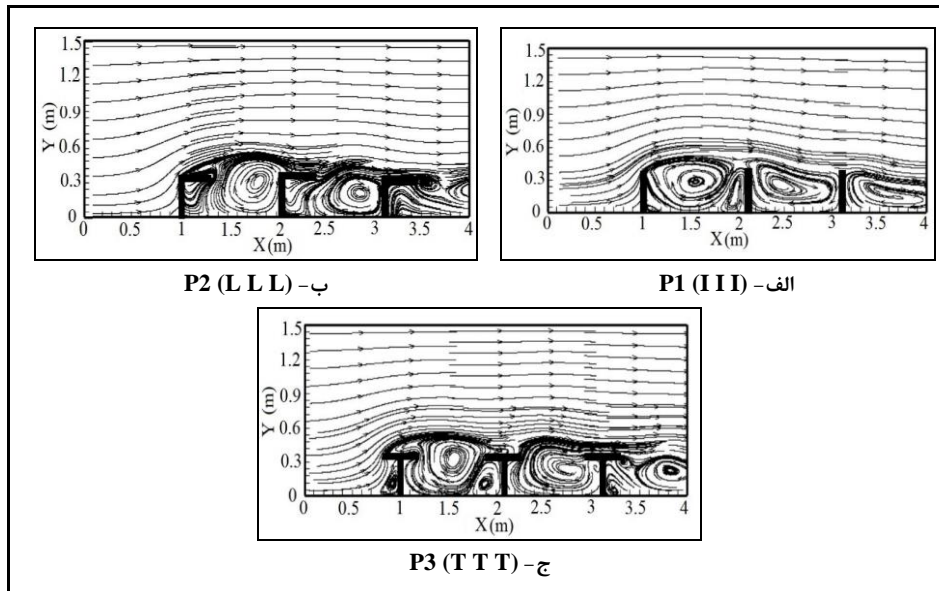
چرخشی جریان در پایین دست (در محل آبشکن دوم و سوم) آبشکن ساده، آبشکن  $L$  شکل و آبشکن  $T$  شکل متفاوت است و جریان در مجرای اصلی کانال برای آبشکن ساده سرعت بیشتری دارد، به طوری که در پایین دست آبشکن  $L$  شکل به دلیل نزدیک بودن نوک باله به آبشکن بعدی، جریان اصلی به بیرون محدوده آبشکن‌ها منحرف و گردابه‌های موجود در بین آبشکن‌ها محصور می‌شود. در این حالت، سرعت جریان در محدوده بین آبشکن‌ها و نوک باله به مراتب کمتر از حالتی است که آبشکن‌ها ساده هستند. در نتیجه، میزان آبشستگی آبشکن دوم و سوم پایین دست هندسه  $L$  شکل کمتر از میزان آبشستگی

آبشکن‌های پایین دست هندسه ساده است. اما در ارتباط با هندسه  $T$  شکل، عواملی نظیر هم‌راستا بودن نوک دماغه با جریان و نزدیکی نوک باله‌ها به یکدیگر باعث می‌شود تا عمق آبشستگی کمترین باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت استفاده از آبشکن  $L$  شکل در موقعیت دوم و سوم به ترتیب ۱۷ و ۳۶ درصد عمق جریان و در صورت استفاده از آبشکن  $T$  شکل، ۳۳ و ۶۵ درصد عمق جریان در مقایسه با آبشکن ساده عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. این کاهش برای آبشکن  $T$  شکل در مقایسه با آبشکن  $L$  شکل به ترتیب در حدود ۱۶ و ۳۰ درصد عمق جریان است. اما حجم آبشستگی در سری آبشکن  $T$  بیشتر است که دلیل آن مساحت حفره



ایجاد می‌شود. جهت درک بهتر این مطالب و شرایط جریان، الگوی چرخشی جریان برای هر سه ترکیب مورد آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

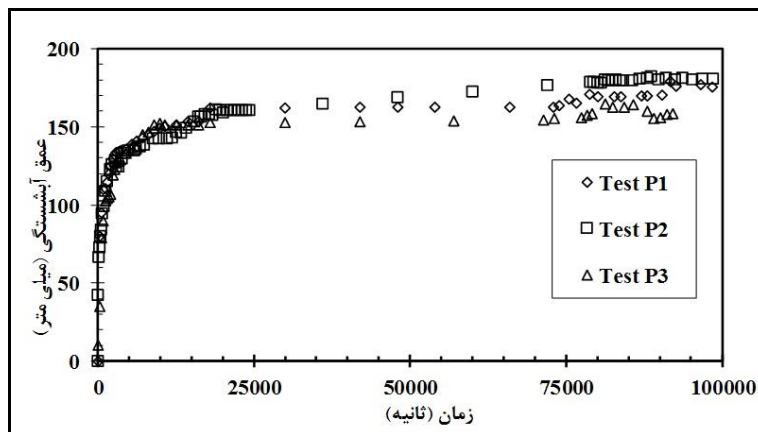
آبشستگی بزرگ‌تری است که در قسمت عمیق فرسایش در بالادست ایجاد می‌کند. این حفره به دلیل طول بزرگ‌تر گردابه جریان برگشتی است که نسبت به سایر آبشکن‌ها



