

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی اثر آبشکن سرسپری متقارن بر میزان آبشستگی تکیه‌گاه پل در کانال مرکب

امین ناظری^{۱*} و صمد امامقلی‌زاده^۲

چکیده

وقوع آبشستگی، یکی از عوامل تهدیدکننده پایداری تکیه‌گاه‌های پل احداث شده بر رودخانه‌هاست. برخی سازه‌ها مانند آبشکن‌ها با دورکردن جریان از تکیه‌گاه و هدایت آن به سمت محور رودخانه از شدت آبشستگی در تکیه‌گاه می‌کاهند. در پژوهش حاضر، با ساخت مدل آزمایشگاهی، اثر قرارگیری آبشکن سرسپری بر کاهش آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل بررسی شد. آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۲، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر و با استفاده از رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۱ میلی‌متر انجام شد. آبراهه اصلی با عرض ۲۰ سانتی‌متر در وسط کانال قرار داشت. آبشکن‌های T شکل با پنج طول مختلف جان و بال در سه فاصله ۰/۸L، ۱/۲L و ۱/۶L (L طول تکیه‌گاه) از تکیه‌گاه، نصب و تأثیر هر یک از این متغیرها بر آبشستگی در تکیه‌گاه بررسی شد. آزمایش‌ها در سه نسبت متفاوت سرعت متوسط جریان به سرعت بحرانی ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ تکرار شد. نتایج این پژوهش نشان داد آبشکن سرسپری به‌طور متوسط، ۷۵ درصد آبشستگی در تکیه‌گاه را کاهش می‌دهد. این نوع آبشکن در بهترین حالت از نظر ابعاد و فاصله، آبشستگی در تکیه‌گاه را ۹۱ درصد کاهش داد. کارایی آبشکن سرسپری در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه با طول جان و طول بال، معادله مستقیم و با فاصله آن از تکیه‌گاه، معادله معکوس داشت. طول جان در مقایسه با دو متغیر طول بال و فاصله، تأثیرگذاری بیشتری بر کارایی آبشکن داشت. با افزایش نسبت سرعت متوسط به سرعت بحرانی، آبشکن سرسپری، کارایی خود را همچنان حفظ می‌کند و کارایی آن کاهش زیادی نمی‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، آبشکن T شکل، تکیه‌گاه پل، کانال مرکب، مدل آزمایشگاهی.

ارجاع: ناظری ا. و امامقلی‌زاده ص. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی اثر آبشکن سرسپری متقارن بر میزان آبشستگی تکیه‌گاه پل در کانال مرکب. مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۲۹-۲۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

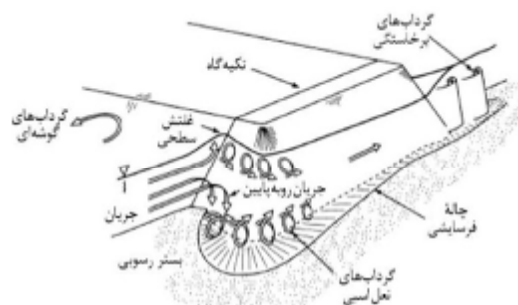
* نویسنده مسئول: aminnazeri97@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

مقدمه

پل‌ها از مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای است که برای موارد مختلف استفاده می‌شود. یکی از عوامل مهم تخریب و شکست پل‌ها وقوع آبشستگی در پایه و تکیه‌گاه آنهاست (گوگس و دوگان، ۲۰۱۰). آمارها نشان می‌دهد آبشستگی تکیه‌گاه در مقایسه با آبشستگی پایه، مشکلات بیشتری ایجاد می‌کند (هونگ و عبید، ۲۰۱۹). براساس گزارش سازمان بزرگراه‌های ایالتی آمریکا در سال ۱۹۷۳، از ۳۸۳ مورد تخریب پل، ۲۵ درصد به علت آبشستگی پایه و ۷۲ درصد به علت وقوع آبشستگی در تکیه‌گاه بوده است (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). براساس مطالعات ملویل نیز از ۱۰۸ مورد شکست پل، که در سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۸۴ در نیوزیلند رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بود. با توجه به اهمیت موضوع، جامعه تحقیقاتی، همواره به دنبال یافتن راه حل‌های علمی برای به حداقل رساندن آثار زیاد آبشستگی بر تکیه‌گاه‌های پل بوده است (الغراب، ۲۰۱۳). برای مهار آبشستگی، ابتدا باید سازوکار آبشستگی و الگوی جریان بررسی شود. تکیه‌گاه پل با ایجاد تنگ‌شدگی در مقطع رودخانه موجب افزایش سرعت متوسط و دبی در واحد عرض جریان می‌شود و بر الگوی جریان تا حد زیادی اثر می‌گذارد. جریان پایین‌رونده و گرداب اصلی در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گرداب ثانویه و گرداب برخاستگی در قسمت میانی و گوشه انتهایی تکیه‌گاه پل، باعث ایجاد فعل و انفعال پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که علت اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌هاست (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل ۱، فرایند جریان و الگوی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل نشان داده شده است.



