

**EXTENDED ABSTRACT**

**The Effect of submerged wall constructed by six leg elements on the Bed Topography of the 90-degree mild bend**

F. Velayati<sup>1</sup>, M. Shafai Bajestan<sup>2\*</sup> and S. M. Kashefipour<sup>3</sup>

1- Ph.D. Phd student of, Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2\*- Corresponding Author, Professor of Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (m-shafaeibajestan@scu.ac.ir).

3- Professor of Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 30 July 2020

Revised: 19 September 2020

Accepted: 22 September 2020

*Keywords:*

Secondary Flow, Outer Bank, Scour, deposition.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Velayati, F., Shafai bajestan, M., Khashefipour, M. (2024). 'The Effect of submerged wall constructed by six leg elements on the Bed Topography of the 90-degree mild bend', Irrigation Sciences and Engineering, 47(2), pp. 1-15. doi: 10.22055/jise.2020.34391.1923.

**Introduction**

The main causes of scouring and erosion of the river's bed and banks are the interaction of secondary flows and the sediment bed particles. Bank erosion causes disturbance of private and public lands, damages aquatic and riparian ecosystems, and degrades water quality. In addition, the eroded sediments will deposit downstream in front of intakes, flood control and navigation channels and valuable wetland areas (Biedenharn et al, 1997; Julien, 2002).

Numerous studies have been conducted on the pattern of flow, erosion and deposition in bend and in the presence of banks protection structures. One of the structures that has been used in recent years is the use of six-leg concrete elements called A-Jack. In recent years, some studies have been conducted on the use of these components to control the pier and abutment scour bridge. In late 1998 and early 1999, a series of 54 tests of 6-inch model scale A-Jacks was conducted at Colorado State University (CSU) to examine their effectiveness in pier scour applications. This program is described in detail in CSU's test report entitled, "Laboratory Testing of A-Jacks Units for Inland Applications: Pier Scour Protection Testing" (Thornton et al. 1999a and b). So far, no comprehensive research has been done on the effectiveness of these elements as controllers of banks toe erosion. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effect of the geometry of the submerged wall constructed by six-leg elements on bed topography of a flume bend.

**Methodology**

The experiments were conducted in a 90-degree laboratory flume bend of constant width,  $b = 70$  cm. The bend is connected to an upstream straight reach 5 m long and a downstream straight reach 3 m long. Also, the ratio of the curvature's radius to the flume's width ( $r/b$ ) equals 4. The inner and outer radius of the bend are 2.45 and 3.15 meters, respectively. The flume sidewalls were made of

plexiglass. A slide gate was installed at the end of the channel to control the flow depth. Sediments in a layer 20 cm thick are made of sand with mean diameter of  $d_{50}=1.5$  mm and a geometric standard deviation equal to 1.22. The experiments were carried out in four different flow discharges 30, 33, 36 and 39 lit/s (corresponding to particle Froude numbers 2.5, 2.75, 3, 3.25) with a constant depth of 11 cm. The six-leg elements used in this research are made of concrete. The wall installed at a distance of 7 cm from the outer bank and the effective height of the elements is 4 cm.

In this study, the topography of the bed without and with the presence of submerged wall made with six-leg elements has been studied and the effect of the number of rows of wall placement (single row, two rows, three rows) as well as the relative length of wall placement ( 0.5, 0.333 and 0.166) have been investigated.

### Conclusion

In all experiments of this study, the scour between the submerged wall and the outer bank was negligible and the wall was able to decrease the scour of the outer bank by about 100% compared to the baseline experiment and has caused the river Thalweg to move away from the outer bank. As the flow conditions and the particle Froud number increase, the maximum scour depth changes to the upper part of the structure and can endanger the stability of the outer bank, However, due to the impact of the wall, it has shifted to the middle of the channel and continued down the wall. As observed, the performance of a submerged wall with a relative length of 0.5, is better than that with a relative length of 0.333. Also, the use of a submerged wall with a relatively short length (0.166) is only justified for particle Froude numbers less than 2.5 and for the protection of a short section of the bend.

A comparison of the number of rows also showed that scouring in the three-row condition has increased compared to single-row and two-row walls, due to the reduction of the flow cross-section area and a further increase in velocity and shear stress on sediments.

### Acknowledgement

The present study was financially supported by the second author's research grant with grant number Scu-wh1400.470. The authors would like to thank the Vice-chancellor for research of Shahid Chamran university of Ahvaz, for providing this grant.

### References

- 1- Biedenharn, D.S., Elliott, C.M. and Watson, C.C., 1997. *The WES stream investigation and streambank stabilization handbook* (p. 460). Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- 2- Julien. P.y.. 2002. *River Mechanics*. Cambridge university press. pp.434
- 3- Thornton. C.I. C.C. Watson. S.R. Abt. C.M.. Lipscomb. and C.M. Ullman.. 1999a. Laboratory Testing of A-Jacks Units for Inland Applications: Pier Scour Protection Testing. *Colorado State University research report for Armortec Inc. February*.
- 4- Thornton, C.I., Abt, S.R. and Watson, C.C., 2001. Field Assessment of A-Jacks Installation, A Case Study of Brush Creek, Kansas City, Missouri, and Powell Creek, Waukegan, Illinois. In *Wetlands Engineering & River Restoration 2001* (pp. 1-8). DOI: 10.1061/40581(2001)58.