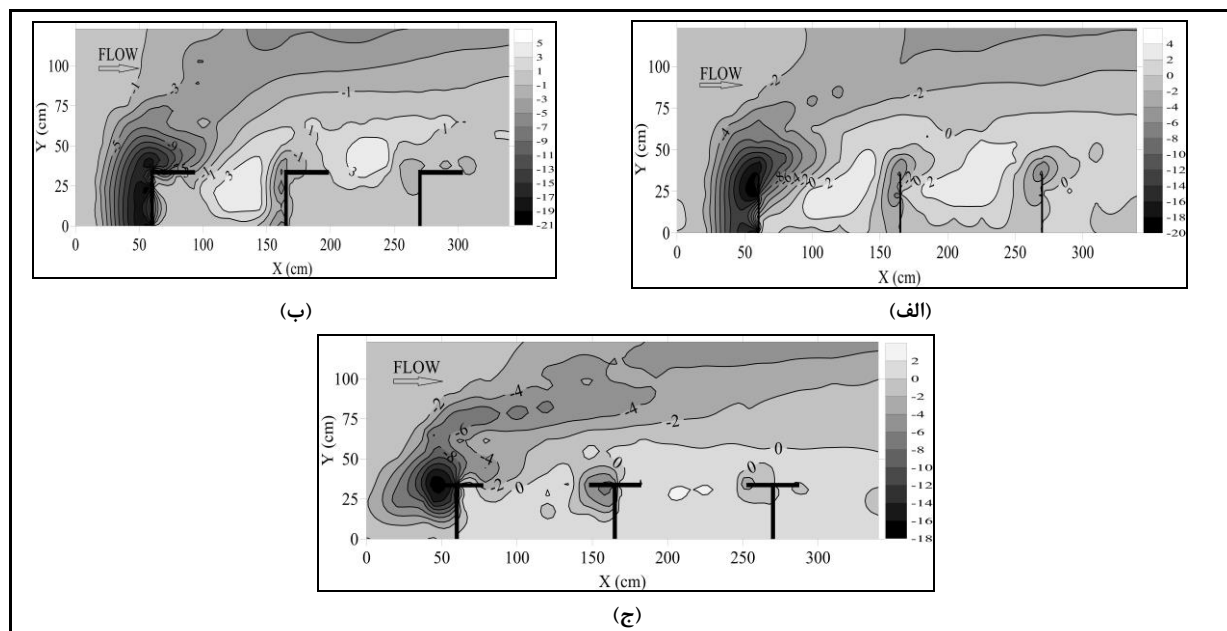
شکل ۵- الگوی چرخشی جریان اطراف سری آبشکن‌ها

بزرگ‌تری از حفره است که این مدل آبشکن به خصوص در آبشکن اول ایجاد می‌کند. در شکل ۷، پروفیل سه‌بعدی ایجادشده آبشستگی پیرامون آبشکن‌ها نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که حفره آبشستگی برای آبشکن اول ساده و برای آبشکن L شکل در بالادست به کناره‌ها رسیده است. اما برای آبشکن T شکل، هرچند ابعاد حفره در جهات دیگر از سایر آبشکن‌ها بزرگ‌تر است، کناره فرسایش نیافته است. در شکل ۸، با بی‌بعد کردن عمق آبشستگی مشخص گردید که آبشکن T شکل در ۱۰ درصد اولیه تعادل به عمقی بیش از ۹۰ درصد آبشستگی تعادلی خود می‌رسد. این مقدار برای آبشکن‌های ساده و L شکل در حدود ۸۰ است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که سرعت آبشستگی در آبشکن T شکل بیش از سرعت آبشستگی در سایر آبشکن‌هاست و این آبشکن سریع‌تر به عمق تعادلی خود نزدیک می‌شود هرچند حداکثر عمق آبشستگی آن نسبت به سایر آبشکن‌ها کمتر است.

نتایج اندازه‌گیری تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون آبشکن اول در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان‌های اولیه آزمایش تغییرات عمق آبشستگی بسیار زیاد است و تفاوت محسوسی بین شکل‌های مختلف آبشکن وجود ندارد اما با گذشت زمان و نزدیک شدن به عمق تعادلی، اختلاف عمق آبشستگی در آبشکن‌ها نمایان می‌شود که سرانجام به عمق تعادلی خود می‌رسند، و همان‌طور که اشاره شد آبشکن T شکل کمترین مقدار آبشستگی را دارد. حجم فرسایش یافته شامل حجم آبشستگی اطراف هر آبشکن و حجم آبشستگی در مسیر اصلی کانال است. در ظاهر ممکن است حجم فرسایش کل کانال در سری آبشکن‌های مختلف، تفاوت چندانی نداشته باشد اما حجم فرسایش اطراف آبشکن‌ها متفاوت است. همان‌طور که گفته شد حجم آبشستگی سری آبشکن‌های T شکل بیشتر از حجم آبشستگی سایر آبشکن‌هاست و دلیل آن مساحت

