

## Determination of Optimum Depth and Dimensions of Roughening Elements on Bridge Abutment as Scour Countermeasures

NEDA JAFARI<sup>1</sup>, S.M. ALI ZOMORODIAN<sup>\*1</sup>, MASIH ZOLGHADR<sup>2</sup>

1. Agricultural Engineering-Hydraulic Structures, Shiraz University, Shiraz, Iran

2. Water Engineering Department, Jahrom University, Jahrom, Iran

(Received: Dec. 29, 2018- Revised: Apr. 23, 2019- Accepted: May. 6, 2019)

### ABSTRACT

In the recent years, the failure of many bridges has reported due to local scour around abutment. Many studies have focused on reducing the scour with the help of structures reducing the destructive effects of flow. In this study, the scouring effect on two vertical wall abutments with different widths was investigated using clean water. Where the upstream face of the latter is protected with roughening elements as devices to intercept the down flow responsible for the formation of the principal vortex. Different sizes of the elements with thicknesses and protrusions equal to 0.025L, 0.05L, 0.1L, 0.2L and 0.3L (L is the length of the abutment) placed at different elevations on abutments were investigated. The optimum elevation of roughening elements obtained at 0.6L below the bed level. As the thickness and protrusion dimensions of the elements increases to 0.2L, scour depth around the abutment decreases, and after that increases if the element size become larger. In conclusion, the roughening elements with thickness and protrusion equal to 0.2L and placement of 0.6L below the sediment bed reduced the scour depth 30.4 and 32.8% at the small and large abutments, respectively.

**Keywords:** Abutment Scour, Roughening Elements, Optimum placement Depth of Roughening Elements

## تعیین عمق و ابعاد بهینه المان‌های زبری بر روی تکیه‌گاه پل برای کاهش میزان آبشستگی

نداجعفری<sup>۱</sup>، سید محمدعلی زمردیان<sup>۲\*</sup>، مسیح ذوالقدر<sup>۲</sup>

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۱۶)

### چکیده

در سال‌های اخیر دلیل تخریب بسیاری از پل‌ها آبشستگی تکیه‌گاه اعلام شده است. تحقیقات بسیاری به کم کردن آبشستگی تکیه‌گاه به کمک سازه‌هایی که اثر تخریبی جریان را بهبود می‌بخشند پرداخته‌اند. در این مطالعه به بررسی آبشستگی آب زلال در دو تکیه‌گاه عمودی با عرض‌های مختلف پرداخته شده است. دیواره‌ی بالادست تکیه‌گاه با المان‌هایی برای کاهش گردابه‌های نعل اسبی محافظت شده است. اندازه‌های مختلف المان‌ها با ضخامت و پیش‌آمدگی برابر با  $0.05L$ ،  $0.1L$ ،  $0.2L$ ،  $0.3L$  و در ارتفاع‌های مختلف کارگذاری بر دو تکیه‌گاه با طول برابر و عرض یکی دو برابر دیگری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارتفاع بهینه اعمال زبری، برابر با  $0.6L$  زیر سطح رسوب به دست آمد. با بزرگتر شدن ابعاد المان‌ها تا ضخامت و پیش‌آمدگی  $0.2L$ ، آبشستگی اطراف تکیه‌گاه کم می‌شود و پس از آن با بزرگتر شدن المان‌ها آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. کارگذاری المان‌های با ضخامت و پیش‌آمدگی  $0.2L$  در عمق  $0.6L$  زیر رسوب بر تکیه‌گاه با عرض کمتر، کاهش آبشستگی به میزان  $30/4$  درصد و بر تکیه‌گاه با عرض بیشتر کاهش آبشستگی به میزان  $32/8$  درصد را نتیجه داد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی تکیه‌گاه، المان‌های زبری، عمق بهینه کارگذاری المان‌های زبری

### مقدمه

مهمترین عامل تخریب پل‌ها آبشستگی موضعی در اطراف پایه و تکیه‌گاه می‌باشد. پل‌ها به دلیل مانع شدن بر سر جریان و کاهش مقطع جریان، سرعت موضعی و آشفتگی جریان را افزایش می‌دهند و ایجاد گرداب‌ها منجر به اعمال نیروی فرسایشی اضافی بر بستر، افزایش نرخ حرکت رسوب و فرسایش و پایین رفتن بستر، ایجاد و گسترش حفره آبشستگی می‌شوند.

تحقیقات انجام شده توسط Richardson *et al.* (1993) بر روی ۳۸۳ پل در ایالات متحده آمریکا نشان داد که عامل شکست ۷۲ درصد از پل‌ها تخریب تکیه‌گاه پل بوده است. در ایران نیز بر اساس گزارش سازمان راه‌داری و حمل و نقل جاده‌ای در سال ۲۰۱۵ علت تخریب حدود ۳۷ درصد پل‌های کشور ناشی از آبشستگی پایه و تکیه‌گاه‌های کناری می‌باشد (Khademi & Shafai Bajestan, 2015).

آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه یکی از دلایل اصلی خرابی پل‌ها می‌باشد، برای کاهش عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها روش‌هایی از جمله، ساخت تکیه‌گاه در عمق زیادتر از عمق آبشستگی تعادلی، افزایش مقاومت مواد بستر با استفاده از پوشش‌های مختلف و کم کردن یا انحراف قدرت عوامل فرسایش

وجود دارد (Naeemi Nobandegani & Heidarpour, 2014).

روش‌های افزایش مقاومت بستر شامل کارگذاری سنگچین، بلوک-های بتنی، گابیون و ... می‌باشد که توسط محققانی از جمله Cardoso & Korkut *et al.* (2007)، Melville *et al.* (2006) و Fael (2009) و Sui *et al.* (2010) انجام شده است، نتایج این تحقیقات نشان داد که این روش‌ها می‌توانند میزان آبشستگی را نزدیک به صفر برسانند. بررسی روش‌های کاهش یا انحراف قدرت عوامل فرسایش به وسیله طوق، پره مستغرق، شکاف، شمع‌های قربانی شونده و ... نیز توسط محققانی همچون Dargahi (1990)، Johnson *et al.* (1992)، Chiew (1992)، Kumar *et al.* (1999)، Li *et al.* (2006)، Zarrati *et al.* (2004) و Heidarpour *et al.* (2010) و Fathi & Zomorodian (2018) انجام شد که نتایج آنها نشان داد این روش‌ها آبشستگی را کم می‌کند ولی به صفر نمی‌رساند. مزیت این روش‌ها نسبت به روش‌های قبل، صرف هزینه کمتر است. تحقیقاتی نیز توسط Mashahir *et al.* (2010) و Zarrati *et al.* (2010) انجام شد که به ترکیب دو روش پرداخته است که مزایای هر دو روش را به همراه دارد.