شکل ۱- فرایند جریان و الگوی آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل (خزیمه‌نژاد، ۱۳۹۵)

از روش‌های زیادی برای کاهش میزان آبشستگی و مهار آن استفاده شده است. این روش‌ها به دو گروه کلی تقسیم می‌شود: گروه اول، افزایش پایداری بستر، مانند ریختن سنگ‌چین حفاظتی (ریپرپ) یا استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی و گابیون در اطراف تکیه‌گاه و گروه دوم، تغییر الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه پل با تغییر در هندسه تکیه‌گاه و ایجاد موانع در مسیر جریان، مانند استفاده از آبشکن محافظ، طوقه، صفحه مستغرق و گروه شمع. بررسی منابع نشان می‌دهد درباره استفاده از این روش‌ها پژوهش‌های گوناگونی انجام شده است که برای مثال می‌توان به استفاده از دیواره‌های عمودی (کاردوسو و همکاران، ۲۰۱۰)، صفحه مستغرق متصل به تکیه‌گاه (خادمی و همکاران، ۱۳۹۴)، طوقه‌های کامل و ل‌شکل (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵)، زبری‌های موضعی (شهسواری و حیدرپور، ۱۳۹۷)، شکاف در تکیه‌گاه (اسروش و همکاران، ۲۰۱۹) و دیواره‌های موازی با تکیه‌گاه (صادقی و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کرد.

در بیشتر پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام‌شده درباره روش‌های کاهش آبشستگی تکیه‌گاه‌های پل، از کانال‌هایی با مقطع مستطیلی استفاده شده است؛ در حالی که این روش برای مطالعه آبشستگی در تکیه‌گاه‌هایی مناسب است که در مجرای اصلی جریان قرار دارد و از نتایج آنها برای تکیه‌گاه‌های فرارگرفته در مقطع مرکب نمی‌توان استفاده کرد. مطالعاتی که در آنها از مقطع مرکب برای بررسی آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه استفاده شده است، محدود است.

اژدری و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از کانالی آزمایشگاهی با مقطع مرکب، تأثیر قرارگیری آبشکن سرسپری نامتقارن را بر آبشستگی تکیه‌گاه پل بررسی کردند. نتایج نشان داد آبشکن سرسپری نامتقارن به میزان زیادی، میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه را کاهش می‌دهد. سعادت‌نیا و همکاران (۱۳۹۶) تأثیر زاویه قرارگیری آبشکن ساده بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه را بررسی کردند. پژوهش‌های آنان نشان داد قرارگیری آبشکن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به ساحل، آبشستگی در تکیه‌گاه را به طور متوسط ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) آزمایش‌هایی را برای بررسی تأثیر پره‌های مستغرق بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در مقطع مرکب انجام دادند. نتایج نشان

گفتنی است، سرعت جریان در آستانه حرکت ذرات، سرعت بحرانی u_c نامیده می‌شود. معیار آستانه حرکت ذرات نیز در این پژوهش براساس نظر برخی از پژوهشگران، مشاهده شروع حرکت یک یا چند ذره در نظر گرفته می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۹۴).

در جریان‌های متلاطم، عدد رینولدز، پارامتر تأثیرگذاری نیست (شفاعی بجستان، ۱۳۹۴) و در تمامی دبی‌های مورد آزمایش نیز مقدار عدد رینولدز از ۵۰۰۰ بیشتر بوده است. عدد رینولدز را از معادله (۲) می‌توان حذف کرد. با حذف عدد رینولدز و در نظر گرفتن پارامتر $\frac{d_s}{y}$ به‌عنوان متغیر وابسته در نهایت، معادله (۴) برای حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{y} = \left(\frac{u}{u_c}, \frac{L_s}{L}, \frac{L_w}{L}, \frac{X}{L} \right) \quad (4)$$

پارامتر درصد کارایی آبشکن $Pr\%$ نیز برای مقایسه آبشستگی در تکیه‌گاه در مقایسه با آزمایش شاهد به کار می‌رود و به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$Pr\% = \frac{d_{sc} - d_s}{d_{sc}} \times 100 \quad (5)$$

که در آن، d_{sc} حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه بدون حضور آبشکن است.

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

برای انجام‌دادن آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های لازم، کانال و تجهیزات لازم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شد. کانال مورد استفاده، طول ۱۲، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر داشت. برای آرام‌کردن جریان ورودی به کانال، یک صفحه مشبک فلزی در فاصله یک‌متری از ابتدای فلوم به‌صورت عمودی نصب شد. فاصله ابتدای کانال و این صفحه نیز با استفاده از قطعات سنگی پر شد. برای قرائت دبی، یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی مدل PMAG ساخت کشور ایتالیا، روی لوله رانش نصب و استفاده شد. این دبی‌سنج، دبی عبوری از لوله رانش را با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری کرد. شکل ۲، نمای کلی مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. طول مقطع مرکب، ۶ متر بود که در فاصله ۳ تا ۹ متری از ابتدای کانال نصب شد. کانال اصلی مقطع مرکب از جنس شیشه و عرض ۲۰ و عمق ۸ سانتی‌متر بود. دو طرف کانال اصلی نیز به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، رسوبات ریزدانه یکنواخت با قطر متوسط $D_{50} = 1$ ریخته شد.