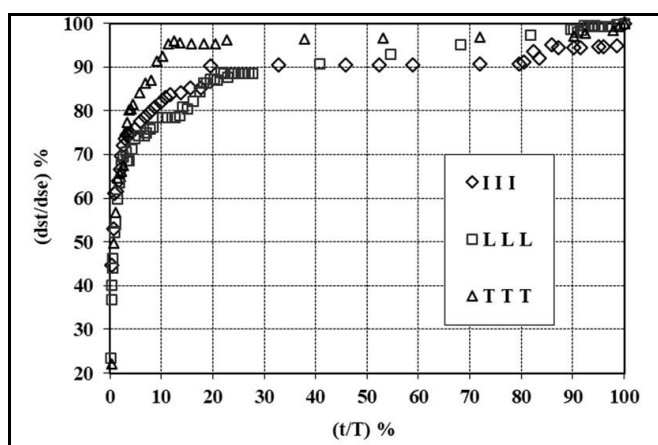


شکل ۶- تغییرات زمانی آبستگي آبشکن اول در سری آبشکن‌ها



شکل ۷- آبستگي پیرامون آبشکن‌های سری

الف) ساده، ب) L شکل و ج) T شکل



شکل ۸- درصد نسبي عمق آبستگي با توجه به درصد نسبي زمان آبستگي

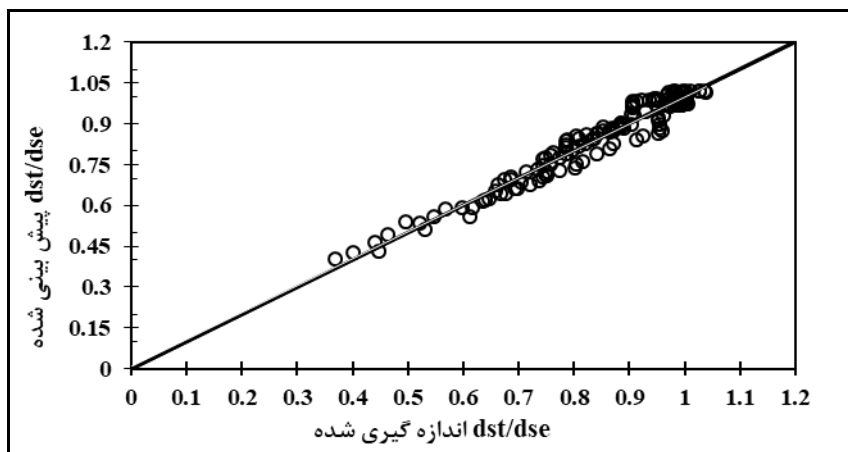
آبشکن L شکل بوده است، ضریب سایر هندسه‌ها متناسب با آن و با توجه به درصدی ثابت از آبشستگی آنها نسبت به آبشستگی آبشکن L شکل تعریف شد. با فرض مقدار ضریب شکل برابر ۱ برای آبشکن L شکل، این ضریب برای هندسه‌های دیگر که عمق آبشستگی کمتری نسبت به هندسه L شکل داشته‌اند، محاسبه شده است. این ضریب برای آبشکن ساده برابر ۰/۹، برای آبشکن L شکل برابر ۱ و برای آبشکن T شکل برابر ۰/۸ تعریف شده است. در شکل‌های ۱۰، ۱۱، و ۱۲ مقدار عمق آبشستگی با استفاده از رابطه‌هایی که دیگر محققان پیش‌بینی کرده‌اند و نیز با نتایج آزمایشگاهی و رابطه ارائه شده در تحقیق حاضر مقایسه شده است. در تمامی این پیش‌بینی‌ها پارامترهای ورودی یکسان و مربوط به تحقیق حاضر بوده است و برآورد هر رابطه برای این تحقیق در شکل آمده است. در تعدادی از این رابطه‌ها، نتایج بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. برای مقایسه دقت این رابطه‌ها، از معیارهای ارزیابی استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

بر اساس آنالیز ابعادی و تحلیل رگرسیونی و در حالت شرایط آستانه حرکت، رابطه ۱۳ با ضریب تعیین  $R^2=0.99$  برای تخمین تغییرات عمق آبشستگی با توجه به شکل آبشکن استخراج گردید. پیش‌تر گفته شد که سه سری آبشکن بررسی و آزمایش شد. اطلاعات مورد استفاده جهت ارائه رابطه، بیش از ۵۵۰ داده بوده است. شکل ۹ مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و مقادیر تخمین زده شده با استفاده از رابطه پیشنهادی ۱۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه ارائه شده به خوبی قادر به پیش‌بینی تغییرات زمانی آبشستگی است.