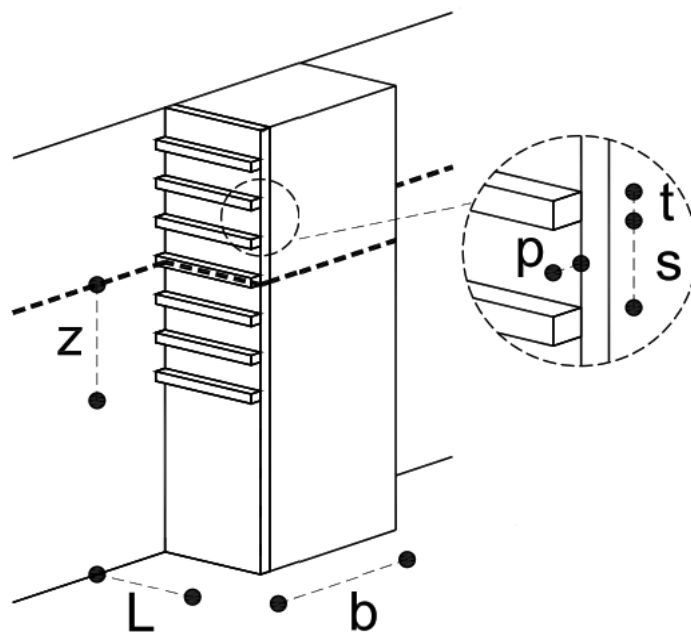
با توجه به اینکه دلیل تخریب درصد زیادی از پل‌ها در سراسر دنیا آبشستگی اطراف تکیه‌گاه می‌باشد، انجام تحقیقات

و فاصله المان ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه پیش آمدگی، ضخامت و فاصله المان ها، آبشستگی تا ۴۷ درصد کاهش می یابد. در این پژوهش ها به میزان بهینه ابعاد المان ها و همچنین ارتفاع بهینه کارگذاری آن ها اشاره نشده است. به بیان دیگر، با افزایش ابعاد المان ها بیش از مقداری معین، دیوار جدیدی در وجه بالادست تکیه گاه به وجود آمده که خود مانند تکیه گاهی بدون حفاظت می ماند. این حالت درست مثل این است که تکیه گاه به اندازه پیش آمدگی المان ها به بالادست منتقل شده، در نتیجه انتظار می رود عمق آبشستگی نه تنها کاهش پیدا نکند بلکه افزایش یابد. لذا این تحقیق کوشش می کند به تکمیل پژوهش های پیشین پرداخته و به پرسش هایی نظیر ارتفاع بهینه کارگذاری المان ها در زیر بستر و ابعاد بهینه المان ها پاسخ دهد. در شکل (۱) تکیه گاه حفاظت شده با این المان ها و پارامترهای هندسی موثر مشاهده می شود.

بیشتری در جهت کاهش خسارات ناشی از آبشستگی ضروری می باشد. کاهش قدرت عوامل فرسایش از طریق کارگذاری المان های زبری که زائده هایی تعبیه شده بر بالادست تکیه گاه هستند، در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

المان های زبری می توانند جریان رو به پایین که عامل اصلی ایجاد گرداب های نعل اسبی و در نتیجه آبشستگی است را تضعیف کنند. از عواملی که بر کارکرد المان های زبری تاثیر می گذارد، پیش آمدگی المان ها، ضخامت المان ها و فاصله دو المان متوالی از هم و ارتفاع کارگذاری آن ها می باشد.

(Radice & Davari (2014 با ثابت نگه داشتن ضخامت المان ها به بررسی اثر پیش آمدگی و فاصله المان ها پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که کمترین میزان آبشستگی در  $s/p=2$  (فاصله  $=s$  و پیش آمدگی  $=p$ ) رخ می دهد. Naeemi (2014) Nobandegani & Heidarpour با متغیر قرار دادن ابعاد



شکل ۱- تکیه گاه حفاظت شده با المان های زبری در وجه بالادست (Radice & Davari, 2014)

کانال،  $L$  = طول تکیه گاه،  $b$  = طول تکیه گاه در جهت جریان یا به عبارتی عرض آن،  $t$  = ضخامت المان،  $p$  = پیش آمدگی المان،  $s$  = فاصله دو المان متوالی،  $z$  = عمق کارگذاری المان های زبری در زیر بستر،  $\rho_s$  = چگالی رسوب،  $D_{50}$  = قطر متوسط رسوبات،  $\sigma$  = پارامتر یکنواختی رسوبات و  $T$  = زمان می باشد. با به کارگیری تئوری پای باکینگهام و در نظر گرفتن  $\rho, U, L$  به عنوان متغیرهای تکراری رابطه کلی برای تعیین آبشستگی به شکل زیر به دست می آید:

## مواد و روش ها

عمق آبشستگی متاثر از عوامل متعددی می باشد. پس به منظور ایجاد رابطه کاربردی، ۱۶ متغیر به صورت زیر در نظر گرفته شد: (رابطه ۱)

$$d_s = f_1(\rho, \mu, g, y, U, B, L, b, t, p, s, z, \rho_s, D_{50}, \sigma, T)$$

در این رابطه  $\rho$  = چگالی آب،  $\mu$  = ویسکوزیته آب،  $g$  = شتاب گرانش،  $y$  = عمق آب،  $U$  = سرعت جریان،  $B$  = عرض

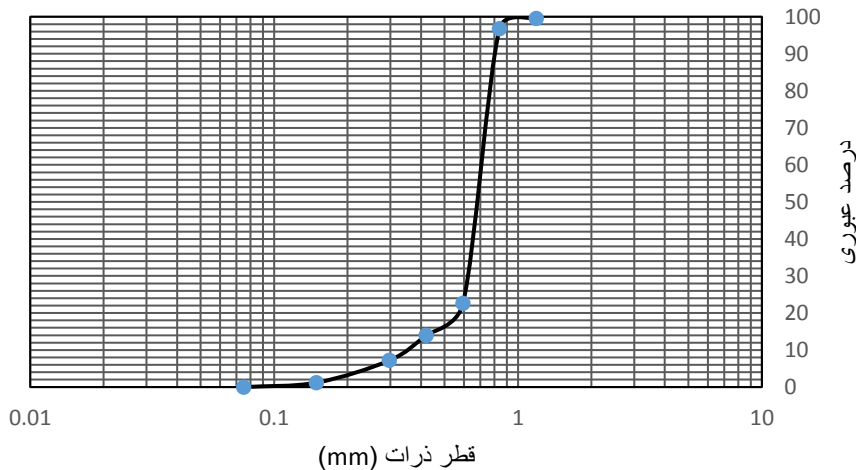
(رابطه ۲)

$$\frac{d_s}{L} = f_2 \left( \text{Re}, \text{Fr}, \frac{L}{y}, \frac{L}{B}, \frac{b}{L}, \frac{t}{L}, \frac{p}{L}, \frac{s}{L}, \frac{z}{L}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{b}{D_{50}}, \sigma, \frac{TU}{L} \right)$$

