

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر آبشکن محافظ بر میزان آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل در کانال آب مرکب

محمد سعادت‌نیا<sup>۱</sup>، سعیدرضا خدائشناس<sup>۲\*</sup>، مجتبی صانعی<sup>۳</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۵

### چکیده

در این تحقیق نتایج آزمایش‌های انجام شده در مدل آزمایشگاهی برای تعیین اثر آبشکن محافظ بر روی آبشستگی پایه پل کناری در یک کانال مرکب ارایه شده است. کانال مرکب به صورت متقارن و مستطیلی با عرض کانال اصلی ۲۰ سانتی‌متر و عرض سیلاب دشت‌ها ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ۷۵ آزمایش در ۳ دبی مختلف، پنج زاویه و پنج نسبت فاصله آبشکن به طول عمودی پایه کناری انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از شن با دانه‌بندی یکنواخت و در مقادیر عدد فرود بین ۰/۴۴ و ۰/۴۹ انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که فرسایش تکیه‌گاه پل هنگامی که زاویه آبشکن ۹۰ تا ۱۲۰ درجه است می‌تواند تا ۷۰٪ کاهش یابد. در انتها چند رابطه برای تخمین عمق آبشستگی ارایه شد. مقایسه با تحقیقات دیگر نشان داد که رابطه پیشنهادی این تحقیق برآورد دقیق‌تری برای برآورد عمق آبشستگی تکیه‌گاه پل ارایه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آبشستگی، آبشکن، تکیه‌گاه پل، کانال مرکب، مدل آزمایشگاهی

### مقدمه

مورد تأثیر استغراق بر میدان جریان شکل گرفته در اطراف آبشکن‌ها انجام شده است. در این تحقیقات میدان جریان اطراف این نوع آبشکن‌ها مدل‌سازی عددی شده که تشابه خوبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی را نشان داده‌اند. دی و باربویی (Dey and Barbhuiy., 2006 and 2004) و همچنین لی و همکاران (Li et al., 2006) یک گرداب اولیه تعریف کردند که مشابه با گرداب نعل اسبی پایه‌های پل بود که در امتداد با جریان پایین رونده و همراه با آن به‌عنوان عوامل اصلی ایجاد آبشستگی در آبشکن عنوان شد. فضلی و همکاران تأثیر عدد فرود جریان را بر آبشکن تیغه‌ای مستقر در قوس ۹۰ درجه، مورد مطالعه قرار داد (Fazli, et al (2008)). کاردوسو و همکاران حفاظت دماغه تکیه‌گاه و دیوارهای عمودی در برابر آبشستگی با استفاده از سنگچین<sup>۵</sup> را در شرایط آب زلال بررسی کردند (Cardoso et al., 2010). آن‌ها دریافتند که با افزایش طول تکیه‌گاه فاصله بین نقطه حداکثر آبشستگی و تکیه‌گاه افزایش یافت و فاصله عمیق‌ترین نقطه آبشستگی نزدیک ۳۰ درجه بود. صانعی و همکاران (۱۳۸۴) آزمایشاتی به منظور یافتن اثر درصد انسداد بر عمق آبشستگی ناشی از آبشکن تیغه‌ای انجام دادند. آذررخش و همکاران (۱۳۸۴) با توجه به ۴۸۱ داده آزمایشگاهی (از محققین مختلف) که در بازه‌های معینی تعریف شده بودند، رابطه‌ای را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی آبشکن در کانال ساده و مستقیم

از روش‌های کاربردی که برای سامان‌دهی سواحل رودخانه‌ها کاربرد وسیعی دارد، استفاده از آبشکن در تثبیت سواحل رودخانه‌ها می‌باشد. آبشکن دیواره‌ای است که عمود بر ساحل رودخانه یا با زاویه خاصی نسبت به آن ساخته می‌شود تا جریان را از ساحل فرسایش‌پذیر رودخانه دور کند. از آنجایی که آبشکن‌ها موجب انحراف خطوط جریان از دیواره نزدیک به سمت دیواره دور می‌شوند و این انحراف خطوط جریان همراه با ایجاد آشفتنگی در محل نصب آبشکن‌ها می‌باشد، حفره آبشستگی تشکیل شده در اطراف این نوع سازه‌ها مورد توجه خاص بوده و تحقیقات بسیاری در مورد نحوه تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی انجام شده است (Koken and Constantinescu., 2008; Elawady and Mansanori., 2000; Vaghefi et al., 2009 and 2012; Pagliara., 2015) تحقیقاتی نیز توسط کوهنل (Kuhnle., 2008 and 2013) در

- ۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
  - ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
  - ۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور
  - ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- \*- نویسنده مسئول: (Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

ثانیه انجام شد. شکل ۱ تغییرات عمق آبشستگی در دماغه پل را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل ۸۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی، طی ۲ ساعت اول روی می‌دهد. با توجه به هدف تحقیق که مقایسه نتایج آزمایش‌ها با یکدیگر در شرایط یکسان (از لحاظ مدت زمان هر آزمایش) و همچنین با توجه به تعداد زیاد آزمایش‌ها و محدودیت زمانی، مدت زمان انجام هر آزمایش ۲ ساعت انتخاب شد. میزان دبی به‌وسیله یک سرریز مثلثی واسنجی شده، اندازه‌گیری شد.

با توجه به آن که شکل نیم‌دایره پایه کناری انطباق بهتری بر خطوط جریان دارد و انسداد کم‌تری در جریان بوجود می‌آورد و آبشستگی کم‌تری را نیز در پایه ایجاد می‌کند. پایه‌های کناری پل با راس دماغه نیم‌دایره‌ای در دو ساحل رودخانه در ناحیه سیلاب دشت به صورت کاملاً قرینه در نظر گرفته شدند. طول پایه‌ها ۲۰ سانتی‌متر و عرض آن‌ها نصف طول پایه برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین شعاع دماغه نیم‌دایره‌ای ۵ سانتی‌متر شد. پس از شیب‌بندی رسوبات برای شیب ۰/۰۱، دبی تنظیم شد. توسط یک دریچه‌ی پروانه‌ای در انتهای فلوم عمق آب به تدریج کاهش داده شد تا به عمق نرمال محاسباتی برسد. عمق نرمال در سیلاب دشت‌ها ۲/۹۵، ۳/۳۴ و ۳/۶۲ سانتی‌متر و در کانال اصلی ۱۰/۹۵، ۱۱/۳۴ و ۱۱/۶۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