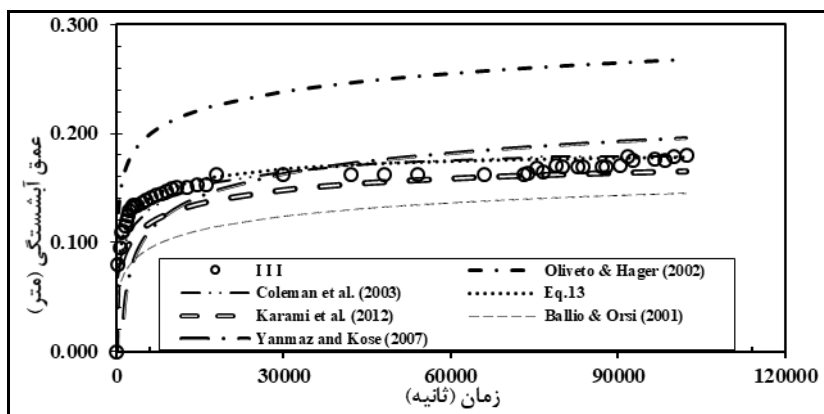
$$d_{st} / d_{se} = [1 - \exp(-3.56(t / T_e)^{0.33})] (K_s)^{-0.20} \quad (13)$$

که در آن،

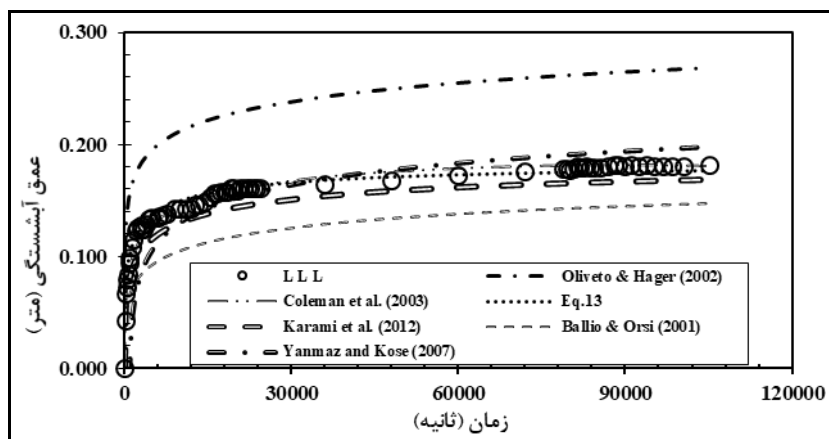
$K_s$  = ضریب شکل آبشکن‌های مختلف که با در نظر گرفتن شرایط زمان و جریان ثابت تعریف شده است. با مشاهده اینکه بیشترین مقدار آبشستگی اطراف



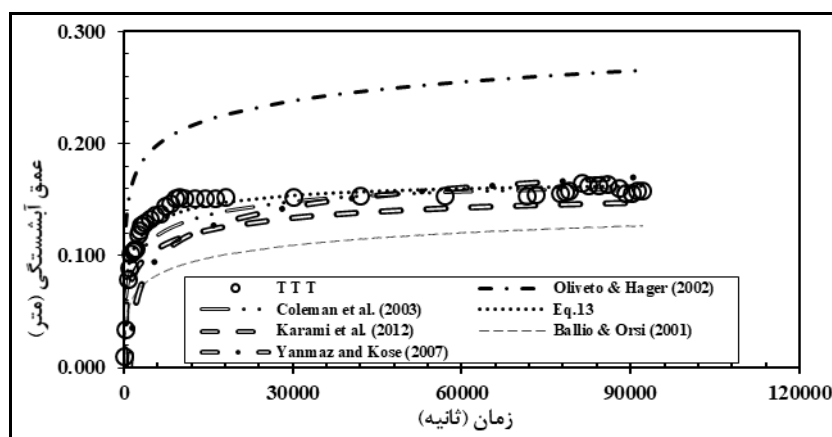
شکل ۹- مقایسه آبشستگی نسبی اندازه‌گیری شده با آبشستگی نسبی پیش‌بینی شده با رابطه پیشنهادی