داد استفاده از پره‌های مستغرق موجب کاهش آبشستگی در پیرامون تکیه‌گاه و دورشدن حفره آبشستگی از دماغه تکیه‌گاه می‌شود. با اینکه آبشکن‌های سرسپری متقارن، یکی از رایج‌ترین انواع آبشکن است، تاکنون پژوهشی درباره بررسی تأثیر این نوع آبشکن در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در مقطع مرکب انجام نشده است؛ بنابراین، در این پژوهش، اثر این نوع آبشکن بر آبشستگی در تکیه‌گاه بررسی شد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در ایجاد پدیده آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در مقطع مرکب، پارامترهای مختلفی تأثیرگذار است؛ از جمله سرعت متوسط جریان u (m/s)، عمق جریان y (m)، عرض کانال W (m)، عرض کانال اصلی W' (m)، طول تکیه‌گاه L (m)، عرض تکیه‌گاه B (m)، ضخامت آبشکن B_s (m)، طول جان آبشکن L_s (m)، طول بال آبشکن L_w (m)، فاصله آبشکن از تکیه‌گاه X (m)، شیب مواد بستر S ، جرم مخصوص آب ρ ، جرم مخصوص رسوبات بستر ρ_s ، لزجت سینماتیکی آب ν (m²/s)، قطر متوسط ذرات بستر d_{50} (m) و شتاب گرانش g (m/s²).

با توجه به پارامترهای ذکرشده، معادله (۱) را برای حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه d_s می‌توان تعریف کرد:

$$F(d_s, u, y, W, W', L, B, B_s, L_s, L_w, X, S, \nu, \rho, \rho_s, d_{50}, g) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از روش π -باکینگهام و با انتخاب سه پارامتر ρ ، u و y به‌عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای معادله (۱) به پارامترهای بی‌بعد تبدیل می‌شود؛ که پس از ترکیب این پارامترها و حذف پارامترهای بی‌بعد ثابت معادله (۲) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{d_s}{y}, \frac{u}{\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)D_{50}}}, Re, \frac{L_s}{L}, \frac{L_w}{L}, \frac{X}{L} \right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به اینکه پارامتر $\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)D_{50}}$ تابعی از سرعت بحرانی u_c جریان است (شفاعی بجستان، ۱۳۹۴):

$$\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)D_{50}} = \frac{u_c}{2.2} \quad (3)$$

پارامتر $\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)D_{50}}$ را در معادله (۲)، با پارامتر u_c می‌توان جایگزین کرد.



شکل ۲- اجزای مختلف مدل آزمایشگاهی (پلان)

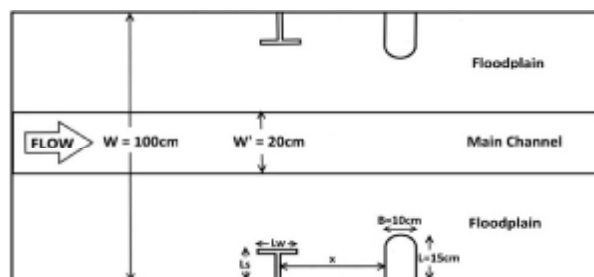
انتخاب این طول تکیه‌گاه این است که به توصیه ملویل برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان باید بین اعداد ۱ و ۲۵ باشد (ملویل، ۱۹۹۷). بر همین مبنا و با توجه به عمق جریان در دبی‌های مورد آزمایش، طول ۱۵ سانتی‌متر برای تکیه‌گاه در نظر گرفته شد. عرض کوله نیز بر مبنای عرض جاده عبوری از روی پل و در نظر گرفتن مقیاسی فرضی برای مدل انتخاب شد. آبشکن‌های مورد استفاده از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و طول متغیر ساخته شد. در شکل‌های ۳ و ۴، نمای کلی از مقطع مرکب و موقعیت قرارگیری تکیه‌گاه و آبشکن نشان داده شده است.

ابعاد تکیه‌گاه و آبشکن‌های مورد استفاده و سایر

پارامترهای مورد آزمایش

براساس پژوهش‌های ملویل (۱۹۹۷)، شکل تکیه‌گاه، نقش میزان آبشستگی نیز به ترتیب در تکیه‌گاه‌های دیواره قائم و تکیه‌گاه‌های با دماغه نیم‌گرد اتفاق می‌افتد. تکیه‌گاه‌های با دماغه نیم‌دایره در مقایسه با تکیه‌گاه‌های دیواره قائم بیشتر به کار می‌رود. برای انجام‌دادن آزمایش‌ها از تکیه‌گاه با شکل دماغه

نیم‌دایره استفاده شد. تکیه‌گاه مورد استفاده از جنس ورق گالوانیزه به طول ۱۵ سانتی‌متر و با شکل دماغه نیم‌دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. مبنای



شکل ۳- نمای کلی کانال مرکب (پلان)



شکل ۴- موقعیت قرارگیری تکیه‌گاه‌ها و آبشکن در مقطع مرکب

در سه نسبت مختلف سرعت متوسط به سرعت بحرانی u/uc ، $۰/۹$ ، $۰/۸$ و $۰/۷$ انجام شد.