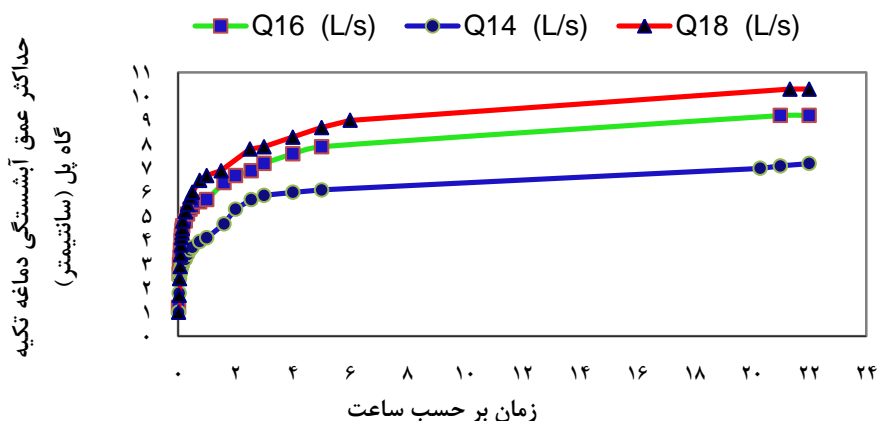
آبشستگی کناره دماغه پل در هر دو ساحل رودخانه تقریباً یکسان بود. جهت برداشت پروفیل رسوبات کف مدل در اطراف دماغه‌ها و آبشکن از عمق سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. پس از اتمام بازه زمانی ۱۲۰ دقیقه عمق آب به آرامی پایین برده شد. برای کاهش آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل از آبشکن محافظ که در دو ساحل کانال مرکب قرار گرفته بود، استفاده شد. آبشکن‌ها در بالادست تکیه‌گاه پل نصب شدند. فواصل آبشکن‌ها با تکیه‌گاه پل به صورت ضریبی از طول تکیه‌گاه پل انتخاب شدند و ۵ نسبت فاصله به طول ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲). زوایای ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه ( $\theta$ ) جهت انحراف جریان آب به‌وسیله آبشکن محافظ انتخاب شدند. فواصل آبشکن از محل اتصال آن با دیواره کانال تا محل اتصال دماغه پل با دیواره کانال محاسبه شد. هر کدام از این فواصل در دبی‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. تعداد کل آزمایشات با آبشکن محافظ برابر ۷۵ آزمایش و علاوه بر این سه آزمایش شاهد در حالت بدون آبشکن محافظ انجام شد. داده‌برداری پروفیل کف کانال در دو ساحل رودخانه به طور جداگانه پس از اتمام بازه زمانی دو ساعته انجام گرفت.

بدست آوردند. عالم و همکاران (۱۳۹۱) کاربرد طوق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی پل در کانال مرکب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که طوق می‌تواند تا ۳۴ درصد آبشستگی را کاهش دهد. عرب و زمردیان (۱۳۹۴) اثر متقابل پایه و تکیه‌گاه پل بر آبشستگی موضعی در اطراف آن‌ها را در کانال مرکب بررسی کردند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که با نزدیک شدن پایه به تکیه‌گاه، آبشستگی، افزایش می‌یابد. زارع و هنر (۱۳۹۴) اثر آبشکن بر کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل میانی در پیچ رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در همه نسبت‌های سرعت به سرعت بحرانی و همه زوایای قرارگیری آبشکن، آبشستگی در اطراف پایه پل کاهش می‌یابد، بهترین عملکرد مربوط به آبشکن عمودی است.

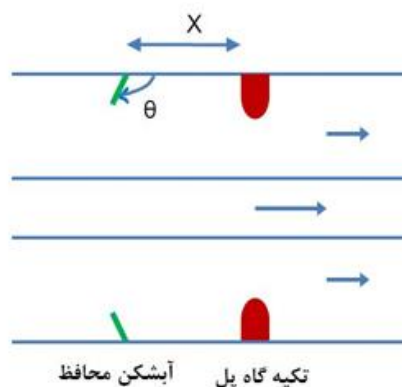
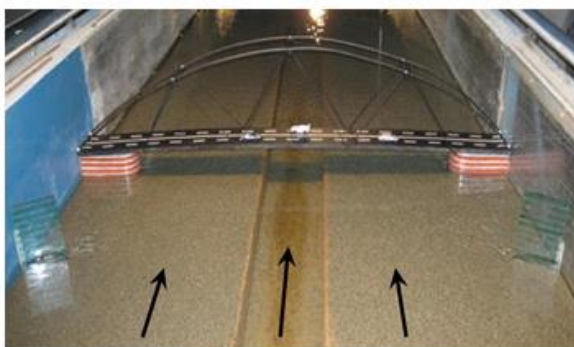
اگر چه محققین زیادی در مورد آبشستگی پایه پل و همچنین آبشکن، بصورت مجزا تحقیق کرده‌اند. اما بررسی عملکرد آبشکن روی تکیه‌گاه پل، آن هم در کانال مرکب کمتر تحقیق شده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی آبشستگی تکیه‌گاه‌های کناری پل و تأثیر فاصله و زاویه آبشکن محافظ در دو ساحل سیلاب دشت بر کاهش میزان آبشستگی اطراف پایه پل در کانال مرکب با استفاده از مدل آزمایشگاهی است. استخراج روابط جدید بین فاصله و زاویه آبشکن با تکیه‌گاه پل و مقایسه نتایج تحقیق حاضر با برخی تحقیقات گذشته، نیز در این تحقیق انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

برای تهیه مدل آزمایشگاهی، کانال مرکبی به طول ۱۰ و عرض ۱/۵ متر در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها بر روی ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت به قطر متوسط ۱ میلی‌متر و با شیب طولی ۰/۰۰۱ در کانال مرکب مستقیم انجام شد. کانال اصلی به صورت مستطیلی به عرض ۲۰ سانتی‌متر و دو سیلاب دشت به عرض ۶۵ سانتی‌متر در دو طرف کانال اصلی در نظر گرفته شد. عمق نرمال آب و همچنین دبی‌های مورد استفاده به گونه‌ای طبق روابط شیلدز<sup>۱</sup> انتخاب شد تا در بالادست سازه‌های نصب شده در سیلاب دشت فرسایش بستر متحرک بوجود نیاید و جریان یکنواخت در کانال برقرار باشد. همچنین پایین‌ترین دبی به‌صورتی انتخاب شد که در محل آبشکن و پایه پل فرسایش ایجاد شود. در بالادست کانال برای یکنواخت و آرام کردن جریان از یک-سری صفحات و بلوک‌های مشبک استفاده شد. مدت زمان هر آزمایش ۲ ساعت در نظر گرفته شد. برای دستیابی به این انتخاب سه آزمایش طولانی مدت ۲۲ ساعته با سه دبی ۱۴، ۱۶ و ۱۸ لیتر در



شکل ۱- منحنی حداکثر عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل با گذشت زمان



شکل ۲- تصویر کامل از فلوم، آبشکن محافظ و تکیه‌گاه پل

که در آن  $x$  بیان کننده مقادیر مشاهداتی و  $y$  بیان کننده مقادیر محاسبه شده از فرمول‌ها می‌باشد.  $n$  بیان کننده تعداد آزمایش‌ها است.

**تحلیل ابعادی:** در آنالیز داده‌ها در ابتدا پارامترهای مختلفی دخیل و موثر فرض می‌شوند، اما پس از آنالیز حساسیت و توصیه سایر محققین و دانشمندان در حذف یا باقی‌ماندن برخی از پارامترها، برخی از آن‌ها در تحلیل باقی می‌مانند. برخی پارامترها نیز که به صورت غیرمستقیم اثر خود را در سایر پارامترها نشان می‌دهند آن‌ها نیز به دلیل اثر تکراری، از رابطه حذف می‌شوند. با توجه به آن‌که در این تحقیق آبشکن، پایه کناری پل و هم‌چنین کانال مرکب هم‌زمان مورد مطالعه قرار گرفتند، ۱۳ پارامتر موثر در میزان آبشستگی پایه پل در نظر گرفته شدند.