که  $\text{Re} = \frac{\rho U y}{\mu}$  عدد رینولدز و  $\text{Fr} = \frac{U}{(gy)^{0.5}}$  عدد فرود می‌باشد. به دلیل ثابت بودن مواردی از متغیرهای بالا مانند،  $\text{Fr}$ ،  $\text{Re}$ ،  $L/y$ ،  $L/B$ ،  $\frac{\rho_s}{\rho}$  و  $\sigma$  در این پژوهش، به بررسی اثرپذیری بعضی از عوامل شامل  $\frac{b}{L}$ ،  $\frac{t}{L}$ ،  $\frac{p}{L}$ ،  $\frac{s}{L}$ ،  $\frac{z}{L}$ ،  $\frac{b}{D_{50}}$ ،  $\frac{TU}{L}$  پرداخته شده است.

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شد. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده یک کانال شیشه‌ای با ۱۶ متر طول، ۰/۷ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع و شیب طولی ۰/۰۰۲۷ می‌باشد. دیواره‌ها و کف کانال از جنس شیشه با ضخامت ۶ میلی‌متر در دیواره‌ها و ۸ میلی‌متر در

کف است. درون کانال رسوباتی به ضخامت ۲۰ سانتی متر و قطر متوسط ۰/۷۱ میلی متر قرار داده شده است. با توجه به نتایج تحقیقات (Breusers & Raudkivi 1991) چنانچه قطر متوسط رسوبات کمتر از ۰/۷ میلی متر باشد، امکان تشکیل پشته‌های رسوبی کوچک یا ریپل وجود دارد. بنابراین رسوبات به گونه‌ای انتخاب گردیده‌اند که امکان تشکیل ریپل حذف گردد. همچنین مطابق منحنی دانه‌بندی که در شکل (۲) نشان داده شده است،  $d_{16}=0/5$  میلی‌متر و  $d_{84}=0/78$  میلی‌متر می‌باشد. بنابراین انحراف معیار هندسی رسوبات مورد استفاده  $(S_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}})$  ۱/۲۵ (Raudkivi & Ettema, 1983).



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ذرات

با  $0/25L$ ،  $0/5L$ ،  $0/1L$ ،  $0/2L$ ،  $0/3L$  می‌باشد. فاصله‌ی نصب المان‌ها از هم با توجه به نتایج آزمایش‌های Radice & Davari (2014) برابر با  $2p$  (=  $p$  = ابعاد پیش‌آمدگی المان) در نظر گرفته شد. المان‌های به کار رفته در پژوهش در شکل (۳) آمده است. تکیه‌گاه‌ها در فاصله ۱۰ متر از ابتدای کانال نصب می‌شوند که با توجه به رابطه بدست آمده از پژوهش Kirkgöz & Ardiçlioğlu (1997)  $\frac{l}{y} = 76 - 0.0001 \frac{\text{Re}}{\text{Fr}}$  که  $l$  طول منطقه توسعه سرعت جریان،  $y$  عمق جریان،  $\text{Re}$  عدد رینولدز و  $\text{Fr}$  عدد فرود می‌باشند، طول منطقه توسعه یافتگی جریان برابر با  $8/9$  متر به دست می‌آید که پس از آن جریان تا رسیدن به تکیه‌گاه کاملاً توسعه یافته است. بر اساس تحقیقات (Melville 1992) اگر

مدل مورد استفاده برای بررسی پدیده آبستگي موضعی اطراف تکیه‌گاه پل شامل دو تکیه‌گاه با مقطع مستطیلی از جنس پلکسی‌گلس با طول ۰/۱۴ متر و عرض‌های ۰/۰۷ متر و ۰/۱۴ متر و المان‌های زبری که مکعب مستطیل‌هایی با طولی برابر طول تکیه‌گاه و با ابعاد مختلف پیش‌آمدگی و ضخامت هستند، می‌باشند. این ابعاد با هدف از بین بردن نسبت تنگ شدگی انتخاب شده‌اند زیرا با توجه به کوچکتر بودن نسبت طول تکیه‌گاه به عرض کانال از مقدار  $0/33$  ( $L/B = 0/2$ ) اثر نسبت تنگ شدگی بر آبستگي از بین می‌رود (Ballio et al, 2009). دلیل انتخاب دو عرض متفاوت نیز بررسی تاثیر عرض تکیه‌گاه بر آبستگي دماغه می‌باشد. اندازه ضخامت و پیش‌آمدگی المان‌ها با هم برابر و برابر

سرعت به سرعت بحرانی در این پژوهش برابر با ۰/۹۴ در نظر گرفته شده است که با توجه به کمتر بودن این نسبت از یک، شرایط آبشستگی آب زلال برقرار است (Raudkivi, 1998). ابتدا آزمایش شاهد بر روی دو تکیه‌گاه بدون حفاظت انجام شد و مشاهده شد دماغه تکیه‌گاه بیشترین عمق آبشستگی را دارد. سپس برای بررسی تغییرات عمق آبشستگی در حضور المان‌ها نیز دماغه‌ی تکیه‌گاه به عنوان نقطه‌ی مبنا بررسی شد. شکل (۴) دو تکیه‌گاه و نقاط مبنا را در آزمایش‌های شاهد نشان می‌دهد.

نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کمتر از ۱ شود، تکیه‌گاه از نوع کوتاه طبقه‌بندی شده و آبشستگی مستقل از عمق جریان می‌شود. بر این اساس و با توجه به دبی ۳۱ لیتر بر ثانیه، عمق ثابت و برابر با ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. با اندازه‌گیری سرعت حرکت جریان به وسیله سرعت‌سنج یک بعدی در عمق مورد نظر در زمانی که اولین ذرات رسوب شروع به حرکت می‌کنند، سرعت آستانه حرکت برابر ۰/۳ متر بر ثانیه به دست آمد که با مقدار به دست آمده از فرمول Melville & Sutherland (1988)  $(U_c = 5.75U_{*c} \log(5.53 \frac{y}{d_{50}}))$  تطابق دارد. نسبت