ملویل (۱۹۹۷) معادله (۶) را برای محاسبه سرعت بحرانی جریان پیشنهاد کرده است:

$$u_c = 5.75 \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) u_{*c} \quad (۶)$$

که پارامتر u_{*c} نشان‌دهنده سرعت برشی بحرانی جریان و پارامتر d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی است.

براساس نظر ملویل (۱۹۹۷)، سرعت برشی بحرانی را با استفاده از معادله (۷) می‌توان محاسبه کرد:

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125(d_{50})^{0.25} \quad (۷)$$

$$IF \ 0.1mm \leq d_{50} \leq 1mm \quad (۸)$$

پس از به دست آوردن مقدار u_{*c} ، با استفاده از معادله (۹) مقدار سرعت بحرانی جریان uc محاسبه می‌شود:

$$y = 5.5cm, u_{*c} = 0.024 m/s \rightarrow u_c = 0.35m/s \quad (۹)$$

با توجه به مقدار سرعت بحرانی به دست آمده، دبی متناظر برای هر یک از نسبت‌های سرعت متوسط به سرعت بحرانی $۰/۹$ ، $۰/۸$ و $۰/۷$ محاسبه می‌شود:

$$\frac{u}{u_c} = 0.9 \rightarrow u = 0.3 m/s \rightarrow Q = 22.3 l/s \quad (۱۰)$$

$$\frac{u}{u_c} = 0.8 \rightarrow u = 0.27 m/s \rightarrow Q = 19.88 l/s \quad (۱۱)$$

$$\frac{u}{u_c} = 0.7 \rightarrow u = 0.24 m/s \rightarrow Q = 17.4 l/s \quad (۱۲)$$

پارامترهای بی‌بعد متغیر در طول آزمایش‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات پارامترهای مورد آزمایش

پارامتر	مقدار			
u/uc	$۰/۹$	$۰/۸$	$۰/۷$	
X/L	$۱/۶$	$۱/۲$	$۰/۲۸$	
Ls/L	$۰/۸$	$۰/۷$	$۰/۶$	$۰/۵$
Lw/L	متغیر در هر طول جان (ارائه شده در جدول ۲)			

جدول ۲- ابعاد هندسی بال آبشکن به‌ازای هر طول جان

Ls/L	Lw/L
$۰/۴$	$۰/۴$
$۰/۵$	$۰/۴$
$۰/۶$	$۰/۵$
$۰/۷$	$۰/۶$
$۰/۸$	$۰/۷$

با توجه مطالعات مولیناس (۱۹۹۸) درباره الگوی جریان و توزیع تنش برشی در اطراف تکیه‌گاه، حداقل فاصله آبشکن از تکیه‌گاه $۰/۸L$ (طول تکیه‌گاه) در نظر گرفته شد. با توجه به الگوی جریان در پایین دست آبشکن‌ها مشاهده شد اگر میزان فاصله آبشکن از $۱/۶L$ بیشتر شود، تأثیر آن بر سازه پایین دست کاهش می‌یابد؛ به همین علت، حداکثر فاصله آبشکن سرسپری از تکیه‌گاه نیز به $۱/۶L$ محدود شد. برای تعیین طول جان آبشکن‌های سرسپری L_s پس از مشاهده الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه، حداقل طول برابر $۰/۴L$ در نظر گرفته شد. حداکثر طول جان آبشکن محافظ با توجه به اینکه هدف از استفاده آبشکن سرسپری، باید کاهش هزینه‌های ساخت تکیه‌گاه و استفاده از سازه‌ای مقرون باشد، به $۰/۸L$ محدود شد.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی آبشکن‌های سرسپری، طول بال L_w این نوع از آبشکن است. طول بال در آبشکن‌های سرسپری با توجه به طول جان آبشکن تعیین می‌شود. با توجه به طول آبشکن‌ها حداقل طول بال برای آبشکن‌های مورد آزمایش، برابر $۰/۴L$ در نظر گرفته شد. در طول آزمایش‌ها ابتدا با ثابت بودن طول جان در هر آزمایش، طول بال به‌اندازه $۰/۱L$ افزایش می‌یابد؛ تا جایی که طول بال برابر با طول جان شود؛ سپس طول جان به‌اندازه $۰/۱L$ افزایش می‌یابد و مراحل افزایش بال تکرار می‌شود. تمام این مراحل در ۳ فاصله از تکیه‌گاه تکرار شد. با توجه به ابعاد کانال و تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌های مورد استفاده، عمق جریان در کانال اصلی و بر رسوبات برای تمامی آزمایش‌ها به ترتیب، برابر با $۱۳/۵$ و $۵/۵$ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که تنظیم عمق با استفاده از تیرک‌های سدکننده انتهای فلوم انجام شد. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد. انتخاب شرایط آب زلال به این علت است که اصولاً بیشترین عمق آبشستگی در شرایط آب زلال، بیشتر از شرایط بستر متحرک است؛ از این‌رو، برای ضریب اطمینان و سهولت بیشتر، بیشتر مطالعات آزمایشگاهی درباره آبشستگی در شرایط آب زلال انجام می‌شود (ریچاردسون و داویس، ۲۰۰۱)؛ به همین منظور، عمق‌های متناظر با هر مقدار دبی به‌گونه‌ای انتخاب شد که سرعت جریان u از سرعت بحرانی uc کمتر و شرایط آبشستگی آب زلال برقرار شود (رادکیوی، ۱۹۹۸). برای بررسی تأثیر شرایط جریان بر کارایی آبشکن، آزمایش‌ها