## تأثیر دیواره مستغرق ساخته شده با المان‌های شش پایه بر توپوگرافی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه

فائزه ولایتی<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجهستان<sup>۲\*</sup> و سید محمود کاشفی پور<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته‌ی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران  
m-shafaeibejistan@scu.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹

## چکیده

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر دیواره مستغرق ساخته شده با المان‌های شش پایه بر توپوگرافی بستر در کانال قوسی ملایم ۹۰ درجه پرداخته شده است. آزمایش‌های این تحقیق تحت شرایط هیدرولیکی مختلف در اعداد فرود ذره ۲/۵، ۳ و ۳/۲۵ در سه طول نسبی ۰/۵، ۰/۳۳۳ و ۰/۱۶۶ و با سه عرض نسبی ۰/۰۶۴، ۰/۱۱۴ و ۰/۱۶۴ انجام شد. نتایج نشان داد در تمامی آزمایش‌های ارزیابی، دیواره موجب دور شدن خط‌القعر از ساحل بیرونی شده به طوری که مقدار آبشستگی ساحل بیرونی در مقایسه با آزمایش‌های شاهد بین ۹۵ تا ۱۰۰ درصد کاهش یافته است. همچنین، موقعیت حداکثر عمق آبشستگی دور از ساحل بیرونی و در قسمت داخلی دیواره تشکیل شده که این امر به حفاظت ساحل بیرونی افزوده است. نتایج نشان داد که در اعداد فرود ذره ۲/۵ و ۳، و برای یک عرض نسبی ثابت، با افزایش طول نسبی دیواره از ۰/۱۶۶ تا ۰/۵ حداکثر عمق آبشستگی به ترتیب به مقدار ۳۸ و ۳۷ درصد کاهش پیدا می‌کند و برای یک مقدار ثابت طول نسبی، با افزایش عرض نسبی دیواره از ۰/۰۶۴ به ۰/۱۶۴ حداکثر عمق آبشستگی نسبی به ترتیب ۷۰ و ۵۶ درصد افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: جریان حلزونی، الگوی جریان، آبشستگی، جریان ثانویه.

## مقدمه

عامل اصلی وقوع آبشستگی در قوس رودخانه‌ها و فرسایش بستر و کناره‌ها، اندرکنش جریان‌های ثانویه و دانه‌بندی رسوبات و جریان‌های طولی می‌باشد. خصوصیات جریان در قوس‌ها می‌تواند الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش را به خوبی توضیح دهد. با ورود جریان به قوس، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد و گرادیان فشار جانبی در داخل مقطع به وجود می‌آید. به دلیل توزیع نامتقارن سرعت، لایه‌های بالایی سطح آب تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به طرف قوس خارجی و لایه‌های پایین به سمت قوس داخلی حرکت می‌کنند، این الگوی جریان در قوس را جریان ثانویه می‌نامند. در اثر تقابل جریان ثانویه و جریان طولی، جریان حلزونی در قوس‌ها تشکیل می‌شود. فرسایش در محل پاشنه ساحل خارجی به دلیل حرکت رو به پایین جریان در الگوی جریان ثانویه می‌باشد و موجب ناپایداری توده خاک ساحل و تخریب اراضی، پوشش گیاهی و همچنین تاسیسات ساحلی موجود می‌شود.

فرسایش و جابه‌جایی رودخانه‌ها به لحاظ اقتصادی و محیط زیستی عواقب گسترده‌ای دارد، از این رو روش‌های سامان‌دهی رودخانه به منظور جلوگیری از ایجاد تخریب‌ها و عواقب آن انجام می‌گیرد. به این منظور مطالعه‌های بسیاری در زمینه الگوی جریان

و رسوب در قوس و در حضور سازه‌های حفاظت سواحل انجام شده است. جریان ثانویه، اولین بار توسط Boussinesq (1868) بیان گردید و چند سال بعد توسط Thomson (1876) اشاعه پیدا کرد (به نقل از Blanckaert and De Vriend, 2004). Shukry (1950)، برای قوس‌های مختلف تحت شرایط متفاوت جریان در یک مقطع عرضی معین، معیاری را برای قدرت جریان ثانویه در قوس رودخانه‌ها به صورت نسبتی از متوسط انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی تعریف کرد. Bergs و Odgaard (1988)، با مطالعه الگوی جریان و آبشستگی در قوس ۱۸۰ درجه ملایم در شرایط بستر زنده، به این نتیجه رسیدند که در امتداد قوس خارجی دو حفره آبشستگی مشاهده می‌شود که حفره اولی در موقعیت مکانی زاویه ۶۰ درجه از ابتدای قوس رخ می‌دهد و به لحاظ ابعادی از حفره دوم بزرگتر است. محققین بسیاری به بررسی جریان در قوس‌ها پرداخته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به Rozovskii (1957) Blanckaert و Graf (2001)، Da Silva et al. (2006) و Kashyap et al. (2010) اشاره کرد. مطالعه‌های بسیاری در زمینه الگوی جریان و رسوب در قوس در حضور سازه‌های حفاظت سواحل صورت گرفته است. از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه‌های Vaghefi et al. (2012) در رابطه با

کرد. این المان‌ها هم‌چنین برای کنترل آبستتگی پائین دست سرریزها توسط Rashki Ghaleh Nou et al. (2020) و Khalifehei et al. (2020) استفاده شده است. نتایج این مطالعه‌ها نشان می‌دهد که المان‌ها به‌خوبی توانسته‌اند میزان آبستتگی را بسیار کاهش دهند. در زمینه کاربرد این المان‌ها در کنترل فرسایش پنجه ساحل می‌توان مطالعه Thornton et al. (2001) را نام برد که با قرار دادن این المان‌ها در محل پنجه ساحل در رودخانه‌های واقع در منطقه کانزاس و شهر اوگانگان ایلینویز ملاحظه کردند که ناحیه محافظت‌شده در طول سیل در مقایسه با ناحیه بدون حفاظت، از فرسایش پنجه ساحل به‌خوبی محافظت کرده است.

از جمله مواردی که مطالعه آزمایشگاهی Zolghadr و Shafai Bajestan (2020) نشان داد مقاومت خوب المان‌های شش‌پایه در مقابل فرسایش لبه بود. معمولاً بیشتر تخریب‌های سازه‌ای ساخته‌شده با سنگ (ریپ‌رپ) علی‌رغم داشتن اندازه سنگ مناسب، توسط فرسایش لبه تخریب شده‌اند. دلیل عمده آن فرو رفتن پایه‌ها در درون بستر ذکر شده است. به‌طوری‌که با قرارگیری این عناصر بر روی بستر رودخانه علاوه بر این که برآمدگی پایه‌ها باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان و افزایش مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی می‌شوند، این عناصر یا به‌صورت درهم یا یکنواخت کنار هم قرار گرفته شده‌اند و از چهار جهت با عناصر کناری خود قفل می‌شوند و در نتیجه به‌صورت یک پارچه عمل می‌کنند. این قطعات ضمن ایجاد پوشش و افزایش ضریب مانینگ تا حدود ۰/۱ امکان رشد پوشش گیاهی در بین پایه‌ها را فراهم کرده و به حفظ بستر و محل پنجه ساحل رودخانه کمک می‌کنند (Zolghadr et al, 2016). با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با کاربرد المان‌های شش‌پایه برای حفاظت ساحل قوس بیرونی رودخانه‌های پیچان‌رودی انجام نشده است، هدف اصلی این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی بررسی مشخصات دیواره مستغرق ایجاد شده در فاصله دورتر از ساحل با مصالح المان‌های بتنی شش‌پایه روی توپوگرافی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