$d_s = f(U_{mean}, X, \theta, \rho, \rho_s, g, S_o, d_{50}, L, h_o, B, \sigma_s, \nu)$  (۴)  
 که در آن:  $d_s$  حداکثر عمق آبشستگی جلوی تکیه‌گاه پل  
 $U_{mean}$  سرعت متوسط جریان در کانال مرکب،  $X$  فاصله آبشکن محافظ با تکیه‌گاه پل از محل اتصال آن‌ها با دیواره کانال،  $\theta$  زاویه

برای مقایسه روابط بدست آمده از این تحقیق با مقادیر آزمایشگاهی از سه پارامتر (ضریب تعیین  $R^2$ ، میانگین خطای نسبی MRE و میانگین جذر مربعات خطا RMSE) طبق معادلات ۱ تا ۳ استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \right) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n} \right]} \quad (3)$$

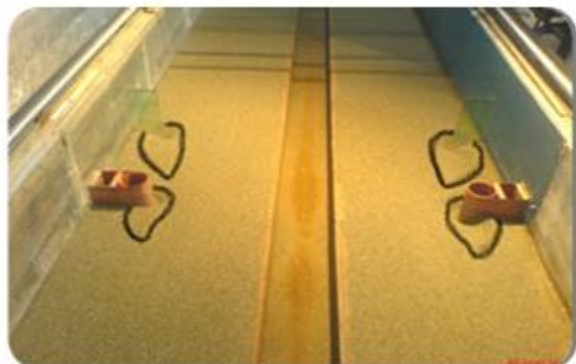
که در آن  $Re = \frac{U_{mean} \cdot y}{\nu}$  عدد رینولدز و  $Fr = \frac{U_{mean}}{\sqrt{g \cdot X}}$  نشان دهنده عدد فرود هستند. با توجه به ثابت بودن  $\rho$ ،  $\sigma_s$ ،  $S_o$  می توان آن ها را حذف کرد و رابطه ۹ را به صورت رابطه ۱۰ نوشت.

$$\frac{d_s}{X} = f \left( \frac{d_{50}}{X}, Re, \frac{y}{X}, \frac{X'}{y}, \frac{X'}{L}, Fr, \theta \right) \quad (10)$$

### نتایج و بحث

شکل ۳ و ۴ تصاویری از دو آزمایش در دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه در دو نسبت فاصله به طول (X/L) مختلف را نشان می دهند که هر کدام پس از اتمام زمان ۲ ساعت آزمایش، به تصویر کشیده شده اند. برای بررسی تغییرات لحظه ای عمق آبستنگی با زمان از پروفایلر دیجیتالی استفاده شد.

در این تحقیق کانال را به دو قسمت سیلاب دشت و کانال اصلی تقسیم کرده و برای هر کدام جداگانه سرعت و تنش برشی از روش های تئوری محاسبه شد. در جدول ۱ پارامترهای هیدرولیکی موثر در آبستنگی در کانال اصلی و سیلاب دشت آورده شده است. در کانال مرکب توزیع سرعت بسیار پیچیده است. وجود جریان های عرضی و انتقال مومنتم بین کانال اصلی و سیلاب دشت باعث شده که تاکنون روش جامعی برای تعیین توزیع سرعت ارایه نشود.



شکل ۴- دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه در نسبت فاصله به طول  $X/L = 2/5$

آبشکن محافظ با جهت جریان آب،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص رسوبات،  $g$  شتاب ثقل،  $S_o$  شیب طولی کانال مرکب،  $d_{50}$  قطر متوسط رسوبات،  $L$  طول تکیه گاه پل،  $y$  عمق جریان آب در سیلاب دشت،  $B$  عرض کل کانال مرکب،  $\sigma_s$  انحراف معیار هندسی رسوبات و  $\nu$  لزجت سینماتیک می باشد.

اگر  $X'$  فاصله نوک آبشکن محافظ با دماغه تکیه گاه پل و  $L'$  طول تصویر آبشکن محافظ بر صفحه ای فرضی عمود بر دیواره کانال، آنگاه روابط ۵ تا ۸ بدست می آیند.

$$X' = X - 0.6L \cdot \cos(\theta) \quad \theta = 30, 60, 90^\circ \quad (5)$$

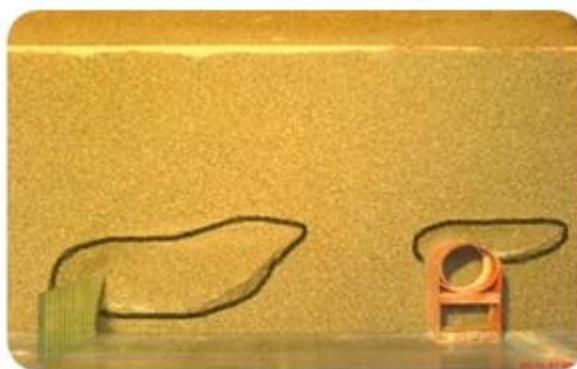
$$X' = X - 0.6L \cdot \cos(180 - \theta) \quad \theta = 120, 150^\circ \quad (6)$$

$$L' = 0.6L \cdot \sin(\theta) \quad \theta = 30, 60, 90^\circ \quad (7)$$

$$L' = 0.6L \cdot \sin(180 - \theta) \quad \theta = 120, 150^\circ \quad (8)$$

جهت انجام آنالیز ابعادی باکینگهام پارامترهای تکراری  $d_{50}$  به - عنوان پارامتر هندسی،  $Q$  به عنوان پارامتر جریان،  $\rho$  پارامتر سیال در نظر گرفته شدند و پارامترهای بی بعد بصورت رابطه ۹ بدست آمد.

$$\frac{d_s}{X} = f \left( \frac{d_{50}}{X}, S_o, \frac{U_{ave} \cdot y}{\nu} \sigma_s, \frac{y}{X}, \frac{X'}{y}, \frac{X'}{L}, \frac{U_{mean}}{\sqrt{g \cdot X}}, \theta, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad (9)$$



شکل ۳- دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه در نسبت فاصله به طول  $X = 3$

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی موثر در آبستنگی در کانال اصلی و سیلاب دشت در دبی های مختلف

شدت جریان Q(L/s)	کانال اصلی				سیلاب دشت				سرعت متوسط
	$U_m$	$U_m/U_c$	$U^* m/U_c^*$	$\tau_m/\tau_c$	$U_f$	$U_f/U_c$	$U^* f/U_c^*$	$\tau_f/\tau_c$	$U_{mean}$
۱۴	۰/۲۳۶	۰/۸۶۹	۰/۷۸۳	۰/۶۱۴	۰/۴۰۳	۰/۶۳۹	۰/۵۶۸	۰/۳۳۳	۰/۲۲۹
۱۶	۰/۲۷۸	۰/۸۷۶	۰/۷۹۰	۰/۶۲۴	۰/۴۰۹	۰/۷۳۶	۰/۶۰۳	۰/۴۲۷	۰/۲۳۹
۱۸	۰/۲۹۰	۰/۸۸۱	۰/۷۹۵	۰/۶۳۱	۰/۴۱۲	۰/۷۵۶	۰/۶۲۶	۰/۴۵۱	۰/۲۵۳
۲۰	۰/۲۹۸	۰/۸۸۴	۰/۷۹۸	۰/۶۳۷	۰/۴۱۵	۰/۷۷۰	۰/۶۴۳	۰/۴۶۸	۰/۲۷۰
۲۲	۰/۳۰۶	۰/۸۸۷	۰/۸۰۱	۰/۶۱۴	۰/۴۱۸	۰/۷۸۲	۰/۶۵۷	۰/۴۸۳	۰/۲۸۶