شکل ۳- المان‌های زبری مورد استفاده در پژوهش حاضر



تکیه‌گاه ۱

تکیه‌گاه ۲

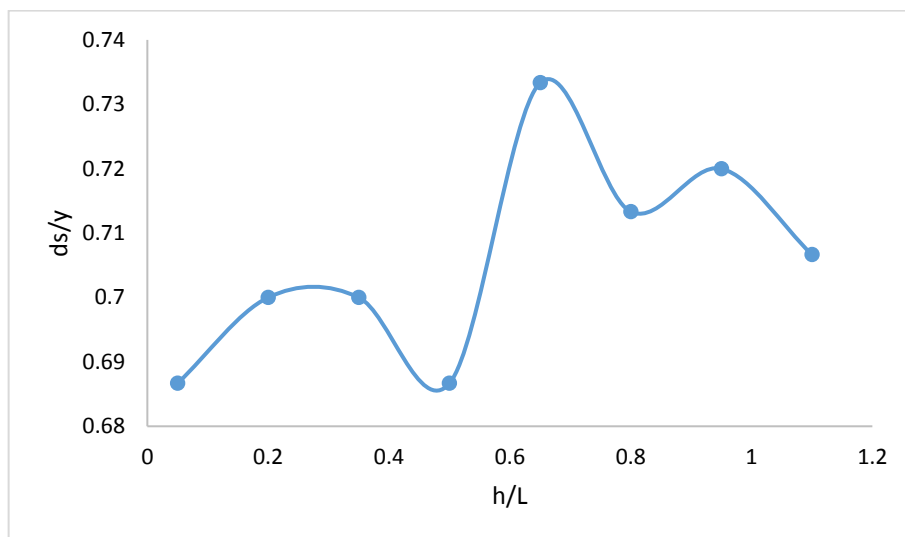
شکل ۴- نقاط مبنا در دو تکیه‌گاه

شد که مشاهده شد نصب المان‌ها بیشتر از یک عدد روی سطح رسوب، نه تنها تاثیر مثبتی ندارد بلکه در بعضی مواقع باعث افزایش عمق آبشستگی نیز می‌شود و روند مشخصی ندارد. این نتایج برای المان با اندازه ۰/۰۵L (۰/۷ سانتیمتر) برای نمونه در

در آزمایش‌های بعد، المان‌های زبری از جنس پلکسی‌گلس با طول ثابت، برابر با طول تکیه‌گاه، و عرض و پیش‌آمدگی مختلف بر روی تکیه‌گاه مستطیلی نصب شد. ابتدا آزمایش‌های مقدماتی برای یافتن تاثیر المان‌ها از روی سطح رسوب تا سطح آب انجام

از روی سطح رسوب آغاز می‌شود و در آزمایش‌های بعدی المان‌ها به زیر بستر و تا ارتفاعات مختلف تکیه‌گاه ادامه می‌یابد، تا جایی که آبستنگی در دماغه‌ی تکیه‌گاه ثابت بماند.

شکل (۵) آمده است (h ارتفاع کارگذاری المان‌ها بالای سطح رسوب است). روند در تمام آزمایش‌ها به این صورت است که نصب المان



شکل ۵- تاثیر کارگذاری المان‌ها با اندازه ۰/۰۵L بالای سطح رسوب

آن گسترش بیشتر آبستنگی در پایین دست می‌باشد. در این زمینه می‌توان به نتایج مشابه در تحقیقات (Xiong *et al.*, 2013) اشاره نمود. آن‌ها مجموعه آزمایشاتی با هدف بررسی طول تنگنا بر آبستنگی موضعی ترتیب دادند. بدین منظور در هر آزمایش تکیه‌گاه‌هایی مستطیلی با طول ثابت و عرض‌های متغیر در یک بستر رسوبی جایگذاری گردیدند. زمان انجام آزمایشات نیز بیش از ۱۱۳ ساعت بود. اندازه‌گیری سرعت‌های موضعی و توپوگرافی بستر در پایان آزمایشات انجام شد. این محققان گزارش نمودند که آبستنگی بیشینه، مستقل از طول تنگنا (عرض تکیه‌گاه) می‌باشد. به طوری که در تکیه‌گاه‌هایی با عرض ۵ و ۱۱۰ سانتی‌متر، آبستنگی دماغه تکیه‌گاه کمتر از ده درصد تفاوت دارد. حتی بردارهای سرعت نیز پیرامون دماغه تکیه‌گاه که محل وقوع بیشینه آبستنگی است بسیار مشابه می‌باشد.

پس از انتخاب نقطه مبنا، موضوع اصلی تعیین مدت زمان لازم برای انجام آزمایشات می‌باشد. بدین منظور لازم است زمان تعادل آبستنگی تعیین گردد. جهت مطالعه آبستنگی و همچنین ارائه روابط پیش‌بینی لازم است آزمایشات تا زمان تعادل و یا مدت زمانی که عمق آبستنگی تغییرات قابل توجهی را پس از آن نشان نمی‌دهد ادامه یابد. این زمان در پیشینه پژوهش از دو ساعت (Bozkus & Yildiz, 2004) تا ۹۶ ساعت (Vittal *et al.*, 1994) گزارش شده است. لذا تعیین زمان تعادل به عنوان آزمایش اولیه در این تحقیق انجام شد. بدین منظور آزمایشی با مدت زمان ۲۴ ساعت انجام شد. در طی این آزمایش دو پارامتر زمان و عمق