کمترین کارایی را داشت. کارایی آبشکن با این ابعاد در نسبت‌های سرعت جریان به سرعت بحرانی $0.7/0.8$ و $0.9/0.8$ به ترتیب، $46/3$ ، $38/2$ و $24/3$ درصد بود. به‌طور کلی، در تمامی ابعاد و فاصله‌های مورد آزمایش، آبشکن سرسپری موجب کاهش 24 تا 91 درصدی آبشستگی در تکیه‌گاه شد.

در تمامی نسبت‌های سرعت جریان به سرعت بحرانی مورد آزمایش با افزایش طول بی‌بعد آبشکن (Ls/L)، کارایی آبشکن افزایش داشت؛ به عبارت دیگر، با افزایش طول بی‌بعد آبشکن، میزان اثرگذاری آبشکن بر آبشستگی تکیه‌گاه افزایش پیدا کرده و آبشستگی در تکیه‌گاه، کاهش بیشتری نشان داد؛ به‌طور مثال، با افزایش طول بی‌بعد آبشکن از مقدار $0.4/0.8$ به $0.8/0.8$ در شرایط مختلف جریان، کارایی آبشکن به‌طور متوسط، 37 درصد افزایش داشت. علت این امر را می‌توان این موضوع دانست که آبشکن با طول بیشتر، تأثیر بیشتری بر انحراف جریان و دور کردن آن از تکیه‌گاه دارد و افزایش طول آبشکن باعث گسترش منطقه آرامش جریان در بالادست تکیه‌گاه می‌شود. نتیجه دیگری که از جدول 5 به دست می‌آید، این است که با افزایش طول بی‌بعد بال آبشکن، آبشستگی در تکیه‌گاه تعدیل شده و کارایی آبشکن افزایش داشت؛ به‌گونه‌ای که با افزایش طول بی‌بعد بال از $0.4/0.8$ ، کارایی آبشکن به‌طور متوسط، 17 درصد افزایش پیدا کرد. این کاهش آبشستگی را ناشی از تأثیر مثبت بال آبشکن بر انحراف جریان از دیواره تکیه‌گاه و جلوگیری از بازگشت جریان به سمت دیواره کانال می‌توان دانست. طول جان در مقایسه با طول بال، تأثیر بیشتری بر کارایی آبشکن داشت.

در اندازه ثابت طول بال و جان، با افزایش فاصله بی‌بعد آبشکن از تکیه‌گاه X/L ، از میزان کارایی آبشکن کاسته شده است؛ در نتیجه، عمق آبشستگی در تکیه‌گاه افزایش داشت؛ به‌عنوان مثال، یک آبشکن با ابعاد $Ls/L=0.8$ و $Lw/L=0.4$ ، که در فاصله $X/L=0.8$ از تکیه‌گاه قرار دارد، نسبت به آبشکنی با همین ابعاد، که در فاصله $1/6$ قرار گرفته است، به‌طور متوسط، 10 درصد کارایی بیشتری دارد. این موضوع را - که کارایی آبشکن با فاصله بی‌بعد آن از تکیه‌گاه، معادله معکوس دارد - می‌توان به این علت دانست که با افزایش فاصله آبشکن و تکیه‌گاه، جریانی که پس از برخورد با آبشکن منحرف شده است،