سرعت برشی، سرعت برشی بحرانی و سرعت متوسط در کل کانال بر حسب (m/s)، تنش برشی و تنش برشی بحرانی بر حسب (pa)

در جدول فوق  $U$ ،  $U_c$  و  $U^* = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}$  و  $U_c^* = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}$ ،  $U_{mean}$ ،  $\tau_c = \gamma R S_o$ ،  $\tau = \gamma R S_o$  به ترتیب سرعت، سرعت بحرانی،

تکیه‌گاه پل نسبت به حالت شاهد در هر دبی، آورده شده است. حالت شاهد در هر دبی بیان کننده حداکثر عمق آبستگی دماغه تکیه‌گاه پل بدون وجود آبشکن محافظ در بالادست است. تصاویری از مشاهدات این پژوهش، در ذیل آمده است.

می‌باشد. زمانی که  $U > U_c$  یا  $U^* > U^*_c$  یا  $\tau > \tau_c$  است شرایط آبستگی (بستر زنده) و زمانی که  $U < U_c$  یا  $U^* < U^*_c$  یا  $\tau < \tau_c$  است، شرایط بدون فرسایش حاکم است. در جدول ۲ با توجه به تغییرات دبی و نسبت فاصله به طول و تغییرات زاویه آبشکن بر حسب درجه، درصد کاهش عمق آبستگی

جدول ۲- درصد کاهش حداکثر عمق آبستگی تکیه‌گاه پل در حالت وجود آبشکن محافظ نسبت به آزمایشات شاهد (بدون آبشکن)

درصد کاهش آبستگی پایه سمت راست					درصد کاهش آبستگی پایه سمت راست					X/L	Q (lit/s)
زاویه آبشکن $\theta$ (درجه)					زاویه آبشکن $\theta$ (درجه)						
۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰		
۱۳/۸	۶۳/۸	۷۹/۳	۳۲/۸	۰	۱۹/۳	۷۱/۴	۸۴/۹	۲۶/۰	-۲/۵	۱	
۲۰/۷	۹۱/۴	۹۱/۴	۵۵/۲	۱۳/۸	۲۲/۷	۸۴/۹	۹۱/۶	۳۷/۸	۵/۹	۱/۵	
۱۲/۱	۹۳/۱	۹۸/۳	۷۰/۷	۱۷/۲	۲۲/۷	۸۶/۶	۹۸/۳	۵۶/۳	۱۰/۹	۲	۱۴
۵۱/۷	۹۶/۶	۹۸/۳	۷۴/۱	۱۹/۰	۱۹/۳	۹۱/۶	۹۵/۰	۸۸/۲	۷/۶	۲/۵	
۸۶/۲	۹۶/۵	۹۳/۱	۸۹/۶	۲۵/۹	۳۹/۵	۸۶/۶	۹۱/۶	۹۳/۳	۱۶/۰	۳	
۲۲/۵	۴۷/۹	۷۴/۶	۳۶/۶	-۴/۲	۱۷/۵	۷۰/۶	۸۷/۴	۳۷/۱	۲/۱	۱	
۲۲/۵	۴۵/۱	۹۱/۵	۲۶/۸	۲۵/۳	۲۳/۱	۷۰/۶	۹۱/۶	۳۸/۵	۱۸/۹	۱/۵	
۱۱/۳	۵۷/۷	۸۸/۷	۵۶/۳	۱۵/۵	۱۳/۳	۷۷/۶	۹۱/۶	۴۴/۱	۱۶/۱	۲	۱۶
۲۳/۹	۵۸/۴	۹۰/۱	۶۱/۳	۱۹/۷	۱۷/۵	۷۰/۶	۹۳/۰	۴۶/۸	۲۰/۳	۲/۵	
۳۸/۱	۶۶/۲	۹۴/۴	۶۹/۰	۱۱/۳	۳۴/۳	۶۶/۴	۸۷/۴	۶۹/۲	۲۳/۱	۳	
۱۴/۶	۴۳/۹	۴۰/۱	۲۲/۳	-۴/۵	۱۳/۸	۴۰/۰	۵۲/۵	۲۱/۳	-۱/۲	۱	
۲۳/۶	۴۰/۱	۶۱/۸	۳۲/۵	۲۲/۳	۱۸/۸	۵۷/۵	۴۳/۸	۲۱/۳	۲۰/۰	۱/۵	
۲۱/۰	۴۰/۱	۴۲/۷	۲۹/۹	۲۴/۸	۲۰/۰	۶۰/۰	۴۲/۵	۲۸/۸	۲۵/۰	۲	۱۸
۲۳/۶	۴۰/۱	۴۲/۷	۴۳/۹	۱۵/۹	۱۵/۰	۵۳/۸	۵۸/۸	۳۵/۰	۱۳/۸	۲/۵	
۲۷/۴	۴۲/۷	۵۵/۴	۳۱/۲	۱۷/۲	۲۱/۳	۵۰/۰	۵۷/۵	۳۲/۵	۱۳/۸	۳	

یکسان عملکرد آبشکن محافظ با زاویه ۱۲۰ درجه به مراتب بهتر و بالاتر از آبشکن ۶۰ درجه است، دلیل این امر دافع بودن آبشکن ۱۲۰ درجه است، با عنایت به این که در زوایای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه، نوک آبشکن در خلاف جهت جریان آب می‌باشد، بنابراین در بالادست آبشکن محافظ در ناحیه بین دیواره کانال و آبشکن (سمت راست کانال) جریان چرخشی ساعت‌گردی ایجاد می‌شود که به انحراف جریان به سمت مرکز کانال موثر است. این جریان چرخشی ساعت-گرد در پایین‌دست آبشکن محافظ دافع (زوایای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه) به صورت ضعیف‌تری برقرار است که بیش‌تر در جهت رسوب‌گذاری در پشت آبشکن محافظ (بین تکیه‌گاه پل و آبشکن) و کاهش انرژی مخرب جریان موثر است. مقادیر رسوب‌گذاری شده در بین دو سازه برابر با میزان آبستگی اطراف دماغه آبشکن محافظ می‌باشد، زیرا در بالادست کانال رسوبات متحرک نیستند.

در زاویه ۹۰ درجه بهترین عملکرد در کاهش آبستگی دماغه تکیه‌گاه پل، توسط آبشکن محافظ مشاهده شد. این نتیجه با نتیجه

در نیمی از آزمایش‌های انجام شده، بیش از ۵۰ درصد کاهش آبستگی ملاحظه شد و حدود ۲۸ درصد از آزمایش‌ها بیش از ۷۰ درصد کاهش آبستگی نشان دادند که با توجه به ضرورت محافظت از آبستگی پل‌ها، نتایج مناسبی به حساب می‌آید.