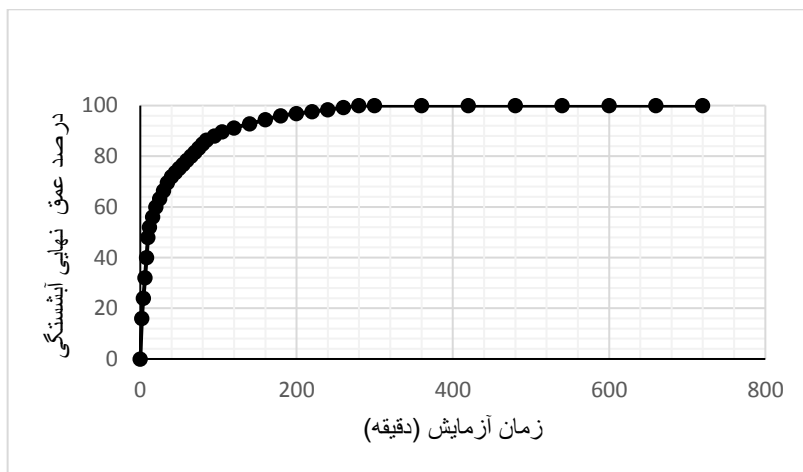
## نتایج

همانطور که اشاره گردید نقطه راس هر دو نوع تکیه‌گاه به عنوان نقطه مبنا جهت سنجش و مقایسه آبستنگی در آزمایش‌های مختلف انتخاب گردید. چراکه میزان آبستنگی در این محل بیش از سایر نقاط می‌باشد. در سایر تحقیقات مرتبط با آبستنگی تکیه‌گاه نیز همین نقطه به عنوان نقطه مبنا گزارش شده است (Radice & Davari, 2015, Khademi & Shafai Bajestan, 2014, Khazimenejad *et al.*, 2014). عمق آبستنگی در این نقطه برای هر دو نوع تکیه‌گاه در پایان آزمایش برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که عرض‌های مختلف تکیه‌گاه‌هایی با طول ثابت تاثیری در عمق بیشینه آبستنگی واقع در راس تکیه‌گاه ندارد. علت این موضوع را می‌توان به نقش تنگ‌شدگی و افزایش سرعت جریان مجاور تکیه‌گاه در آبستنگی مرتبط دانست. بدین صورت که تکیه‌گاه‌هایی با طول ثابت، هر چند عرض‌های مختلفی داشته باشند، به یک نسبت منجر به تنگ‌شدگی کانال می‌گردند. در طبقه‌بندی (Melville, 1992) نیز که قبلاً به آن اشاره شد، انواع تکیه‌گاه‌ها از دیدگاه بیشینه آبستنگی بر حسب نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان تقسیم‌بندی گردیده‌اند و عرض تکیه‌گاه نقشی در این تقسیم‌بندی ندارد. البته مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که به طور کلی تکیه‌گاه با عرض بیشتر منجر به افزایش حجم چاله آبستنگی و به بیان دیگر منجر به تغییرات بیشتر در توپوگرافی بستر می‌گردد. علت این پدیده امتداد بیشتر تکیه‌گاه و متعاقب

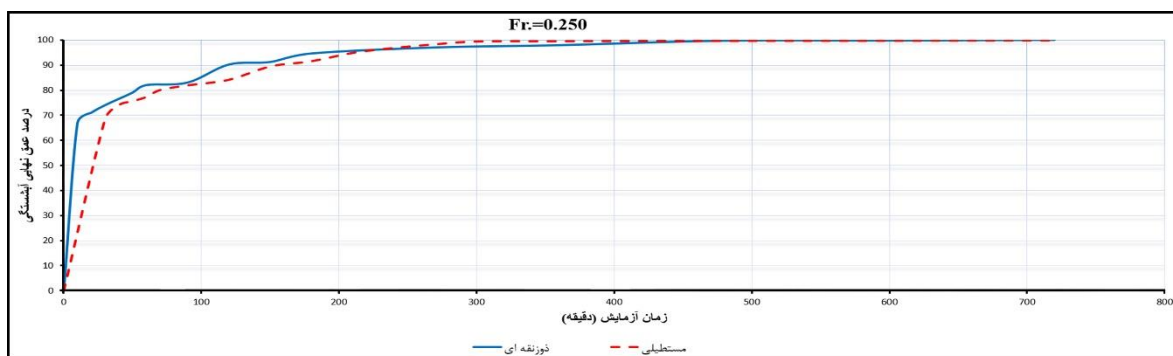
کارگذاری المان های زبری بوده است، پنج ساعت در نظر گرفته شد. این نتایج مشابه با مطالعات قبلی می باشد ( Zolghadr *et al.*, 2016, 2018). آن ها در تحقیقات خود تغییرات درصد نهایی عمق آبشستگی در مقابل زمان را در چهار عدد فرود مختلف و در دو نوع تکیه گاه مستطیلی و دوزنقه ای نشان دادند. این تغییرات در شکل (۷) برای دو نوع تکیه گاه و در بیشترین عدد فرود نشان داده شده است. زمان تعادل در تحقیق مذکور معادل ۴ ساعت در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است در مطالعاتی که هدف آن ها ارائه روابطی برای پیش بینی عمق آبشستگی می باشد مدت زمان انجام آزمایشات ممکن است چندین روز نیز ادامه یابد. به عنوان نمونه می توان به مطالعه (Rajaratnam & Nwachukwu 1983) اشاره نمود که جهت ارائه روابط آبشستگی پیرامون آبشکن، آزمایشات خود را تا ۶۰۰ ساعت ادامه داد.

آبشستگی نقطه مبنا مرتبا اندازه گیری شد. نتایج این آزمایش در شکل (۶) قابل مشاهده است.

در این شکل تغییرات درصد نهایی آبشستگی در مقابل زمان ترسیم شده است. قسمت عمده آبشستگی در آغاز آزمایشات یا به عبارتی در قسمت های ابتدایی زمان تعادل رخ می دهد، مثلا در مورد تکیه گاه های کوتاه تا ۹۰ درصد عمق آبشستگی در ۲۰ تا ۴۰ درصد اولیه زمان تعادل رخ می دهد. ( Mohammadpour *et al*, 2013). همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می گردد، در مطالعه حاضر نیز تغییرات در ابتدای آزمایش زیاد و به تدریج از آن کاسته می گردد. مطابق شکل فوق تغییرات آبشستگی پس از ۵ ساعت قابل چشم پوشی می باشد. لذا مدت زمان انجام آزمایشات با توجه به هدف مطالعه حاضر که مقایسه گزینه های مختلف



شکل ۶- زمان تعادل آزمایش



شکل ۷- تغییرات عمق آبشستگی به صورت درصدی از عمق نهایی آن نسبت به زمان (ذوالقدر و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸)

سطح بستر آزمایش ها ادامه یافت. نتایج آزمایش ها که شامل عمق آبشستگی در نقطه مبنا می باشد در شکل (۸) مشاهده می شود. با توجه به شکل (۸) مشاهده می شود که برای تمام ابعاد، نسبت  $Z/L$  برابر با  $0/6$  دارای کمترین میزان آبشستگی است. این نسبت عمق کارگذاری المان ها می باشد که توسط طول تکیه گاه

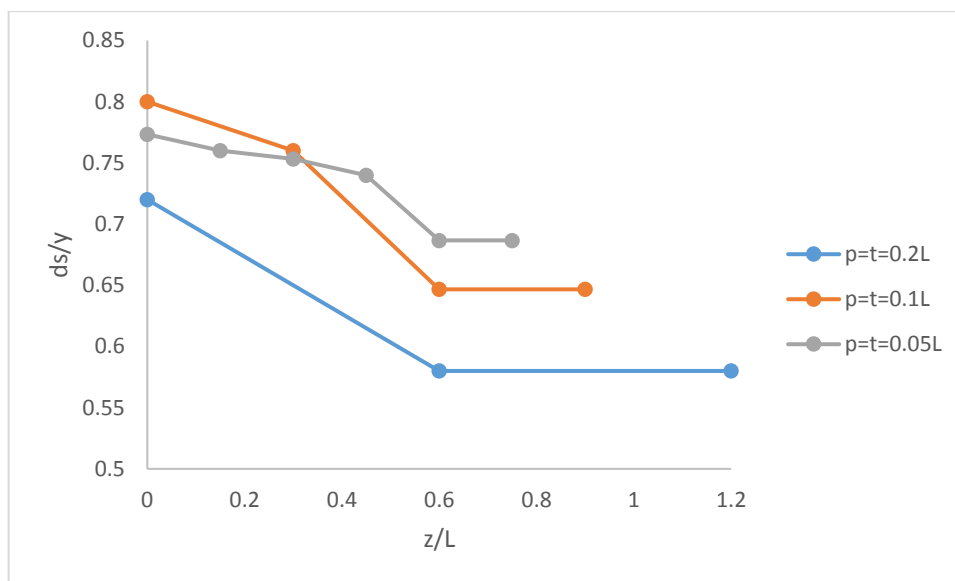
#### تعیین ارتفاع بهینه اعمال المان ها زیربستر رسوب:

برای یافتن عمق بهینه کارگذاری المان ها در زیر بستر، ابتدا کارگذاری المان های با ضخامت و پیش آمدگی  $0/05L$  و  $0/7$  سانتیمتر ( $1/4$  سانتیمتر) و  $0/2L$  و  $2/8$  سانتیمتر) از روی سطح رسوب آغاز شده و سپس با اضافه کردن المان ها در زیر



بی بعد شده است که می‌تواند عمق مناسب کارگذاری را نسبت به طول تکیه‌گاه نشان دهد. بنابراین عمق بهینه کارگذاری این

المان‌ها زیر رسوب برابر با  $0/6$  طول تکیه‌گاه می‌باشد. برای تکیه-گاه شماره ۲ نیز عمق بهینه اعمال زبری، نتایج مشابه داشت.



شکل ۸- نتایج عمق بی‌بعد آبشستگی در مقابل عمق بی‌بعد کارگذاری المان‌ها

#### تعیین ابعاد بهینه ضخامت و پیش آمدگی المان‌ها:

برای یافتن ابعاد بهینه المان‌ها، به دلیل بی‌تاثیر بودن کارگذاری بیش از یک المان بالای سطح رسوب، کارگذاری این المان‌ها از یک عدد روی سطح رسوب تا عمق بهینه زیر رسوب در قسمت قبل، به فاصله دو المان متوالی از هم طبق یافته‌های Radice & Davari (2014) برابر با دو برابر پیش‌آمدگی المان‌ها انجام شد. با قرار دادن المان‌ها با ابعاد  $0/35$ ،  $0/7$ ،  $1/4$ ،  $2/8$  و  $4/2$  سانتیمتر بر روی دو تکیه‌گاه از یک المان روی سطح رسوب تا عمق  $0/6L$  که برابر است با  $8/4$  سانتیمتر زیر رسوب، نتایج عمق آبشستگی به صورت زیر به دست آمد.

از دیدگاه هیدرولیکی، در بالادست پس از برخورد جریان به تکیه‌گاه، جریان رو به پایین تشکیل گردیده که خود عامل ایجاد گرداب اصلی و آبشستگی تکیه‌گاه می‌باشد. وجود المان‌ها منجر به ایجاد اختلال در جریان رو به پایین در نتیجه برخورد این جریان به المان‌ها و ایجاد افت انرژی در آن می‌شود. لذا جریان رو به پایینی که به سمت پی تکیه‌گاه هجوم می‌برد، ضعیف‌تر از آزمایش شاهد (بدون کارگذاری المان) خواهد بود و در نتیجه گرداب اصلی تضعیف شده و آبشستگی با شدت کمتری رخ می‌دهد.

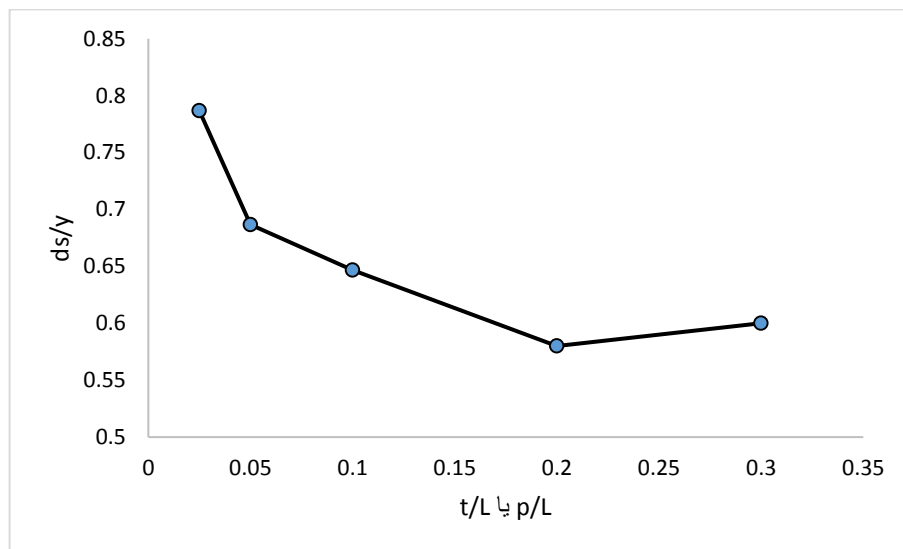
در این مطالعه، کلیه المان‌ها با سطح مقطع مربعی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. لذا، مقادیر  $p$  (پیش‌آمدگی) و  $t$  (ضخامت) المان‌ها با یکدیگر برابر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد المان‌ها عمق آبشستگی تا حد معینی کاهش یافته و پس از

آن افزایش می‌یابد (شکل ۹ و ۱۰). علت افزایش مجدد این است که با افزایش ابعاد المان، گویی وجه بالادست تکیه‌گاه به اندازه پیش‌آمدگی المان‌ها به سمت بالادست منتقل شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که چنانچه ضخامت و پیش‌آمدگی المان‌ها برابر با  $20$  درصد طول تکیه‌گاه باشد، بهترین نتایج حاصل می‌گردد. به بیان دیگر می‌توان گفت در این حالت المان‌ها بهترین عملکرد را داشته و بیشترین اختلال در جریان رو به پایین را ایجاد می‌کنند. در این حالت عمق آبشستگی در نقطه مبنای تکیه‌گاه  $1$  و  $2$  به ترتیب به  $8/7$  و  $8/4$  سانتیمتر کاهش می‌یابد که نسبت به آزمایش شاهد به ترتیب  $30/4$  و  $32/8$  درصد کاهش را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شده عمق آبشستگی در نقطه مبنا برای هر دو تکیه‌گاه یکسان می‌باشد. این در حالی است که عمق آبشستگی این نقطه در آزمایش‌های ارزیابی سه میلی متر تفاوت دارد. در این رابطه باید توضیح داد که از سویی دقت دستگاه ثبت توپوگرافی بستر یک میلی‌متر می‌باشد. از سوی دیگر عمق آبشستگی بدون بعد در این دو تکیه‌گاه به ترتیب  $0/58$  و  $0/56$  می‌باشد که در تفسیر نتایج تاثیر محسوسی نخواهد داشت. خطای انسانی نیز ممکن است در این اختلاف موثر بوده باشد. همچنین در مطالعه Xiong *et al.* (2013) تفاوت عمق آبشستگی نقطه مبنا در تکیه‌گاه با عرضهای متفاوت تا  $10$  درصد نشانگر عدم تاثیر عرض متفاوت تکیه‌گاه بر آبشستگی بیان شده است. این در حالی است که در پژوهش حاضر تفاوت عمق آبشستگی دو تکیه‌گاه بسیار ناچیز می‌باشد. چنانچه ابعاد المان‌ها کمتر انتخاب گردد،