متغیرهای موثر در پدیده آبستتگی و رسوب‌گذاری اطراف دیواره مستغرق ساخته‌شده با المان‌های شش‌پایه در رابطه (۱) آورده شده است:

$$f\left(\frac{Z_m, S_b, B, R, \delta, T, s, b, h, D, \rho_s}{D_{50}, \sigma_g, \rho, \mu, V, \gamma, g, S}\right) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه،  $Z_m$  حداکثر عمق آبستتگی،  $S_b$  شیب طولی فلو،  $B$  عرض فلو،  $R$  شعاع قوس فلو،  $\delta$  زاویه مرکزی قوس،  $T$  تراکم کارگذاری المان‌ها،  $s$  طولی از قوس بیرونی که

آبشکن، Jarrhazade و ShafaiBejestan (2011) در رابطه با سرریزهای مستغرق، نصب دیواره‌های افقی در ساحل توسط Rezania et al. (2009)، صفحات مستغرق توسط Pourmansouri et al. (2020)، نصب صفحات مثلثی متصل به ساحل در قوس ملایم ۹۰ درجه توسط Bahrami Yarahmadi و Shafai Bajestan (2016 a,b)، احداث سازه باندا لایک توسط Jarrhazade et al. (2017)، احداث سازه ترکیبی آبشکن نفوذپذیر و صفحات مثلثی توسط Ferro et al. (2019) اشاره کرد. تمامی مطالعه‌های اشاره‌شده از جمله روش‌هایی هستند که تلاش دارند با اصلاحاتی در الگوی جریان، قدرت جریان ثانویه را کاهش یا آن را از ساحل خارجی دور کنند تا عمق آبستتگی پنجه ساحل خارجی کاهش و از تخریب ساحل تا حد زیادی جلوگیری کنند. روش‌های دیگری هم در گذشته به‌وجود آمده‌اند که از جمله می‌توان به احداث دیواره‌های کناری مستغرق، احداث دیواره‌هایی در تمام عرض رودخانه دارای پلان به شکل‌های مختلف U، V و W شکل نام برد (Atashi et al., 2016). این سازه‌ها نیز با متمرکز کردن جریان و انتقال جریان ثانویه به سمت میانه‌های رودخانه باعث کاهش تنش برشی در نزدیک ساحل خارجی و در نتیجه کاهش عمق آبستتگی پنجه ساحل می‌شوند.

استفاده از دیواره‌های مستغرق موازی جریان در فاصله‌ای از ساحل رودخانه، موضوعی است که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و هدف این تحقیق می‌باشد. وجود این دیواره می‌تواند لایه برشی بین ساحل خارجی و جریان اصلی ایجاد کند که منجر به جابه‌جایی بخش اصلی جریان رودخانه به میانه رودخانه می‌شود. در نتیجه انتظار این است که منجر به تغییر در توزیع تنش برشی بستر گردد، به‌نحوی که آبستتگی پنجه ساحل به میانه رودخانه منتقل گردد. بدیهی است ساخت این‌گونه دیواره‌ها باید با قطعات سنگی درشت احداث گردد به‌طوری‌که وزن هر قطعه به تنهایی تحمل نیروهای مخرب وارده از طرف جریان‌های سیلابی را دارا باشد. از طرفی وجود چنین قطعات سنگی ممکن است در دسترس نباشد و یا تامین آن از فواصل دور با هزینه زیادی همراه باشد که در نتیجه استفاده از المان‌های بتنی می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی باشد.

یکی از المان‌های بتنی که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، قطعات بتنی شش‌پایه با نام تجاری A-Jack می‌باشد. هر یک از این قطعات از دو قطعه بتن T شکل که در وسط به هم متصل هستند، تشکیل شده که در نتیجه دارای شش پایه می‌باشد.

در سال‌های گذشته تحقیقاتی در زمینه استفاده از این قطعات به‌منظور کنترل آبستتگی در پایه پل و تکیه‌گاه پل انجام شده است از آن جمله می‌توان به مطالعه‌های Thornton et al. (1999) و Zilai و Bajestan Shafai (2016)، Zolghadr et al (2016) و Shafai Bajestan و Zolghadr (2020) اشاره

## تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک کانال قوسی ۹۰ درجه با عرض ۷۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. شعاع داخلی و خارجی قوس به ترتیب ۲/۴۵ و ۳/۱۵ متر می‌باشد، بنابراین نسبت شعاع قوس به عرض آن ( $R/B$ ) برابر چهار می‌باشد که در گروه قوس‌های ملایم به حساب می‌آید. طول دیواره‌های خارجی و داخلی قوس به ترتیب ۴/۹۵ و ۳/۸۵ متر و طول محوری آن برابر ۴/۴ متر می‌باشد. طول کانال مستقیم در بالادست قوس پنج متر و در پایین دست قوس سه متر است. به منظور کنترل سطح آب از دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شده است. نمایی از فلوم مورد استفاده در شکل (۱-a) ارائه شده است. رسوبات مورد استفاده در لایه‌ای با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر از جنس ماسه با اندازه متوسط ذرات ۱/۵ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ۱/۲۲ می‌باشد.

المان‌های شش پایه مورد استفاده در این تحقیق، از جنس بتن که مخلوطی از سیمان و ماسه بادی با نسبت یک به سه و مقدار مناسب آب است. المان‌ها با مقیاس سک به ۱۲ سازه واقعی توسط نرم‌افزار اتوکد طراحی و قالب آن تهیه شده است (به نقل از Zolghadr et al, 2016).