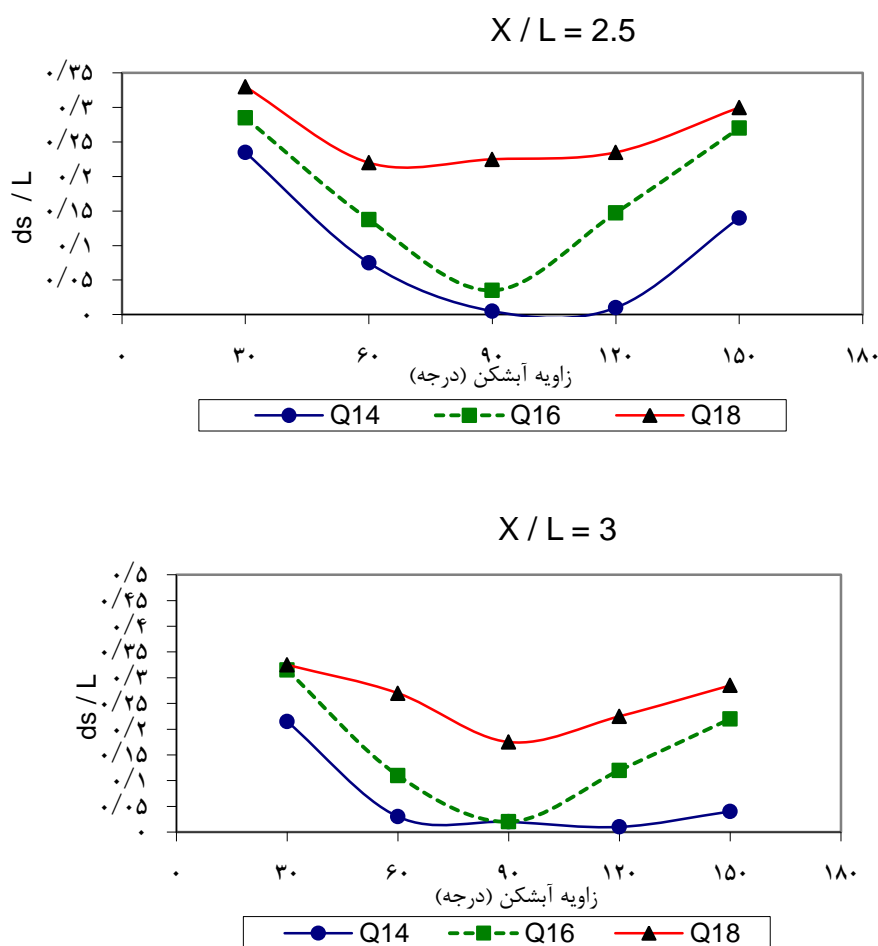
زوایای ۳۰ و ۱۵۰ درجه، عملکرد نامناسبی نسبت به سایر زوایا داشتند. در زوایای ۳۰ و ۱۵۰ درجه با افزایش نسبت  $X/L$  عملکرد آبشکن‌ها در جهت کاهش حداکثر عمق آبستگی تکیه‌گاه پل بود. علت این امر آن است که در فواصل نزدیک خطوط جریان منحرف شده توسط آبشکن محافظ، فرصت کافی برای دور شدن از تکیه‌گاه پل را نداشته و در نتیجه حتی باعث افزایش آبستگی دماغه تکیه‌گاه پل می‌شوند. با توجه به برابر بودن درصد تنگ‌شدگی، زوایای ۶۰ و ۱۲۰ درجه، عملکرد بالاتری نسبت به زوایای ۳۰ و ۱۵۰ درجه را نشان دادند. دلیل این امر توان بیش‌تر این دو زاویه در دور کردن خطوط جریان از تکیه‌گاه پل است. افزایش درصد تنگ‌شدگی در این عملکرد نقش موثری ایفا کرده است. بین دو زاویه ۶۰ و ۱۲۰ درجه در شرایط

افتاد. یکی از علل این امر در فاصله ذکر شده، امکان ایجاد یک جریان چرخشی کامل بین تکیه‌گاه پل و آبشکن محافظ در کنار ساحل کانال می‌باشد.

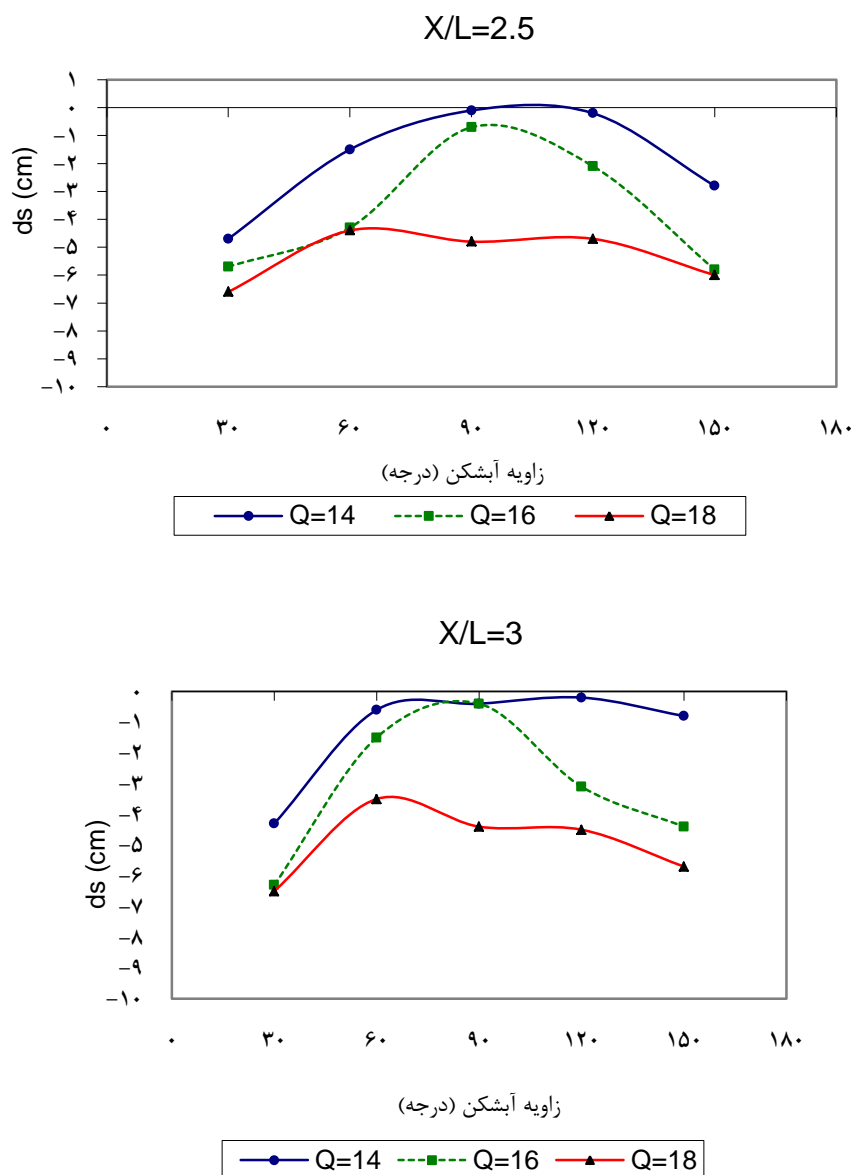
با افزایش زاویه از ۳۰ به ۹۰ درجه، حداکثر عمق آبستگي آبشکن محافظ افزایش یافت و بیش‌ترین آبستگي آبشکن در زاویه ۹۰ درجه رخ داد. اما با افزایش زاویه از ۹۰ به ۱۵۰ درجه، آبستگي آبشکن کاهش نشان داد. علت افزایش آبستگي در زاویه ۹۰ درجه نسبت به سایر زوایا به خاطر افزایش درصد تنگ شدگی جریان در کانال و نیز برخورد عمود جریان آب با آبشکن است که خطوط جریان نزدیک ساحل کانال را با یک مانع عمود مواجه کرد. البته در زاویه ۹۰ درجه آبستگي تکیه‌گاه پل در کم‌ترین مقدار خود قرار داشت، که این به علت انحراف جریان آب توسط آبشکن محافظ در این زاویه بود. در یک زاویه ثابت، حداکثر عمق آبستگي آبشکن با افزایش  $X/L$ ، به صورت اندک افزایش یافت.