شکل ۱۰- مقایسه رابطه‌های پیشنهادی محققان با نتایج آزمایشگاهی آبشکن ساده



شکل ۱۱- مقایسه رابطه‌های محققان با نتایج آزمایشگاهی آبشکن L



شکل ۱۲- مقایسه رابطه‌های محققان با نتایج آزمایشگاهی آبشکن T

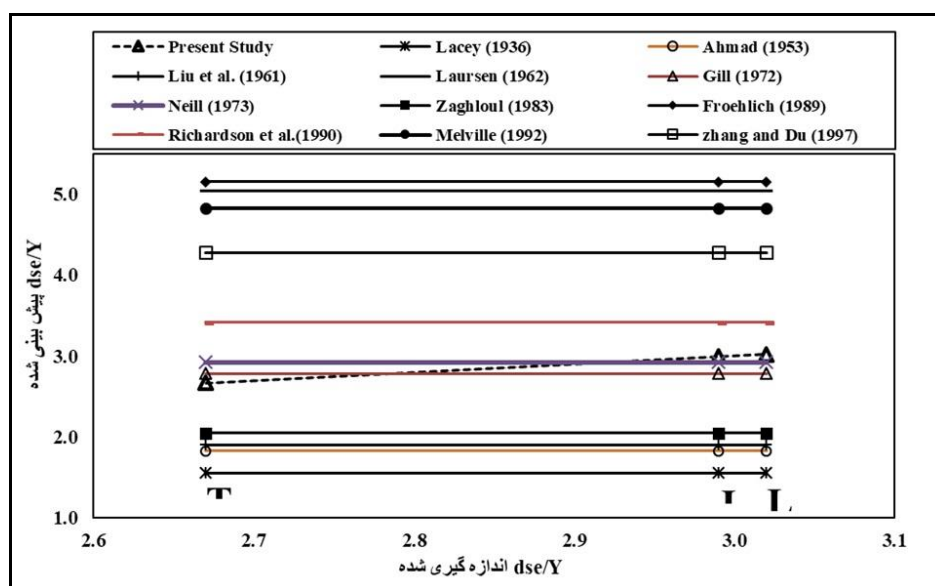
با توجه به جدول ۳، رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر با همکاران (Karami et al., 2012) با  $R^2=0.984$  به ترتیب بهترین نتایج را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ارائه داده‌اند و با بهترین پیش‌بینی همراه هستند.  $R^2=0.999$  و پس از آن رابطه کلمن و همکاران (Coleman et al., 2003) با  $R^2=0.995$  و کرمی و

جدول ۳- ارزیابی روابط مختلف ارائه شده توسط محققان در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر

R <sup>2</sup>	MAE (m)	RMSE (m)	رابطه
۰/۹۹۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	(Coleman <i>et al.</i> , 2003)
۰/۹۸۴	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	(Karami <i>et al.</i> , 2012)
۰/۷۴۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵	(Oliveto & Hager, 2002)
۰/۹۲۹	۰/۰۳۸	۰/۰۴۰	(Ballio & Orsi, 2001)
۰/۹۶۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۹	(Yanmaz & Kose, 2007)
۰/۹۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	تحقیق حاضر

شکل ۱۳ مقایسه تخمین حداکثر عمق آبشستگی نسبی اندازه‌گیری شده اطراف آبشکن اول با هندسه‌های مختلف را نسبت به حداکثر عمق پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه‌های محققان پیشین در حالت بی‌بعد نشان می‌دهد (H عمق جریان است). رابطه گیل (Gill, 1972) بهترین پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی را با ۴ درصد خطا برای آبشکن T شکل دارد. برای آبشکن‌های ساده و L شکل نیز رابطه نیل (Neill, 1973) با خطای ۳ درصد دارای بهترین مقدار پیش‌بینی شده است.

شکل ۱۳ مقایسه تخمین حداکثر عمق آبشستگی نسبی اندازه‌گیری شده اطراف آبشکن اول با هندسه‌های مختلف را نسبت به حداکثر عمق پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه‌های محققان پیشین در حالت بی‌بعد نشان می‌دهد (H عمق جریان است). رابطه گیل



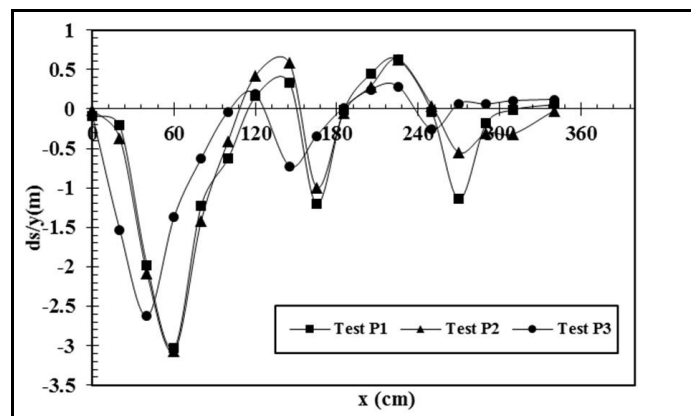
شکل ۱۳- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی رابطه‌های محققان با مشاهدات آزمایشگاهی پژوهش حاضر

در پایان، برای بررسی دقیق‌تر وضعیت بستر فرسایش‌پذیر، در محل نوک دماغه‌ها (شکل ۱۴) و همچنین در مقطع عرضی محدوده حضور آبشکن‌های سری (شکل ۱۵)، تغییرات بستر با یکدیگر مقایسه شدند. با توجه به شکل ۱۴، مقطع طولی ثابت (نوک دماغه در راستای جریان) برای مقایسه در هر سه سری آبشکن‌ها