آزمایش‌ها در چهار دبی متفاوت ۳۰، ۳۳، ۳۶ و ۳۹ لیتر بر ثانیه (اعداد فرود ذره ۲/۵، ۲/۷۵، ۳، ۳/۲۵) با عمق ثابت ۱۱ سانتی‌متر انجام گرفته است. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شدند. دبی‌های در نظر گرفته شده معادل اعداد فرود به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ می‌باشند. در آزمایش‌های شاهد به بررسی توپوگرافی بستر بدون حضور دیواره مستغرق ساخته شده با المان‌های شش پایه و در آزمایش‌های ارزیابی به بررسی تأثیر تعداد ردیف کارگذاری دیواره‌ها (تک ردیفه، دو ردیفه، سه ردیفه) و همچنین طول نسبی قرارگیری دیواره (۰/۵، ۰/۳۳۳ و ۰/۱۶۶) پرداخته شده است.

کارگذاری المان‌ها از فاصله هفت سانتی‌متری از قوس خارجی انجام شده است و ارتفاع مؤثر قرارگیری المان‌ها چهار سانتی‌متر بود. در هر آزمایش پس از تسطیح رسوبات بستر و کارگذاری دیواره و هندسه مشخص مرتبط با هر آزمایش، ابتدا دریچه کنترل پایین دست بسته شده و جریان با دبی کمتر از ۰/۵ لیتر بر ثانیه برقرار گردید. این بده کمترین حرکت را در رسوبات ایجاد می‌نمود. با افزایش تدریجی عمق آب دریچه پایین دست به آرامی باز شده و هم‌زمان بده ورودی به فلوم افزایش یافته و به این ترتیب بده و عمق تنظیم می‌شد. پس از گذشت زمان تعادل از شروع آزمایش (چهار ساعت)، ابتدا دریچه کشویی انتهای فلوم به آرامی پایین آورده شده و سپس شیر کشویی ورودی فلوم بسته می‌شد. پس از زهکشی شدن بستر، توپوگرافی به کمک دستگاه متر لیزری با دقت ( $\pm 1/5\text{mm}$ ) برداشت گردید. در شکل (۱-b) نمایی از قرارگیری یک هندسه مشخص مشاهده می‌شود.

توسط سازه محافظت می‌شود،  $b$  عرضی از فلوم که توسط المان‌ها اشغال می‌شود،  $h$  ارتفاع المان‌ها،  $D$  فاصله کارگذاری المان‌ها از قوس خارجی،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوبی،  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی،  $\sigma_g$  انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر،  $\rho$  جرم واحد حجم مایع،  $\mu$  ضریب لزجت دینامیکی،  $V$  سرعت متوسط جریان در بازه مستقیم ورودی،  $y$  عمق جریان در بازه مستقیم بالادست قوس،  $g$  شتاب ثقل، و  $S$  طول ساحل بیرونی تعریف شده است. با استفاده از نظریه باکینگهام می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$f_1 \left( \frac{Z_m}{y}, \frac{B}{y}, \frac{R}{y}, \frac{h}{y}, \frac{D}{y}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{D_{50}}{y}, \frac{s}{y}, \frac{b}{y}, \frac{S}{y}, \frac{\rho V y}{\mu}, \frac{g y}{V^2}, S_b, T, \delta, \sigma_g \right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق، عدد بدون بعد یازدهم عدد رینولدز می‌باشد. اعداد فرود در این تحقیق به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ می‌باشند، بنابراین آزمایش‌ها در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شده است. با ترکیب اعداد بدون بعد دوم، ششم، هفتم و یازدهم، عدد فرود ذره حاصل خواهد شد. دامنه تغییرات عدد رینولدز در این تحقیق بین اعداد ۴۲۸۵۷ تا ۵۵۷۱۴ می‌باشد، که باتوجه به متلاطم بودن جریان از متغیر بی بعد عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. از طرفی ارتفاع المان‌ها ( $h$ )، فاصله قرارگیری دیواره از قوس خارجی ( $D$ )، تراکم المان‌ها ( $T$ )، انحراف معیار هندسی رسوبات ( $\sigma_g$ )، زاویه مرکزی قوس ( $\delta$ ) در طول آزمایش‌ها ثابت است، لذا از متغیرهای  $h/y$ ،  $D/y$ ،  $T$ ،  $\delta$ ،  $\sigma_g$  صرف‌نظر می‌شود. در نهایت پس از حذف متغیرهای ثابت و ترکیب متغیرهای بی بعد با یکدیگر، اعداد بدون بعد نهایی به صورت زیر است:

$$\frac{Z_m}{y} = f_2 \left( F_d, \frac{b}{B}, \frac{s}{S} \right) \quad (3)$$

که در این رابطه  $F_d$  عدد فرود ذره می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_d = \frac{V}{\left[ g D_{50} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \quad (4)$$

نسبت  $b/B$  نشان‌دهنده درصدی از عرض کانال است که توسط سازه‌ها محدود شده است و  $s/S$  نشان‌دهنده درصدی از طول ساحل بیرونی خواهد بود که توسط سازه محافظت می‌شود.