معیار زمان تعادل آبشستگی در این پژوهش، معیاری است که اتما (1980) معرفی کرده است. اتما (1980) زمان تعادل آبشستگی را مدت زمانی می‌داند که پس از گذشت آن، سرعت تغییرات آبشستگی به کمتر از 1 میلی‌متر بر ساعت برسد. پیش از آغاز آزمایش‌های اصلی، برای تعیین زمان لازم برای انجام دادن آزمایش‌ها، برای هر دبی، یک آزمایش به‌عنوان آزمایش شاهد انجام شد. در آزمایش‌های شاهد مشاهده شد زمان تعادل آبشستگی برابر با 12 ساعت است؛ به‌گونه‌ای که پس از گذشت 12 ساعت از شروع آزمایش‌ها، سرعت تغییرات عمق آبشستگی به کمتر از 1 میلی‌متر بر ساعت رسید. همچنین، پس از گذشت 90 دقیقه از شروع آزمایش، عمق آبشستگی به 85 درصد عمق آبشستگی 12 ساعته رسید؛ بنابراین، با توجه به تعداد آزمایش‌ها و برای سهولت زمان انجام دادن آزمایش‌ها 90 دقیقه در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

در جدول‌های 3 تا 5 ، درصد کاهش عمق آبشستگی در تکیه‌گاه در آزمایش‌های با حضور آبشکن سرسپری (با ابعاد و فاصله‌های مختلف) نسبت به آزمایش‌های شاهد نشان داده شده است.

نتایج ذکر شده در جدول‌های 3 تا 5 نشان می‌دهد وجود آبشکن سرسپری در بالادست در تمامی نسبت‌های سرعت متوسط به سرعت بحرانی مورد آزمایش، حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه را کاهش داد. در 72 درصد آزمایش‌های انجام شده، بیشتر از 70 درصد کاهش آبشستگی ملاحظه شد و حدود 94 درصد آزمایش‌ها بیشتر از 50 درصد کاهش آبشستگی نشان داد. در واقع، این نوع آبشکن با منحرف کردن جریان به سمت ساحل مقابل، خطوط جریان را از تکیه‌گاه و دماغه آن دور کرده و با هدایت آنها به سمت خط مرکزی کانال باعث کاهش میزان آبشستگی در تکیه‌گاه شد.

آبشکن با ابعاد $Ls/L=0.8$ و $Lw/L=0.8$ ، که در فاصله بی‌بعد $X/L=0.8$ از تکیه‌گاه قرار گرفته است، بیشترین کارایی را در کاهش آبشستگی در تکیه‌گاه داشت. کارایی آبشکن با این ابعاد در نسبت‌های سرعت جریان به سرعت بحرانی $0.7/0.8$ و $0.9/0.8$ به ترتیب، $91/1$ ، $89/9$ و $87/6$ درصد بود. آبشکن با ابعاد $Ls/L=0.4$ و $Lw/L=0.4$ ، که در فاصله بی‌بعد $X/L=1/6$ از تکیه‌گاه قرار گرفته است، نیز

نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی، کارایی آبشکن، تغییر محسوسی نیافته و درواقع، این نوع آبشکن در شرایط مختلف جریان، کارایی خود را به طور مطلوبی حفظ کرده است. اهمیت این مورد، زمانی مشخص می شود که بدانیم جریان در رودخانه ها معمولاً ثابت نیست و به علت مواردی مانند وقوع سیلاب تغییر می کند؛ در نتیجه، یک سازه محافظت کننده از تکیه گاه باید در شرایط مختلف، جریان کارایی خود را همچنان حفظ کند.

دوباره به سمت تکیه گاه بازمی گردد. این بازگشت جریان باعث برخورد بیشتر جریان با تکیه گاه و در نتیجه، کاهش کارایی آبشکن می شود. اگر فاصله به اندازه کافی زیاد شود، به طور کلی، جریان به شکل اولیه (بدون وجود آبشکن) بازسازی می شود و در عمل، از نقش آبشکن می توان صرف نظر کرد.

میانگین کارایی آبشکن سرسپری در نسبت های سرعت جریان به سرعت بحرانی $0/7$ ، $0/8$ و $0/9$ به ترتیب، برابر با 78 ، 75 و 70 درصد بود. این نکته نشان می دهد با افزایش

جدول ۳- درصد کاهش عمق آبستگي نسبت به آزمایش شاهد (کارایی آبشکن $Pr\%$) در $u/uc=0/7$

X/L	Lw/L		0/5	0/6	0/7	0/8
	0/4	0/5				
0/8	63/8	0/4				
0/8	72/8	0/5	77			
0/8	78/4	0/6	81/8	84/2		
0/8	82/3	0/7	85	87	88/4	
0/8	85/1	0/8	87/4	89	90/2	91/2
1/2	54/4	0/4				
1/2	65/7	0/5	71/1			
1/2	72/9	0/6	77/1	80/1		
1/2	77/7	0/7	81/2	83/6	85/4	
1/2	81/1	0/8	84/2	86/2	87/7	88/9
1/6	46/3	0/4				
1/6	59/7	0/5	66			
1/6	68/1	0/6	73/1	76/5		
1/6	73/8	0/7	77/9	80/7	82/9	
1/6	77/6	0/8	81/3	83/8	85/6	87

جدول ۴- درصد کاهش عمق آبستگي نسبت به آزمایش شاهد (کارایی آبشکن $Pr\%$) در $u/uc=0/8$