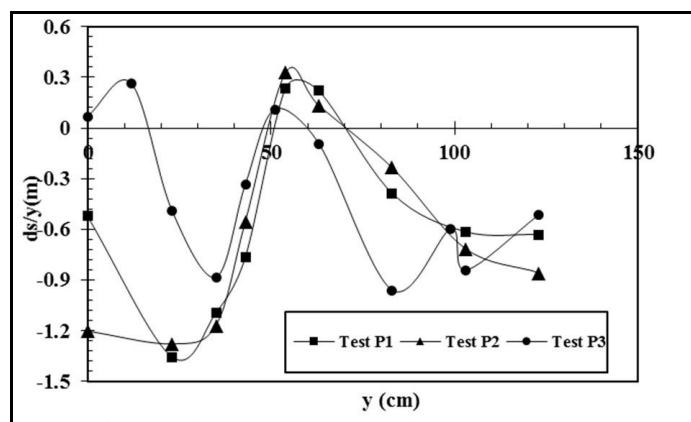
انتخاب و آبشستگی در این مقطع بررسی شد. این شکل روند کلی از محل آبشستگی و رسوب‌گذاری در مقاطع مختلف را ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که آبشستگی آبشکن‌های L شکل، در مقایسه با سایر آبشکن‌ها، بیشتر است و به بیش از سه برابر عمق جریان در محل آبشکن اول می‌رسد. در سری آبشکن‌های ساده، در محل آبشکن

آبشکن T شکل در محل نوک دماغه است. محدوده رسوب‌گذاری برای هر سه سری آبشکن در وسط کانال تقریباً یکسان است اما در آبشکن T شکل، بعد از محدوده رسوب‌گذاری در وسط کانال، یک محدوده آبشستگی تقریباً برابر با عمق جریان ایجاد شده است که محدوده حفره آبشستگی این آبشکن را تشکیل می‌دهد. با توجه به محدوده انتهایی مقطع نیز مشاهده می‌شود که عمق آبشستگی برای آبشکن L شکل بیش از عمق آبشستگی برای سایر آبشکن‌هاست که این امر می‌تواند به دلیل انتقال بیشتر جریان در جهت مخالف آبشکن‌ها با توجه به طول تنگ‌شدگی بیشتر در جهت جریان باشد.

اول مانند آبشکن L شکل بیش از سه برابر عمق جریان، آبشستگی وجود دارد. در آبشکن‌های دوم و سوم، آبشستگی آبشکن L شکل کمتر از آبشستگی آبشکن ساده است؛ دلیل آن هندسه آبشکن‌ها و الگوی جریانی است که به واسطه آن ایجاد می‌شود. برای آبشکن‌های سری T شکل نیز آبشستگی در محل آبشکن اول در حدود ۲/۷ برابر عمق جریان است که نسبت به سایر آبشکن‌ها کمتر است. در کل مقطع، مطابق آنچه مشاهده می‌شود، آبشکن T شکل کمترین عمق آبشستگی را دارد. با توجه به شکل ۱۵ نیز که مقطعی در راستای عمود بر جهت جریان است، حداکثر عمق آبشستگی برای آبشکن‌های سری ساده و L شکل عقب‌تر از نوک دماغه است در حالی که برای



شکل ۱۴- مقطع طولی توپوگرافی در محل نوک دماغه



شکل ۱۵- مقطع عرضی توپوگرافی در محل آبشکن میانی

## نتیجه‌گیری

جریان بیشتر است. متوسط عمق آبشستگی آبشکن T شکل ۲۵ درصد عمق جریان کمتر از آبشکن L شکل است اما حجم حفره و فرسایش بستر در آن بیشتر از حجم حفره و فرسایش بستر در دو نوع آبشکن دیگر است و دلیل آن ابعاد حفره‌ای است که در قسمت عمیق بالادست ایجاد کرده است. رابطه ارائه شده در این پژوهش به صورت مجزا تغییرات زمانی آبشستگی هر نوع از این سه حالت هندسی را پیش‌بینی کرده و این پیش‌بینی دارای خطای حداقلی است ( $R^2=0.999$ ,  $RMSE=0.006$ ,  $MAE=0.005$ )، که در بین روابط ارائه شده، در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، دارای بهترین نتیجه است. رابطه‌های تخمینی سایر محققان بررسی شد.

نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که بعد از رابطه‌ای که در تحقیق حاضر به دست آمده است، رابطه کلمن و همکاران (Coleman *et al.*, 2003) به طور کلی تخمین نسبتاً مناسبی ( $R^2=0.995$ ,  $RMSE=0.010$ ,  $MAE=0.007$ ) ارائه می‌دهد اما این رابطه برای آبشکن T شکل با مقداری خطا همراه است. همچنین، با مقایسه رابطه‌های تخمینی حداکثر عمق آبشستگی مشخص شد که رابطه گیل (Gill, 1972) بهترین پیش‌بینی را برای حداکثر عمق آبشستگی آبشکن T شکل با خطای ۴ درصد و رابطه نیل (Neill, 1973) بهترین پیش‌بینی را برای حداکثر عمق آبشستگی آبشکن‌های ساده و L شکل با خطای ۳ درصد دارد.