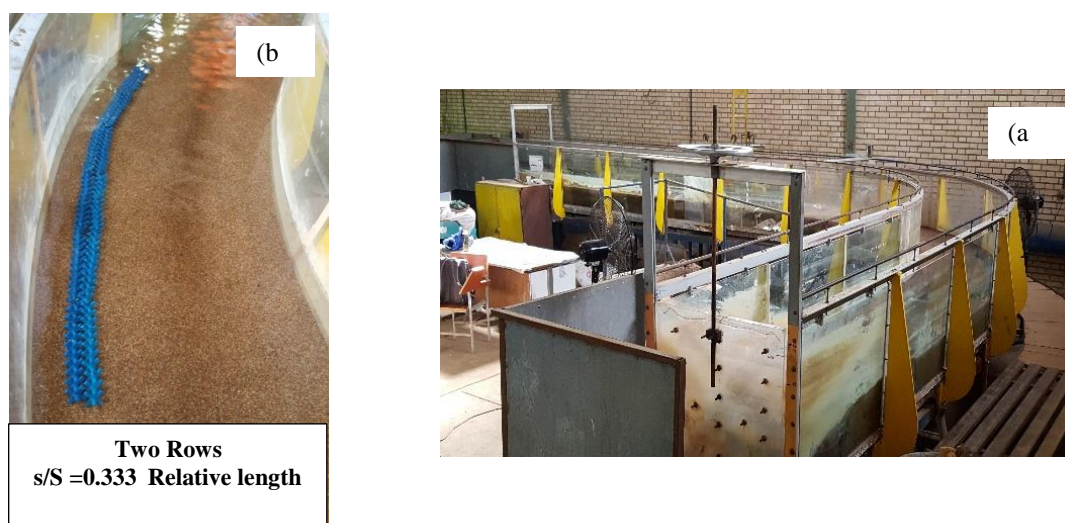


Fig. 1- a) Schematic of laboratory flume b) Schematic of the location of the submerged wall constructed by six leg elements

شکل ۱- (a) نمای از فلوم آزمایشگاهی (b) نمایی از هندسه قرارگیری دیواره ساخته شده با المان‌های شش پایه

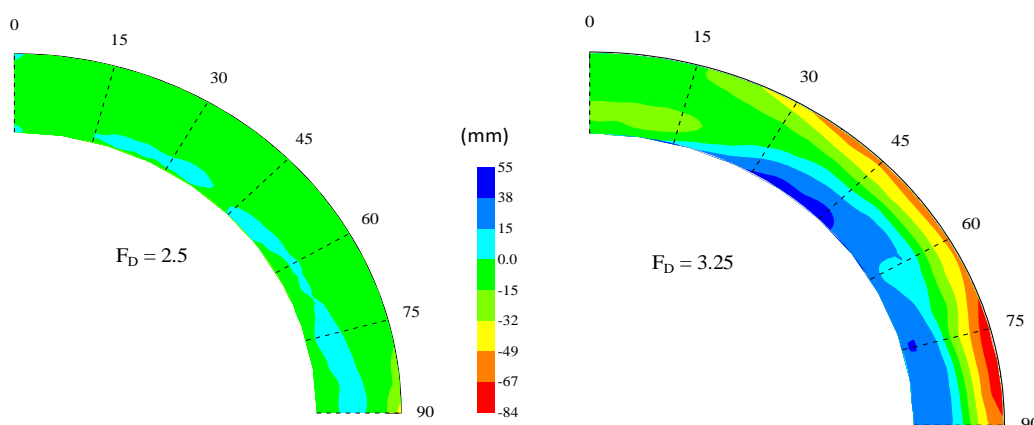


Fig. 2- The variation of the bed topography (mm) in the 90 degree mild bend in baseline experiments

شکل ۲- تغییرات توپوگرافی بستر (میلی‌متر) در قوس ملایم ۹۰ درجه در آزمایش‌های شاهد

و رسوب‌گذاری می‌شود. هم‌چنین روند تغییرات موقعیت خط‌القعر در شرایط هیدرولیکی مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که محل برخورد خط‌القعر با ساحل بیرونی با افزایش عدد فرود ذره از نواحی پایین‌دست قوس به سمت بالادست قوس تغییر پیدا می‌کند. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که در اعداد فرود ذره  $2/5$  و  $2/75$ ، محل برخورد خط‌القعر با ساحل بیرونی در محدوده دو مقطع عرضی  $75$  و  $90$  درجه می‌باشد ولی در اعداد فرود ذره  $3$  و  $3/25$  در حد فاصل مقاطع عرضی  $45$  تا  $60$  درجه می‌باشد. به‌عنوان نتیجه کلی، محدوده کلی برخورد خط‌القعر با ساحل بیرونی در آزمایش‌های شاهد این تحقیق در نیمه دوم قوس می‌باشد.

## نتایج و بحث

### خصوصیات آبستگي و رسوب‌گذاري در آزمایش شاهد

در شکل (۲) تأثیر تغییرات عدد فرود ذره ( $F_D$ ) بر تغییرات توپوگرافی بستر برای دو عدد فرود ذره نشان داده شده است. مشاهده می‌شود حداکثر آبستگي در حد فاصل دو مقطع  $75$  تا  $90$  درجه و نزدیک ساحل بیرونی رخ می‌دهد و حداکثر ارتفاع پشته رسوب‌گذاری در نیمه اول قوس و در فاصل دو مقطع  $30$  تا  $45$  درجه و نزدیک ساحل داخلی می‌باشد. با توجه به نمودار شکل (۳) مشخص است که با افزایش عدد فرود ذره مقدار حداکثر عمق آبستگي نسبی و به تبع آن ارتفاع پشته رسوبی افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش عدد فرود تنش‌های وارده به ذرات رسوبی بستر افزایش پیدا می‌کند و باعث افزایش آبستگي

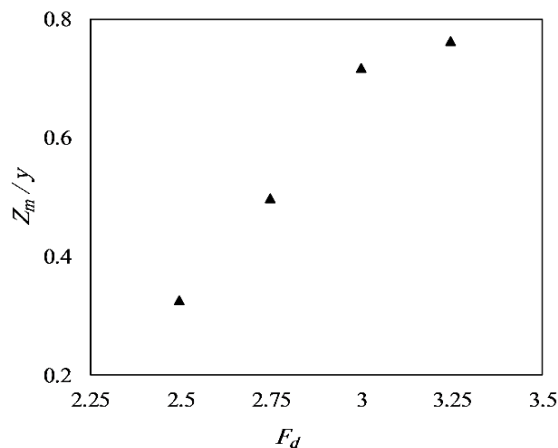


Fig. 3- Changes of the maximum relative scour depth in different hydraulic conditions

شکل 3- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بدون بعد در شرایط هیدرویکی مختلف