زارع و هنر (۱۳۹۴) هم‌خوانی داشت (اگر چه آزمایشات ایشان در مورد پایه میانی در کانال ساده بود). هم‌چنین بیش‌ترین آبستگي آبشکن‌ها مربوط به همین زاویه است. درصد تنگ شدگی کانال در این زاویه توسط آبشکن ۱۶ درصد بود که نسبت به زوایای ۶۰ و ۱۲۰ درجه فقط ۱/۵ درصد افزایش تنگ شدگی داشت اما عملکرد مناسبی از خود نشان داد (شکل ۵ و ۶).

همان‌طور که آورده شد، در زوایای ۳۰ و ۶۰ و ۱۵۰ با افزایش  $X/L$  (یعنی افزایش نسبت‌ها از ۱ تا ۳)، راندمان آبشکن در جهت کاهش حداکثر عمق آبستگي دماغه تکیه‌گاه پل، رو به افزایش می‌باشد و این روند در تمام دبی‌ها (۱۴، ۱۶ و ۱۸ لیتر بر ثانیه) برقرار بود. در زوایای ۹۰ و ۱۲۰ درجه در دبی ۱۴ لیتر بر ثانیه تقریباً در  $X/L=2$  بهترین عملکرد مشاهده شد. ولی با افزایش دبی، بهترین عملکرد به فواصل بیش‌تر انتقال یافت به گونه‌ای که در دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه تقریباً در  $X/L=2/5$  در دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه در  $X/L=3$  اتفاق



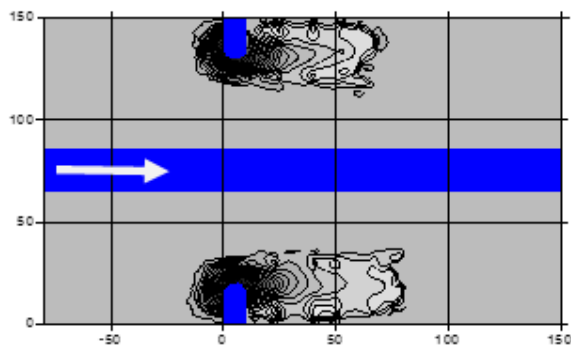
شکل ۵- تغییرات حداکثر عمق آبستگي تکیه‌گاه پل با تغییرات زاویه آبشکن در دو مقدار  $X/L$  (تکیه‌گاه چپ)



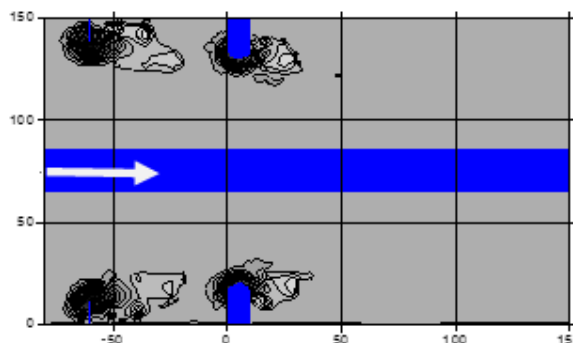
شکل ۶- اثر زاویه و فاصله آبشکن محافظ بر تغییرات حداکثر عمق آبشستگی آبشکن محافظ (تکیه‌گاه چپ)

هر کدام از شبکه‌های رسم شده ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر داشتند. ناحیه تیره‌تر اطراف دماغه تکیه‌گاه پل یا آبشکن محافظ بیان‌کننده حفره آبشستگی و ناحیه روشن‌تر بیان‌کننده محل رسوب‌گذاری در پایین‌دست تکیه‌گاه یا آبشکن محافظ است. تحلیل تصاویر نشان می‌دهد که وجود آبشکن تأثیر قابل توجهی بر میزان آبشستگی پایه‌های پل داشت.

حجم و ابعاد هندسی محل آبشستگی اعم از گودال آبشستگی و ناحیه رسوب‌گذاری شده در این تحقیق توسط نرم‌افزار سورفر<sup>۱</sup> با توجه به تعداد زیاد نقاط هندسی ورودی و نیز تنظیم شبکه‌بندی نرم‌افزار، با دقت بالا بدست آمد که در شکل ۷ و ۸ دو نمونه از آن دیده می‌شوند. نکاتی که در مورد تصاویر خروجی نرم‌افزار سورفر در شکل‌های ۷ و ۸ لازم به ذکرند عبارتند از: نوار رنگی مرکزی هر کدام از این تصاویر بیان‌کننده کانال اصلی می‌باشد.



شکل ۸- آبشستگی تکیه گاه پل شاهد (Q=18 lit/s)



شکل ۷- آبشستگی تکیه گاه پل با آبشکن محافظ (X/L=3 و  $\theta=90$  و Q=18 lit/s)

بی‌بعد حاکم با استفاده از نرم‌افزار SPSS بدست آمدند. برای بدست آوردن این روابط، ابتدا ۷۰ درصد داده‌ها به روش تصادفی انتخاب شدند و روابط پیشنهادی جدول ۳ بدست آمد.

در جدول ۳ روابط استخراج شده از داده‌های آزمایشگاهی برای دو حالت با حضور آبشکن محافظ و دیگری بدون وجود آبشکن محافظ، برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی تکیه گاه پل آورده شده است. روابط جدول ۳ با استفاده از رگرسیون چندمتغیره و با توجه به اعداد

جدول ۳- روابط پیشنهادی این تحقیق برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل در دو حالت همراه با آبشکن و بدون آبشکن محافظ

شماره رابطه	زاویه آبشکن محافظ بر حسب درجه ( $\theta$ )	رابطه پیشنهادی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل	میانگین خطای نسبی (%)	RMSE	$R^2$
۱	۹۰	$\frac{d_s}{X} = 2.14 \left( \frac{X'}{L'} \right)^{30.19} (Fr)^{1.052} \left( \frac{y}{X} \right)^{4.23}$	۳۰/۷	۰/۰۱۶	۰/۹۶
۲	برای تمامی زوایای آبشکن محافظ	$\frac{d_s}{X} = 0.0101 (Re)^{0.817} (Fr_1)^{2.446} (f(\theta))^{-1.297}$ $Re = \frac{U_{mean} \cdot y}{\nu}$ $Fr_1 = \frac{U_{mean}}{\sqrt{g \cdot X}}$ $f(\theta) = 0.586 + 0.0046(\theta)$	۱۰/۲	۰/۰۴۲	۰/۸۳
۳	بدون وجود آبشکن محافظ (حالت شاهد)	$\frac{d_s^* + y}{y} = 0.992 (Re)^{0.298} (Fr_2)^{1.777}$ $Re = \frac{U_{mean} \cdot y}{\nu}$ $Fr_2 = \frac{U_{mean}}{\sqrt{g \cdot y}}$	۲/۸	۰/۰۰۳	۰/۹۸

دارد. البته برای مقایسه این روابط از داده‌های آزمایشگاهی همین تحقیق استفاده شد.