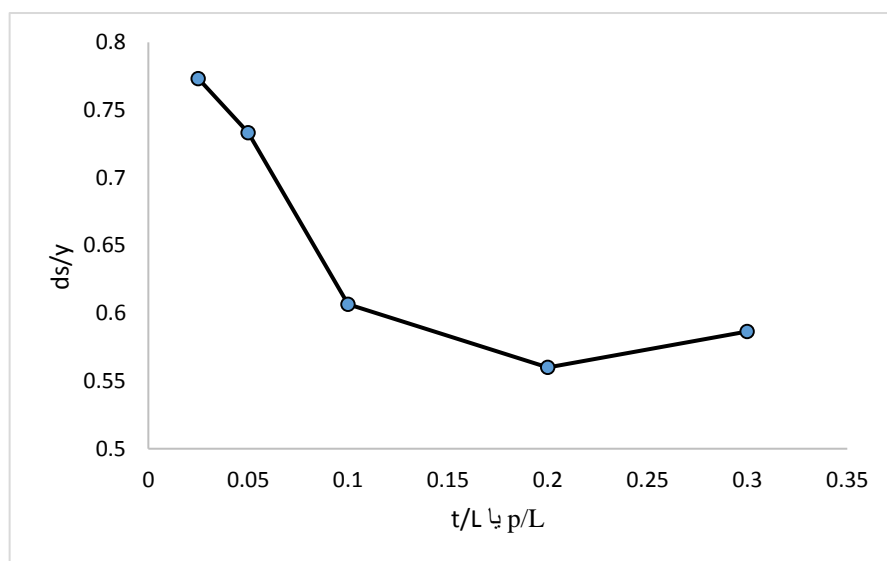


که آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد در تکیه‌گاه ۱ و ۲ به ترتیب تنها در حدود ۰/۵ و ۱ سانتیمتر کاهش داشته است. یعنی میزان کاهش آبشستگی حداکثر ۸ درصد می‌باشد.

جریان رو به پایین با موانع کمتری مواجه بوده و لذا میزان مهار آبشستگی کاهش می‌یابد. مثلا در کوچکترین ابعاد المان، علیرغم افزایش تعداد آن‌ها با توجه به شکل‌های (۹ و ۱۰) می‌توان دریافت



شکل ۹- نتایج تاثیر پیش آمدگی و ضخامت المان بر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه ۱

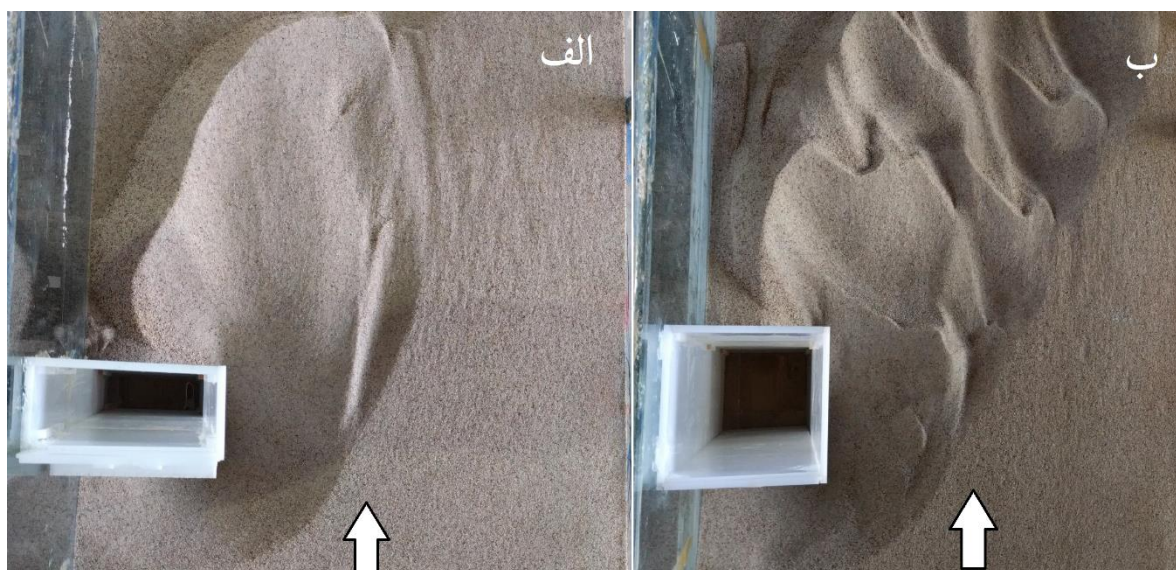


شکل ۱۰- نتایج تاثیر پیش آمدگی و ضخامت المان بر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه ۲

(2014) که ۴۲ درصد بهبود آبشستگی را نتیجه داد، مقداری کمتر می‌باشد که این به دلیل استفاده از رسوبات متفاوت تاثیرگذار در سرعت بحرانی و سرعت متفاوت (۰/۹ سرعت بحرانی) و در نتیجه عدد فرود متفاوت می‌باشد. در صورتی که در پژوهش حاضر میزان سرعت (۰/۹۴) سرعت بحرانی می‌باشد و عدد فرود برابر با ۰/۲۴ می‌باشد، لذا این تفاوت دور از انتظار نیست. همچنین در مطالعه پیش‌رو به پرسش‌هایی نظیر میزان عمق کارگذاری، پیش آمدگی و ضخامت المان‌های مربع شکل در حالت بهینه پاسخ داده شده است.

در شکل (۱۱) تصویر دو تکیه‌گاه در پایان آزمایش و در حالت بهینه کارگذاری المان‌ها ارائه گردیده است. در این حالت ابعاد المان (پیش آمدگی و ضخامت) معادل ۲۰ درصد طول تکیه‌گاه و برابر ۲/۸ سانتی‌متر و فواصل المان‌ها دو برابر پیش آمدگی آن‌ها و برابر ۵/۶ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین عمق کارگذاری المان زیر بستر ۶۰ درصد طول تکیه‌گاه و معادل ۸/۴ سانتی‌متر می‌باشد.