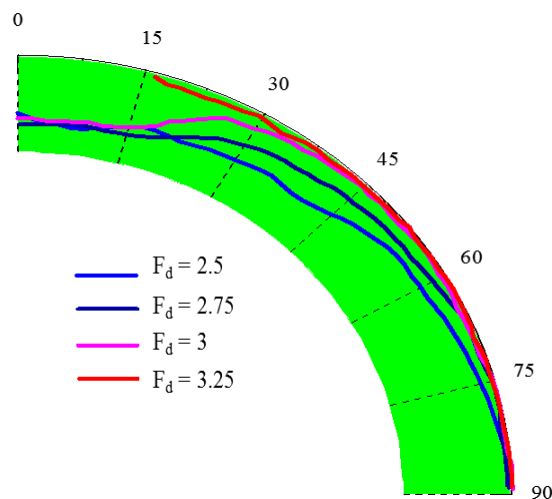


Fig. 4- The changes of the location of Thalweg in 90 Degree mild bend in different hydraulic conditions

شکل 4- تغییرات موقعیت خط القعر در قوس 90 درجه ملایم در شرایط هیدرویکی مختلف

را محافظت کند و موجب دور شدن خط القعر از ساحل بیرونی شده است. در اعداد فرود ذره 2/5، 2/75، 3 و 3/25 باعث کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان 22، 23، 27 و 22 درصد شده است. با افزایش عدد فرود ذره مشاهده می شود که درجه تأثیر سازه در بالادست و در حد فاصل دو مقطع 30 تا 45 درجه کمتر بوده و آبشستگی در نزدیک ساحل بیرونی رخ داده است. ولی در مقایسه با آزمایش های شاهد به ترتیب برای اعداد فرود ذره 3 و 3/25 حدود 31 و 23 درصد کاهش را نشان می دهد.

**طول نسبی s/S=0.333**

همان طور که از شکل (c-d, 5) مشاهده می شود دیواره مستغرق توانسته به طور موثری ساحل بیرونی را در حد فاصل دو مقطع 60 تا 90 درجه در مقایسه با آزمایش های شاهد در حدود 100 درصد در مقابل آبشستگی محافظت کند. با افزایش شرایط

**خصوصیات آبشستگی و رسوب گذاری در آزمایش های**

**ارزیابی**

**آزمایش تک ردیفه**

در شکل (5) الگوی فرسایش و رسوبگذاری پیرامون دیواره مستغرق تک ردیفه ( $b/B = 0.64$ ) در سه طول نسبی 0/5، 0/333 و 0/166 به ازای اعداد فرود ذره مختلف 2/5 و 3/25 نشان داده شده است.

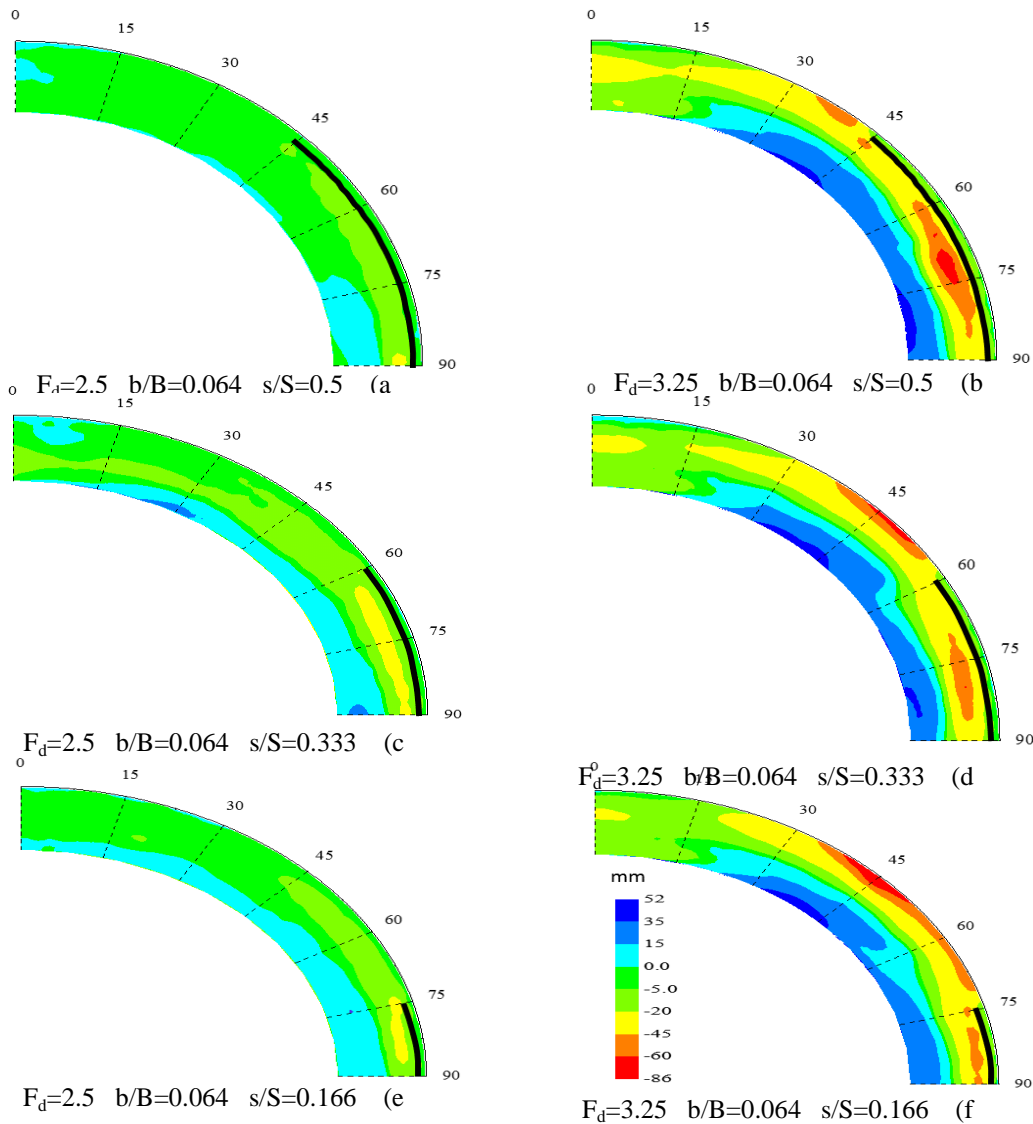
**طول نسبی s/S=0.5**

همان طور که در شکل (a, b- 5) مشاهده می شود در این طول نسبی، چاله آبشستگی از ابتدای دیواره تشکیل و به موازات سازه تا پایین دست ادامه پیدا می کند. در مقایسه با آزمایش های شاهد مشاهده می شود، دیواره توانسته به طور کامل ساحل بیرونی