$\sigma_g$  انحراف معیار دانه‌بندی رسوبات -  $k\theta$  ضریب امتداد تکیه‌گاه پل -  $k_s$  ضریب شکل تکیه‌گاه پل.  $u_c$  سرعت بحرانی جریان -  $h_o$  عمق جریان یکنواخت در بالادست تکیه‌گاه پل،  $L$  طول عمودی تکیه‌گاه یا آبشکن -  $d_s$  حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه پل  $K_d$ ،  $K_t$ ،  $K_r$  ضرایبی که از آیین‌نامه استاندارد آبشستگی پل (۱۳۸۴) بدست می‌آیند.

برای صحت‌سنجی روابط جدول ۳، از ۳۰ درصد سایر داده‌ها که قبلاً در ایجاد روابط استفاده نشده بودند استفاده شد.

شکل ۹ مقایسه نتایج صحت‌سنجی روابط ۲ و ۳ از جدول ۳ را نشان می‌دهد. حاکی از دقت بهتر رابطه ۳ است. رابطه شماره ۳ ارایه شده در جدول ۳ که مقدار آبشستگی در پایه بدون محافظ را نتیجه می‌دهد، با روابط محققین دیگر مقایسه شد که در جدول شماره ۴ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی این تحقیق عملکرد بهتری نسبت به سایر روابط



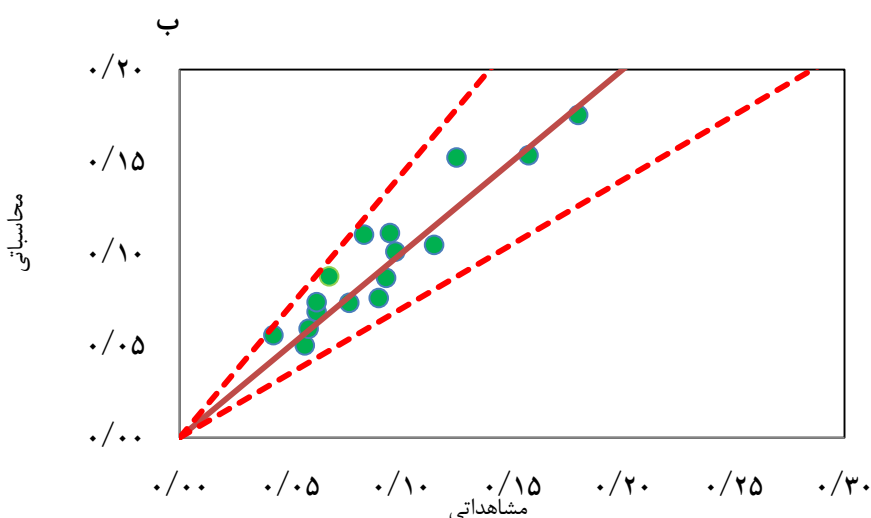
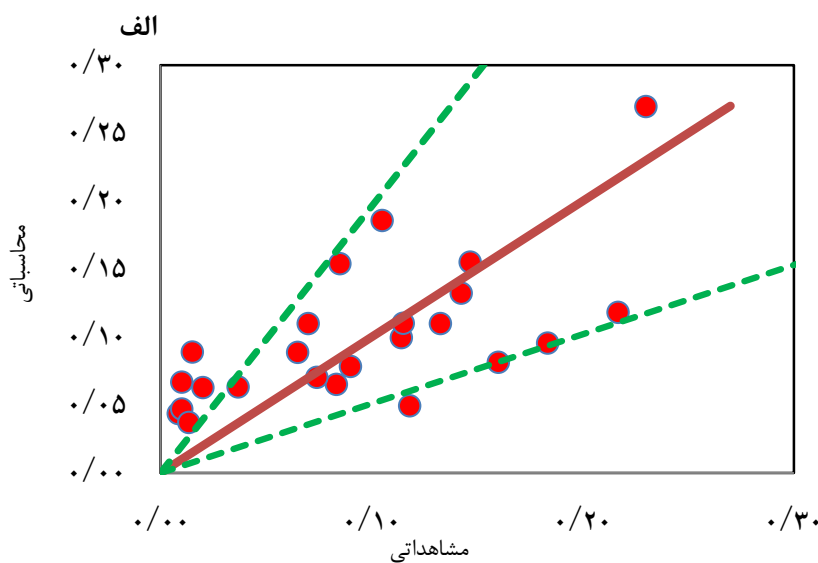
بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد و در حدود ۲۸ درصد از آزمایش‌ها، میزان کاهش آبشستگی بیش از ۷۰ درصد را نشان داد. بهترین عملکرد در کاهش آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل هنگامی بوجود آمد که زاویه آبشکن محافظ نسبت به ساحل ۹۰ درجه بود. میزان کاهش آبشستگی در این زاویه در اکثر حالات بیش از ۹۰٪ را نشان داد.

در زاویه ۳۰ درجه آبشکن محافظ کم‌ترین تأثیر را بر کاهش آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل نشان داد. حداکثر عمق آبشستگی آبشکن محافظ در زاویه ۹۰ درجه اتفاق افتاد.

نکته قابل توجه در مورد رابطه آیین‌نامه استاندارد آبشستگی پل (۱۳۸۴) آن است که این رابطه به پارامترهای بیش‌تری نیاز دارد. افزایش تعداد پارامترهای مورد نیاز یک معادله استفاده از آن را محدود می‌کند چون دسترسی به مقدار دقیق هر پارامتر مشکل خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر آبشکن محافظ جهت کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل در کانال مرکب بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در نیمی از آزمایش‌ها، آبشکن محافظ، آبشستگی تکیه‌گاه پل را



شکل ۹- مقایسه نتایج صحت‌سنجی روابط بدست آمده و نتایج آزمایشگاهی الف- معادله ۳ جدول ۳ ب- معادله ۲ جدول ۳

جدول ۴- مقایسه رابطه پیشنهادی با سایر روابط دانشمندان برای محاسبه حداکثر عمق آبستتگی دماغه تکیه‌گاه پل در حالت شاهد

نام محقق	رابطه پیشنهادی	میانگین خطای نسبی MRE (%)	RMSE	R <sup>2</sup>
( Froehlich., 1989)	$d_s / h_o = 0.78 k_s k_\theta (L / h_o)^{0.63} Fr^{1.16} (h_o / d_{50})^{0.43} \sigma_g^{-1.87} + 1$ $\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0.5}$ $k_\theta = \left(\frac{\theta_a}{90}\right)^{0.13}$ $Fr = \frac{u_o}{\sqrt{g \cdot h_o}}$	۲۹/۲	۰/۰۳۰	۰/۹۸
( Dey and Barbhuiy., 2004)	$d_s / L = 5.16 k_s (h_o / L)^{0.18} (u_c \sqrt{\Delta g L})^{0.26}$ $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	۴۹۴/۷	۰/۳۹۵	۰/۸۵
( Melville., 1992)	$d_s = 2k_s^* k_\theta^* \sqrt{h_o L}$	۵۵/۲	۰/۰۴۴	۰/۸۶
آیین‌نامه استاندارد آبستتگی پل ( ۱۳۸۴)	$d_s = K_{yL} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_S \cdot K_\theta \cdot K_G \cdot K_t$	۱۸/۲	۰/۰۱۴	۰/۹۷
رابطه پیشنهادی این تحقیق	$\frac{d_s^* + y}{y} = 0.992 (Re)^{0.298} (Fr_2)^{1.777}$	۲/۸	۰/۰۰۳	۰/۹۸