نتایج یافت‌شده در کاهش آبشستگی در مقایسه با پژوهش انجام شده توسط Naeemi Nobandegani & Heidarpour



شکل ۱۱- وضعیت بستر پیرامون تکیه‌گاه در پایان آزمایش و در حالت بهینه: الف) تکیه‌گاه ۱ ب) تکیه‌گاه ۲

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه با کارگذاری المان‌های زبری بر روی تکیه‌گاه پل مستطیلی در آرایش‌های مختلف، عمق و ابعاد بهینه المان‌ها جهت مهار آبشستگی مورد مطالعه قرار گرفت. با اندازه‌گیری آبشستگی در دماغه تکیه‌گاه مشاهده شد که با کارگذاری المان‌های با ابعاد مختلف و با فاصله ۰/۲ پیش‌آمدگی المان‌ها از هم (طبق نتایج Radice & Davari, 2014) تا عمق ۰/۶ طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، زیر سطح رسوب بهترین عملکرد در کاهش عمق آبشستگی ایجاد می‌شود و پس از آن با افزایش عمق کارگذاری المان‌ها آبشستگی ثابت می‌ماند. لذا این نسبت (۰/۶L) به عنوان عمق بهینه اعمال المان‌های زبری زیر سطح رسوب اعلام می‌شود.

با افزایش پیش‌آمدگی المان‌های زبری (p) تا ۰/۲ طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، بهترین عملکرد در کاهش عمق آبشستگی ایجاد می‌شود و پس از آن با افزایش پیش‌آمدگی المان‌ها افزایش عمق آبشستگی مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت المان‌های زبری (t) نیز تا ۰/۲ طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، بهترین عملکرد در کاهش عمق آبشستگی ایجاد می‌شود و پس از آن با افزایش ضخامت المان‌ها افزایش عمق آبشستگی مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش عمق آبشستگی با اعمال المان‌ها با ضخامت و پیش‌آمدگی برابر با ۰/۲ طول تکیه‌گاه و تا ارتفاع بهینه زیر سطح رسوب مشاهده شد که برای تکیه‌گاه شماره ۱ (b=7cm)، ۳۰/۴ درصد و برای تکیه‌گاه ۲ (b=14cm)، ۳۲/۸ درصد برآورد شد.

## REFERENCES

- Ballio, F., Teruzzi, A., & Radice, A. (2009). Constriction effects in clear-water scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(2), 140-145.
- Bozkus, Z., & Yildiz, O. (2004). Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(8), 827-832.
- Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring. Hydraulic Structures Design Manual* 2. Balkerna, Rotterdam, The Netherlands: IAHR.
- Cardoso, A. H., & Fael, C. M. (2009). Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 457-465.
- Chiew, Y. M. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269.
- Dargahi, B. (1990). Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(10), 1197-1214.
- Fathi, A., & Zomorodian, S. M. A. (2018). Effect of Submerged Vanes on Scour Around a Bridge Abutment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7), 2281-2289.
- Heidarpour, M., Afzalimehr, H., & Izadinia, E. (2010). Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research*, 25(4), 411-422.
- Hossainreza, A.A. (2017). Investigation the Joined Effect of Riprap and Six Legged Elements (SLC) Installation on Scour Depth Mitigation at Vertical Wall Bridge Abutments. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. Ahvaz: Iran.
- Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., & Rosgen, D. L. (2001). Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(9), 772-778.
- Khademi, Kh. & Shafai Bajestan, M. (۲۰۱۵)،

- Annalysing the Effect of Number, Location and Angle of Submerged Plates on Abutment. *Iranian Water Studies* 8(15) 145-153.
- Khazimenejad, H., Ghomeishi, M., & Shafai Bajestan, M. (2014). Comparison of Symmetrical and Unsymmetrical Rectangular Collars on Reduction of Local Scour at Bridge Abutment. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 37(2), 1-12.
- Kirkgöz, M. S., & Ardiçioğlu, M. (1997). Velocity profiles of developing and developed open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(12), 1099-1105.
- Korkut, R., Martinez, E. J., Morales, R., Ettema, R., & Barkdoll, B. (2007). Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 431-439.
- Kumar, V., Raju, K. G. R., & Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 1302-1305.
- Li, H., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R., & Alonso, C. (2006). Parallel walls as an abutment scour countermeasure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(5), 510-520.
- Mashahir, M. B., Zarrati, A. R., & Mokallaf, E. (2009). Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(3), 183-187.
- Melville, B. W. (1992). Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), 615-631.
- Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.
- Melville, B., Van Ballegooy, S., Coleman, S., & Barkdoll, B. (2006). Countermeasure toe protection at spill-through abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 235-245.
- Melville, B., Van Ballegooy, S., Coleman, S., & Barkdoll, B. (2006). Scour countermeasures for wing-wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 563-574.
- Mohammadpour, R., Ghani, A.A.B. and Azamathulla, H.M. (2013). Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment. *International Journal of River Basin Management* 11(1): 121-135.
- Naeemi Nobandegani, H., & Heidarpour, M. (2014). Studying the Effect of Roughening Elements on Reduction of Scour Around Abutments (pp.1-8). *13<sup>th</sup> Iranian Hydraulics conference*, Tabriz University, Iran.
- Pagliara, S., Hassanbandi, L.S., & Kurdistani, S.M. (2015). Log-Vane Scour in clear water Condition. *Journal of River Research and Applications*, 31(9), 1176-1182.
- Radice, A., & Davari, V. (2014). Roughening elements as abutment scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 1-7.
- Rajaratnam, N., & Nwachukwu, B. A. (1983). Erosion near groyne-like structures. *Journal of Hydraulic Research*, 21(4), 277-287.
- Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Raudkivi, A. J. (1998). *Loose boundary hydraulics*, The Netherlands: A. A. Balkema.
- Richardson, E. V., Harrison, L. J., Richardson, J. R., & Davies, S. R. (1993). *Evaluating scour at bridges*. Washington, DC., USA: Federal Highway Administration. US Department of Transportation.
- Sui, J., Afzalimehr, H., Samani, A. K., & Maherani, M. (2010). Clear-water scour around semi-elliptical abutments with armored beds. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 233-245.
- Vittal, N., Kothiyari, U. C., & Haghghat, M. (1994). Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(11), 1309-1318.
- Xiong, X., Melville, B.W., Feriedrich, H., (2013). Effect of contraction length on abutment scour. *Proceedings of the International IAHR World Congress*.
- Zarrati, A. R., Gholami, H., & Mashahir, M. B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 97-103.
- Zarrati, A. R., Chamani, M. R., Shafaie, A., & Latifi, M. (2010). Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 313-322.
- Zolghadr. M., Shafai Bejestan. M., & Fathi, A. (2016). Effect of Density and Depth of Six-Legged Elements Placement on Rectangular Abutment Scour Depth. *Water and Soil Science*, 26(4.1), 119-135.
- Zolghadr. M. & Shafai Bejestan. M. (2018). Effect of Six-Leg Elements installation arrangement on bed topography around Wing-Wall Abutments. *Journal of Water Resources Engineering*, 11(36), 47-58.