X/L	Lw/L		0/5	0/6	0/7	0/8
	0/4	0/5				
0/8	58/3	0/4				
0/8	68/6	0/5	73/5			
0/8	75/2	0/6	79	81/8		
0/8	79/6	0/7	82/8	85	86/7	
0/8	82/2	0/8	85/5	87/4	88/8	89/9
1/2	47/5	0/4				
1/2	60/5	0/5	66/7			
1/2	68/7	0/6	72/6	77		
1/2	74/4	0/7	78/3	81/1	83/2	
1/2	78/4	0/8	81/7	84/1	85/9	87/2
1/6	38/2	0/4				
1/6	53/5	0/5	60/8			
1/6	63/2	0/6	69	73		
1/6	69/8	0/7	74/5	77/8	80/3	
1/6	74/5	0/8	78/5	81/3	83/4	85

جدول ۵- درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد (کارایی آبشکن %Pr) در $u/uc=0/9$

X/L	Lw/L		0/4	0/5	0/6	0/7	0/8
	0/4	0/5					
0/8	0/4	0/5	48/9	67/6			
0/8	0/5	0/6	61/6	74/3	77/6		
0/8	0/6	0/7	69/6	79	81/7	83/7	
0/8	0/7	0/8	75	82/2	84/5	86/2	87/6
1/2	0/4	0/5	35/7	59/2			
1/2	0/5	0/6	51/7	67/7	71/9		
1/2	0/6	0/7	61/7	73/5	76/9	79/5	
1/2	0/7	0/8	68/6	77/6	80/5	82/7	84/4
1/6	0/4	0/5	24/3	52			
1/6	0/5	0/6	43/11	62	66/9		
1/6	0/6	0/7	54/9	68/8	72/8	75/8	
1/6	0/7	0/8	63	73/7	77/1	79/6	81/6

متقارن، آبشکن T شکل نامتقارن، دیواره موازی، پره‌های مستغرق و آبشکن ساده به ترتیب، بیشترین توانایی را در حفظ عملکرد خود در شرایط مختلف جریان بودند. پارامتر دیگری که در انتخاب روش مناسب برای کاهش آبشستگی باید مدنظر قرار گیرد، سهولت در ساخت و اجراست. بررسی‌ها نشان داد بیشترین سهولت در ساخت به ترتیب، متعلق به آبشکن ساده، دیواره موازی، آبشکن T شکل متقارن، آبشکن T شکل نامتقارن و پره‌های مستغرق بود.

جدول ۶، کارایی روش‌هایی را نشان می‌دهد که پژوهشگران مختلف برای کاهش آبشستگی در تکیه‌گاه پیشنهاد کرده‌اند. جدول ۶ نشان می‌دهد آبشکن‌های T شکل در هر دو نوع متقارن و نامتقارن آن در مقایسه با سایر روش‌های بررسی‌شده، بیشترین کارایی را داشتند. کارایی آبشکن سرسپری متقارن از نوع نامتقارن آن کمتر و تقریباً مشابه آبشکن ساده است. سازه مورد استفاده برای کاهش آبشستگی تکیه‌گاه باید کارایی لازم را در شرایط مختلف جریان داشته باشد که از این لحاظ، آبشکن T شکل

جدول ۶- حداکثر و متوسط درصد کاهش آبشستگی در روش‌های متفاوت تعدیل آبشستگی در تکیه‌گاه

روش	پژوهشگر	متوسط درصد کاهش آبشستگی	حداکثر درصد کاهش آبشستگی
آبشکن ساده	سعادت‌نیا و همکاران	۷۰	۹۰
آبشکن T شکل نامتقارن	اژدری و همکاران	۸۰	۱۰۰
آبشکن T شکل متقارن	امامقلی‌زاده	۷۵	۹۱
پره‌های مستغرق	امامقلی‌زاده و همکاران	۶۰/۱	۷۴/۷۱
دیوار موازی	کریمی و همکاران	۵۵	۱۰۰

نتیجه‌گیری

آبشستگی در تکیه‌گاه را کاهش داد. آبشکن سرسپری در بهترین حالت از نظر ابعاد و فاصله، موجب کاهش ۹۱ درصدی آبشستگی در تکیه‌گاه شد. افزایش طول جان، کارایی آبشکن سرسپری را افزایش داد. با افزایش ۱۰۰ درصدی طول بی‌بعد آبشکن، کارایی آبشکن، ۳۷ درصد افزایش یافت. افزایش طول بال نیز باعث افزایش کارایی آبشکن می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش ۱۰۰ درصدی طول بی‌بعد بال آبشکن، کارایی آبشکن، ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. در اندازه ثابت طول بال و جان، با افزایش فاصله

یکی از عمده‌ترین مشکلات پل‌هایی که تکیه‌گاه‌های آنها در بستر یک رودخانه با مقطع مرکب قرار گرفته است، آبشستگی ایجادشده در اطراف تکیه‌گاه است. نتایج این پژوهش به‌عنوان راه حل مؤثری برای این مشکل فراگیر می‌تواند بکار برود که در بسیاری از موارد موجب واردشدن آسیب‌های جبران‌ناپذیر به تکیه‌گاه‌های پل می‌شود. نتایج نشان داد در شرایط مختلف جریان، وجود آبشکن سرسپری در بالادست تکیه‌گاه به‌طور متوسط، ۷۵ درصد

موضعی تکیه‌گاه پل. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۴۱(۳): ۲۹-۴۴.