در این پژوهش آبشستگی اطراف آبشکن‌های سری با شکل‌های هندسی ساده، T و L شکل به صورت آزمایشگاهی بررسی و برای تخمین عمق آبشستگی، با توجه به تغییرات زمانی و هندسه آبشکن، رابطه‌ای ارائه گردید. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت نسبی آبشستگی برای آبشکن T شکل بیشتر است و در ۱۰ درصد زمان اولیه تعادل به بیش از ۹۰ درصد آبشستگی تعادلی می‌رسد. آبشکن‌های ساده و L شکل نیز به یکدیگر نزدیک‌اند و در ۱۵ درصد زمان اولیه به بیش از ۸۰ درصد آبشستگی تعادلی دست می‌یابند.

با بررسی فرسایش مشاهده می‌شود که بیشترین عمق آبشستگی برای آبشکن‌های سری در آبشکن اول است. عمق آبشستگی آبشکن T شکل، در مقایسه با سایر آبشکن‌ها، در شرایط یکسان در حدود ۰/۳y کمتر است. حداکثر عمق آبشستگی برای آبشکن ساده و L شکل کمی عقب‌تر از نوک دماغه است و حداکثر عمق آبشستگی برای آنها بیش از سه برابر عمق جریان است در حالی که این مقدار برای آبشکن T شکل در حدود ۲/۷ برابر است. بیشترین عمق آبشستگی در ساحل مقابل آبشکن‌ها نیز در آبشکن L شکل دیده می‌شود. اگرچه آبشکن ساده در موقعیت اول آبشستگی کمتری دارد تا آبشکن L شکل، اما متوسط عمق آبشستگی آن برای سه موقعیت مختلف آبشکن‌ها از هندسه L شکل در حدود ۱۶ درصد عمق

## مراجع

- Abbasi, A. A. and Maleknejad, M. 2012. Experimental study of the impact of direct permeable spur dike parameters and the T-shaped on the scouring around them. *Irrig. Water Eng. J.* 8, 95-107. (in Persian)
- Ahmad, M. 1953. Experiments on design and behavior of spur-dikes. *Proceedings of International Hydraulics Convention*. Minneapolis, USA.
- Ardeshir, A., Karami, H., Saneie, M., Salamatian, S. A. 2011. Investigation of temporal development of scouring around impervious spur dikes in direct channel and its prediction with artificial neural networks. *Iran-Watershed Manage. Sci. Eng.* 4(13): 39-50. (in Persian)

- Ballio, F. and Orsi, E. 2001. Time evolution of scour around bridge abutments. *Water Eng. Res.* 2(4): 243-259.
- Coleman, S. E., Lauchlan, C. S. and Melville, B. W. 2003. Clear-water scour development at bridge abutments. *J. Hydraul. Res.* 41(5): 521-531.
- Dey, S. and Barbhuiya, A. K. 2005. Time variation of scour at Abutments. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 131(1): 11-23.
- Eghbali, P., Daneshfaraz, R. and Saghebain, S. M. 2013. Simulation of temporal development of scour hole around a wing-wall abutment using gene expression programming. *Water Soil Sci.* 23(1): 177-188. (in Persian)
- Fayazbakhsh, S. 2003. Scour investigation in L-shaped groins, M. Sc. Thesis. Amirkabir University. Tehran, Iran. (in Persian)
- Froehlich, D. C. 1989. Local scour at bridge abutments. *Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering.* Aug. 14-18. New Orleans, LA, USA.
- Garde, R. Subramanya, K. S. and Nambudripad, K. D. 1961. Study of scour around spur-dikes. *J. Hydraul. Div.* 87(6): 23-37.
- Ghodsian, M. and Tehrani, S. H. 2001. Scour around groins. *Int. J. Sediment Res.* 16(1): 60-68.
- Gill, M. A. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *J. Hydraul. Div. ASCE.* 98(9): 1587-1610.
- Karami, H., Ardeshir, A., Behzadian, K. and Ghodsian, M. 2011. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes. *J. Hydraul. Res.* 49(6): 809-813.
- Karami, H., Ardeshir, A., Saneie, M. and Salamatian, S. A. 2012. Prediction of time variation of scour depth around spur dikes using neural networks. *J. Hydroinform.* 14(1):180-191.
- Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A. and Hosseini, S. H. 2014. Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. *Water Environ. J.* 28(1): 124-134.
- Kayaturk, S. Y. 2005. Scour and scour protection at bridge abutments. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering. Middle East Technical University (METU). Ankara, Turkey.
- Kirkgoz, M.S. and Ardichoghlu, M. 1997. Velocity profiles of developing and developed open channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 123(12): 1099-1015.
- Kuhnle, R. A., Alonso, C. V. and Shields, F. D. 1999. Geometry of scour holes associated with 90 spur dikes. *J. Hydraul. Eng.* 125(9): 972-978.
- Lacey, G. 1936. Discussion of stable channels in erodible material. In Lane, E. W. (Ed.) *Proceedings of the ASCE.* 237(5): 775- 779.
- Laursen, E. M. 1962. Discussion of Study of scour around spur dikes. *J. Hydraul. Div. ASCE.* 89, 225-228.
- Liu, H. K., Chang, F. M. and Skinner, M. M. 1961. *Effect of Bridge Construction on Scour and Backwater.* Colorado State University Press.
- Mehraein, M., Noorbakhsh, S. M. and Ghodsian, M. 2015. Turbulent flow structure around submerged T-shape spur dike. *Modares Civil Eng. J.* 15(3): 171-178. (in Persian)
- Mehrnahad, A. and Ghodsian, M. 2012. Experimental investigation on the effect of length of spur dike and grain size on scour around T-shaped spur dike in a 90-degree bend. *J. Iran-Water Resour. Res.* 8(2): 71-79. (in Persian)
- Melville, B. W. 1992. Local scour at bridge abutments. *J. Hydraul. Eng.* doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1992). 118: 4(615).