**طول نسبی  $s/S=0.166$**

همان طور که در شکل (e, f) مشاهده می شود بر خلاف طول های نسبی  $0/5$  و  $0/333$ ، حداکثر آبخستگی در اعداد فرود ذره بالا در محدوده سازه تشکیل نشده و در بالادست آن رخ داده است که این امر خطر تخریب ساحل بیرونی را بسیار افزایش می دهد. بنابراین دیواره مستغرق با طول کوتاه فقط در شرایط پایین جریان (عدد فرود ذره کمتر از  $2/5$ ) و برای بخش کوتاهی از قوس  $90$  درجه ملایم می تواند عملکرد محافظتی داشته باشد و در اعداد فرود ذره  $2/75$  و  $3$  در مقایسه با آزمایش شاهد حداکثر عمق آبخستگی کاهش معناداری پیدا نکرده و در عدد فرود ذره  $3/25$  در مقایسه با آزمایش شاهد حداکثر عمق آبخستگی افزایش پیدا کرده است.

جریان، تأثیر سازه بر بالادست خود تا حدودی کاهش یافته و آبخستگی از نزدیک ساحل بیرونی شروع شده است ولی در ادامه با نزدیک شدن به سازه، به میانه کانال تغییر مسیر داده و در راستای دیواره به سمت پایین دست ادامه پیدا کرده است. مقدار آبخستگی در بالادست سازه در مقایسه یا آزمایش های شاهد متناظر کمتر بوده به طوری که در اعداد فرود  $2/5$ ،  $3$  و  $3/25$  به ترتیب  $41$ ،  $36$  و  $25$  درصد کاهش یافته است. مقایسه حداکثر عمق آبخستگی نشان می دهد که دیواره مستغرق در اعداد فرود ذره  $2/5$ ،  $2/75$ ،  $3$  و  $3/25$  باعث کاهش حداکثر عمق آبخستگی به میزان  $13$ ،  $20$ ،  $21$  و  $15$  درصد شده است. همان طور که مشاهده می شود عملکرد دیواره مستغرق با طول نسبی  $0/5$  نسبت به دیواره با طول نسبی  $0/333$  بهتر می باشد.



**Fig.5- Bed topography changes for one row submerged wall In three different lengths (0.5, 0.333 and 0.166) and particle Froud numbers 2.5 and 3.25**

شکل ۵ - تغییرات توپوگرافی بستر برای دیواره های مستغرق تک ردیفه ( $b/B=0/064$ ) در سه طول نسبی مختلف ( $0/5$ )،  $0/333$  و  $0/166$ ) و اعداد فرود ذره  $2/5$  و  $3/25$



یافته و آبستنگی از نواحی نزدیک به ساحل آغاز شده است ولیکن در مقایسه با آزمایش‌های شاهد مقدار آبستنگی در اعداد فرود سه و  $3/25$  به ترتیب ۱۵ و ۱۸ درصد کاهش یافته است. مقایسه بین حداکثر عمق آبستنگی در این آزمایش‌ها نشان می‌دهد دیواره مستغرق به ترتیب در اعداد فرود  $2.3/2.75/5$  و  $3/25$  باعث کاهش حداکثر عمق آبستنگی به میزان ۱۱، ۴، ۱۵ و ۸ درصد شده است.

#### طول نسبی $s/S=0.166$

در شکل (۶- e,f) ملاحظه می‌شود در تمامی اعداد فرود دیواره مستغرق توانسته به‌طور موثری آبستنگی بین دیواره و ساحل بیرونی را محافظت کند به طوری که می‌تواند از نقطه نظر کاربردی با اطمینان زیادی مورد استفاده قرار گیرد. در عدد فرود  $2/5$ ، آبستنگی در بالادست سازه توسعه پیدا نکرده و عملکرد سازه قابل قبول است ولی با افزایش شرایط جریان تأثیر سازه بر بالادست افزایش می‌یابد. برخلاف طول‌های نسبی  $0/5$  و  $0/333$ ، حداکثر عمق آبستنگی در محدوده سازه تشکیل نشده است و در بالادست آن رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد دیواره مستغرق دوردیفه با طول کوتاه فقط در شرایط پایین جریان (عدد فرود ذره کمتر از  $2/5$ ) می‌تواند بخش کوتاهی از قوس را محافظت کند. مقایسه حداکثر عمق آبستنگی با آزمایش‌های شاهد نشان می‌دهد مقدار آبستنگی کاهش معناداری پیدا نکرده و در عدد فرود  $3/25$  حداکثر آبستنگی به میزان ۱۵ درصد افزایش پیدا کرده است.

#### آزمایش دوردیفه

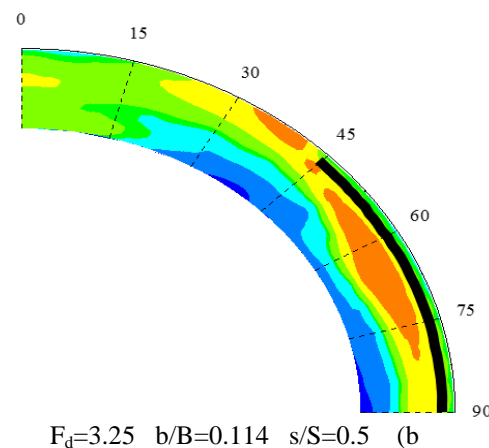
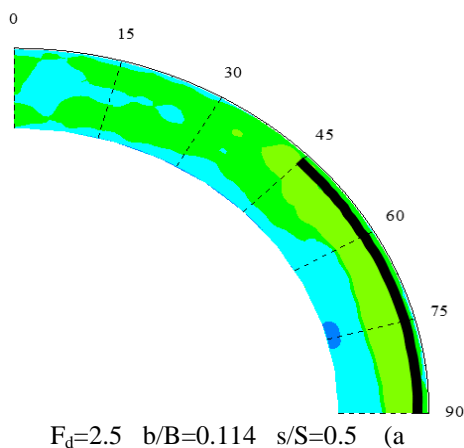
در شکل (۶) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون دیواره مستغرق دوردیفه ( $b/B = 0/114$ ) در سه طول نسبی  $0/5$ ،  $0/333$  و  $0/166$  به ازای اعداد فرود ذره مختلف  $2/5$  و  $3/25$  نشان داده شده است.