۸. کریمی م. رضائی ی. و قمشی م. ۱۳۹۴. اثر احداث دیوار موازی بر کاهش آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۳): ۱۵۱-۱۶۴.

9. Cardoso A. H. Simarro G. Le Doucen O. and Schleiss A. 2010. Sizing of riprap for spill-through abutments. Proceedings of Civil Engineers-Water Management Thomas Telford Ltd. 163(10): 499-507.
10. EL-Ghorab E. A. 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. Alexandria Journal 52(3): 467-478.
11. Ettema R. 1980. Scour at bridge piers. Report No.216, New Zeland: University of Auckland.
12. Gogus M. and Dogan A. E. 2010. Effects of collars on scour reduction at bridge abutments, international conference on Scour and Erosion, San Francisco. Pp. 997-1007.
13. Hong S. H. and Abid I. 2019. Scour around an erodible abutment with riprap apron over time. Journal of Hydraulic Engineering 145(6): 06019007.
14. Melville B. W. 1997. Pier and abutment scour-an integrated approach. J. ASCE. 123(2): 125-136.
15. Molinas A. and Kheireldin K. 1998. Shear stress Around vertical wall abutments. Journal of hydraulic engineering. ASCE. 124(8): 822-830.
16. Osroush M. Hosseini S. A. Kamanbedast A. A. and Khosrojerdi A. 2019. The effects of height and vertical position of slot on the reduction of scour hole depth around bridge abutments. Ain Shams Engineering Journal. 10: 651-659.
17. Raudkivi A. 1998. Loose boundary hydraulics. Rotterdam: AA Balkema. 496 p.
18. Richardson E. V. and Davis S. R. 2001. Evaluating Scour at Bridges. 4 Ed. Hydraulic Engineering Circular No. 18. Washington D.C: Federal Highway Administration.
19. Sadeghi F. Y. Ramezani Y. and Khozaymehzhad H. 2018. Effect of submergence ratio of parallel wall on bridge abutment scour, Alexandria Engineering Journal. 57: 2659-2665.

آبشکن از تکیه‌گاه، از میزان تأثیر آبشکن بر آبستتگی تکیه‌گاه کاسته شده و عمق آبستتگی در تکیه‌گاه افزایش یافت. با افزایش ۱۰۰ درصدی فاصله بی‌بعد آبشکن از تکیه‌گاه، کارایی آبشکن، ۱۰ درصد کاهش یافت. موارد یادشده نشان داد طول جان آبشکن در مقایسه با طول بال و فاصله آبشکن، تأثیر بیشتری بر کارایی آبشکن داشت. استفاده از این نوع آبشکن می‌تواند به‌عنوان راه حل مناسبی برای مشکل آبستتگی در تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته شود؛ اما در انتخاب این روش باید محدودیت‌های ساخت و نگهداری از آبشکن‌های سرسپری را در نظر گرفت و پس از بررسی تمامی جوانب موضوع، برای استفاده از این نوع آبشکن اقدام کرد.

منابع

۱. اژدری خ. امامقلی‌زاده ص. و رضایی ح. ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی اثر آبشکن T شکل نامتقارن در مقطع مرکب بر کاهش آبستتگی تکیه‌گاه پل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۱): ۲۹۵-۳۰۱.
۲. امامقلی‌زاده ص. و نوحانی ا. ۱۳۹۶. کاربرد پره‌های مستغرق در کاهش آبستتگی تکیه‌گاه پل با دماغه گرد. تحقیقات مهندسی آبیاری و زهکشی. ۶۸(۱۸): ۱۱۳-۱۲۸.
۳. خادمی خ. شفاعی بجستان م. و خزیمه‌نژاد ح. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نصب تیغه متصل به تکیه‌گاه پل بر آبستتگی موضعی و الگوی جریان. نشریه پژوهش‌های آب و خاک. ۲۲(۶): ۱۸۷-۲۰۱.
۴. خزیمه‌نژاد ح. قمشی م. شفاعی بجستان م. و رضائی ی. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه پل با مقطع مستطیلی. نشریه پژوهش‌های آب و خاک. ۲۲(۱): ۹۱-۱۱۰.
۵. سعادت‌نیا م. خدائشناس س. ر. صانعی م. و اسماعیلی ک. ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آبشکن بر میزان آبستتگی دماغه تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۴): ۷۶۳-۷۷۴.
۶. شفاعی بجستان م. ۱۳۹۴. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اهواز: انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۵۵۰ ص.
۷. شهنساری ح. و حیدرپور م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر زبری‌های موضعی در کنترل و کاهش آبستتگی