- Mosavi, B. S., Saneie, M., Salajegheh, A. and Motamed-Vaziri, B. 2010. Experimental investigation of groin length effect on river bank erosion reduction. *Iranian J. Watershed manage. Sci.* 4 (12): 65-68. (in Persian)
- Neill, C. R. 1973. *Guide to bridge hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Canada.
- Noorbakhsh, S. M., Vaghefi, M. and Ghodsian, M. 2013. Experimental investigation of scour pattern around submerged T-shape spur dike in straight channel. *J. Iran-Water Resour. Res.* 9(2): 52-63. (in Persian)
- Norouzi, H., Salehi-Neishabouri, S. A., Nasiri-Saleh, F. and Azarderakhsh, M. 2009. Three-dimensional numerical simulation of scour around a spur dike. *Modares Tech. Eng. J.* 36, 13-22. (in Persian)
- Oliveto, G. and Hager, W. H. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *J. Hydraul. Eng.* 128(9): 811-820.
- Pandey, M., Ahmad, Z. and Sharma, P. K. 2015. Estimation of maximum scour depth near a spur dike. *Can. J. Civil Eng.* 43(3): 270-278.
- Sadat, S. H. and Tominaga, A. 2015. Optimal Distance between pile-group and spur-dike to reduce local scour. *J. Japan Soc. Civil Eng.* 71(4): 187-192.
- Sobhan, S. A. and Kumar, S. 1999. Spacing of straight spurs in series. *J. Civil Eng. The Institution of Engineers, Bangladesh.* 27(2): 175-181.
- Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Akbari, M. 2017. Experimental investigation on 3D flow around a single T-shaped spur dike in a bend. *Period. Polytech. Civil Eng.* 61(3): 462-470.
- Yanmaz, A. M. and Kose, O. 2007. Time-wise variation of scouring at bridge abutments. *Sadhana.* 32(3): 199-213.
- Zaghloul, N. A. 1983. Local scour around spur-dikes. *J. Hydrol.* 60, 123-140.
- Zhang, Y. and Du, X. 1997. Limited scour around spur dike and the evaluation of its depth. *J. Xi'an Highway Transport. Uni.* 17(4): 56-97.
- Zhang, H., Nakagawa, H., Kawaike, K. and Yasuyuki, B. A. 2009. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *Int. J. Sediment Res.* 24(1): 33-45.

## **Experimental Study on the Effect of Spur Dike's Different Shapes and on Time Variation of Scour Depth around Them**

**Sh. Nayyer, S. Farzin\*, H. Karami and M. Rostami**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering & Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Email: Saeed.farzin@semnan.ac.ir

Received: 17 July 2017, Accepted: 22 November 2017

The river is an active natural phenomenon, which continuously changes its sides and its bed. This has caused the river course to undergo major changes over time. There are different ways to reduce erosion, one of the ways is using spur dike in sides. In this experimental study, the effect of simple L and T shapes series spur dike on time variation of scour depth around spur dike was analyzed and compared under straight channel condition. The results showed that T shape spur dike within 10% of elapsed time reaches to more than 90% of equilibrium scouring, whereas for simple and L shape spur dike within 15% of elapsed time reaches to more than 80% of equilibrium scouring or erosion. Simple and L shape spur dike had the maximum scouring depth which was found to be equivalent to 3times of the flow depth, which was created a bit behind the spur dike's nose. The scouring of T shaped spur dike was  $0.3y$  ( $y$  is flow depth) less than other shapes in first position. The results of scour depth comparison in different section around the spur dikes showed that the average of scouring value for T-shaped spur dike was  $0.4y$  and  $0.25y$  less than simple and L-shaped spur dike, respectively. Finally, an equation for calculation of time variation of scour depth due to the shape of the spur dike is proposed. Further, the experimental results of scouring depth as a result of present study was compared with results obtained by other researchers. Also maximum side erosion on the opposite shore was found to belong to L-shaped spur dike.

**Keywords:** L-Shaped Spur Dike, Scour Depth, Series Spur Dikes, Simple Spur Dike, T-Shaped Spur Dike