B عرض کل کانال مرکب  
 U<sub>mean</sub> سرعت متوسط کانال  
 d<sub>s</sub> حداکثر عمق آبستتگی جلوی تکیه‌گاه پل  
 d<sub>s</sub>\* حداکثر عمق آبستتگی تکیه‌گاه پل در حالت شاهد  
 X' فاصله نوک آبشکن محافظ با دماغه تکیه‌گاه پل

رابطه ریاضی برای تعیین عمق آبستتگی در دماغه تکیه‌گاه پل در حالت با آبشکن محافظ و بدون آبشکن محافظ با رگرسیون چندمتغیره بدست آمد. این رابطه در حالت بدون آبشکن محافظ با روابط ارائه شده به‌وسیله سایر محققین مقایسه شد، که جواب‌های بهتری را ارائه داد.

برخی محدودیت‌های آزمایشگاهی نظیر زمان رسیدن به آبستتگی نهایی، دقت وسایل آزمایشگاهی، تعداد آزمایش‌ها از نظر دبی، اندازه رسوب، اندازه کانال... اقتضا می‌کند که آزمایشات بیش‌تری برای رسیدن به نتایج کامل‌تر انجام شود.

### منابع

آذردرخش، م.، قدسیان، م.، نوروزی، ح. ر. ۱۳۸۴. ارزیابی روش‌های برآورد حداکثر عمق آبستتگی حول آبشکن‌ها. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

زارع، م.، هنر، ت. ۱۳۹۴. اثر آبشکن بر کاهش عمق آبستتگی اطراف پایه پل‌ها در پیچ رودخانه‌ها. مجله علوم آب و خاک. ۱۹. ۷۴: ۱۶۷-۱۹۲

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی. ۱۳۸۴. آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی نشریه ۳۰۲. دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبستتگی پل.

صانعی، م.، بنی‌هاشمی، م.ع.، قربان‌خانی، ح. ۱۳۸۴. بررسی آزمایشگاهی اثر تنگ‌شدگی و زاویه در کاهش آبستتگی اولین آبشکن. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

عالم، ز.، قمشی، م. محمدی، س. ۱۳۹۱. کاربرد طوق در کاهش آبستتگی تکیه‌گاه مستطیلی پل در کانال مرکب، نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳. ۱۰: ۲۹-۴۱

### فهرست علائم

- Q دبی جریان در کانال مرکب
- X فاصله آبشکن محافظ با تکیه‌گاه پل
- L طول تکیه‌گاه پل
- L' طول تصویر آبشکن محافظ
- L' بر صفحه‌ای فرضی عمود بر دیواره کانال
- θ زاویه آبشکن محافظ با جهت جریان آب
- ρ جرم مخصوص آب
- ρ<sub>s</sub> جرم مخصوص رسوبات
- g شتاب جاذبه زمین
- S<sub>o</sub> شیب طولی کانال مرکب
- D<sub>50</sub> قطر متوسط رسوبات
- σ<sub>s</sub> انحراف معیار هندسی رسوبات
- y عمق جریان آب در سیلاب‌دشت

- investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stages of the erosion and deposition process. *Water resources research*. 44.8: 1-16
- Kuhnle, R.A and Alonso, C.V. 2013. Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed. *International Journal of Sediment Research* 28.3: 349-357.
- Kuhnle, R.A., Alonso, C.V and Jia, Y.J. 2008. Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128.12: 1087-1093.
- Li, H., Kuhnle, R.A and Barkdoll, B.D. 2006. Countermeasures Against Scour At Abutments". Report No. 49, USDA Agricultural Research Service and National Sedimentation Laboratory, 163P.
- Melville, B.W. 1992. Large Scour at Bridge Abutment. *Journal of Hydraulic Engineering* 118.4: 615-631.
- Pagliara, S., Hassanabadi, L and Mahmoudi Kurdistani, S. 2015. Clear water scour downstream of log deflectors in horizontal channels. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*. 141.9: 223-235
- Vaghefi, M., Ghodsian, M and Salehi Neyshabouri, S.A.A. 2012. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138.5: 471-474.
- Vaghefi, M and Ghodsian, M. 2009. Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90° channel bend. *Arabian Journal of Science Engineering*. 34.2: 337-348.
- عرب م.، زمردیان، م.ع. ۱۳۹۴ اثر متقابل پایه و تکیه‌گاه پل بر آبشستگی موضعی در اطراف آن‌ها، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*. ۱. ۳۹: ۱۳۱-۱۴۲
- Cardoso, A.H., Simarro, G., Fael, C.J. 2010. Toe protection for spill-through and vertical-wall abutments. *Journal of Hydraulic Research*. 48.4: 491-498.
- Dey, S., Barbhuiya, A.K. 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130.7: 622-634
- Dey, S and Barbhuiya, A.K. 2006. Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical wall abutment. *Flow Measurement Instrument*, 17.1: 13-21.
- Elawady, E and Mansanori, M. 2000. Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed. *Annual Journal of Hydraulic Engineering* 44: 539-544.
- Ettema, R., and Muste, M. 2004. Scale-effects in Flume Experiments on Flow around a Dike in a Flatbed Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130.7: 635-646.
- Fazli, M., Ghodsian, M and Salehi Neyshaboury, S.A.A. 2008. Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend. *International Journal of Sediment Research* 23.1: 56-68
- Froehlich, D.C. 1989. Local scour at bridge abutments. *Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering*, New Orleans, LA, ASCE: 13-18.
- Koken, M and Constantinescu, G. 2008. An

## Experimental Model for Studying the Spur Dike Effect on Bridge Abutment Scour in Compound Channel

M. Saadatnia<sup>1</sup>, S. R. Khodashenas<sup>2\*</sup>, M. Saneie<sup>3</sup>, K. Esmaili<sup>4</sup>

Received: Sept.22, 2017

Accepted: Oct.27, 2017

### Abstract

In this study, the results of experiments conducted in a laboratory model for determining the effect of protective spur dike on bridge abutment scour in compound channel are presented. 75 experiments were carried out in 3 different discharges, five angles and five proportions of the spur dike to the bridge abutment length. The experiments were carried out using sand with uniform granulation and in Froude numbers between 0.44 and 0.49. Laboratory results showed that the bridge's erosion can be reduced to 70% when the spur dike angle is 90 to 120 degrees. At the end, several relationships were proposed to estimate the scour depth. Comparison with other studies showed that the proposed relationship of this research provides a more accurate estimate for the estimation of scour depth in bridge abutment.

**Keyword:** Abutment Pier, Compound Channel, Experimental model, Scour, Spur Dike

---

1- M. Sc. in Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran

4- Associate Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

(\*- Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)