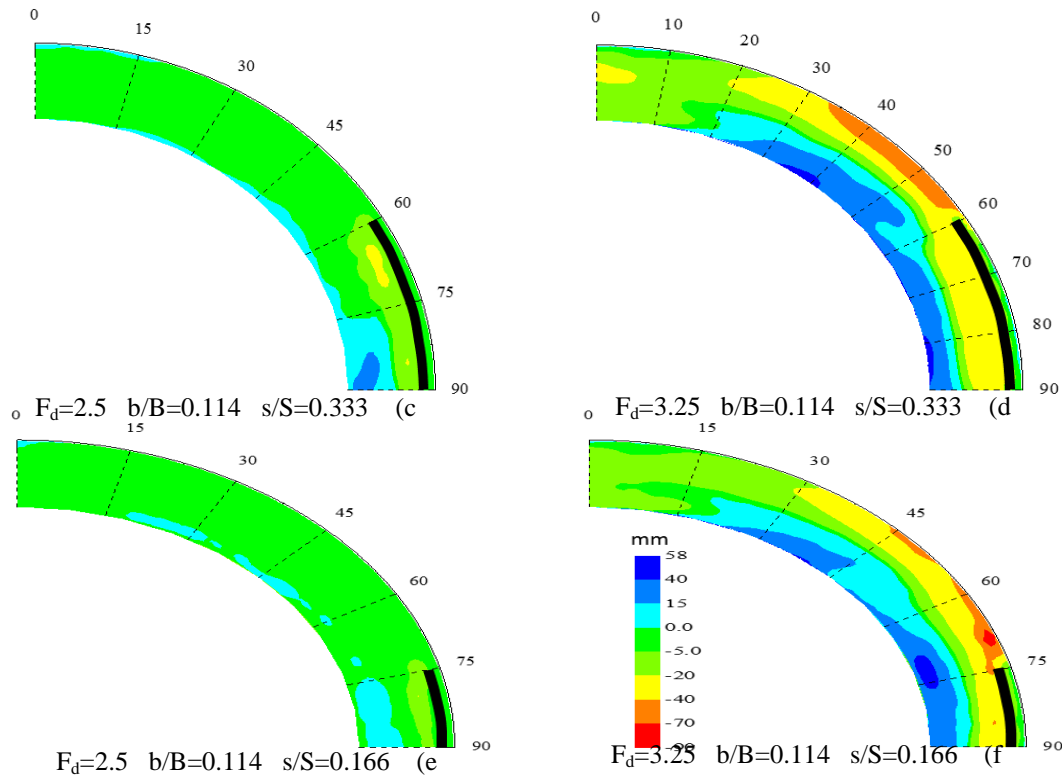
#### طول نسبی $s/S=0.5$

در شکل (۶- a,b) مشاهده می‌شود در تمامی اعداد فرود ذره، در مقایسه با آزمایش‌های شاهد دیواره مستغرق توانسته باعث کاهش مقدار آبستنگی بین دیواره و ساحل بیرونی بین ۹۵ تا ۱۰۰ درصد شود. در اعداد فرود  $2/5$  و  $3/25$ ، چاله آبستنگی مشابه آزمایش‌های تک ردیفه از ابتدای دیواره تشکیل شده و به موازات سازه ادامه می‌یابد ولیکن با افزایش عدد فرود ذره به سه و  $3/25$  درجه تأثیر سازه در بالادست کمتر بوده و آبستنگی در نزدیک ساحل بیرونی رخ داده است. مقدار آبستنگی در این ناحیه در مقایسه با آزمایش‌های شاهد به ترتیب حدود ۲۱ و ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین دیواره مستغرق دوردیفه در اعداد فرود  $2/5$ ،  $3/25$ ،  $3/25$ ،  $3/25$  به ترتیب باعث کاهش حداکثر عمق آبستنگی به میزان  $20$ ،  $10$ ،  $11$  و  $17$  درصد شده است.

#### طول نسبی $s/S=0.333$

همان‌گونه که در شکل (۶- c,d) مشاهده می‌شود، در تمامی اعداد فرود ذره، مقدار آبستنگی بین سازه و ساحل بیرونی بسیار ناچیز بوده و در مقایسه با آزمایش‌های شاهد حدود ۱۰۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. با افزایش اعداد فرود ذره به مقدار سه و  $3/25$  مشاهده می‌شود تأثیر دیواره بر نواحی بالادست کاهش





**Fig. 6- Bed topography changes for two row submerged wall In three different relative lengths (0.5, 0.333 and 0.166) and particle Fround numbers 2.5 and 3.25**

شکل ۶ - تغییرات توپوگرافی بستر برای دیواره‌های مستغرق دو ردیفه ( $b/B=0.114$ ) در سه طول نسبی مختلف (۰/۵)،  $۳/۲۵$  و  $۲/۵$  و اعداد فرود ذره  $۰/۱۶۶$  و  $۰/۳۳۳$

#### طول نسبی $s/S=0.333$

در شکل (c, d) نتایج حاصل از قرارگیری دیواره مستغرق سه ردیفه با طول نسبی  $۰/۳۳۳$  نشان می‌دهد به غیر از عدد فرود ذره  $۳/۲۵$  فرسایشی که منجر به تخریب ساحل بیرونی شود رخ نداده است و مقدار آبشستگی در این عدد فرود در بالادست سازه در مقایسه با آزمایش شاهد کاهش هفت درصدی داشته است. در مقایسه با آزمایش‌های شاهد، دیواره مستغرق در اعداد فرود  $۲/۵$  و  $۲/۷۵$  باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی به میزان  $۱۹$  و  $۱۲$  درصد شده و در اعداد فرود  $۳$  و  $۳/۲۵$  تغییر معناداری نکرده است.

#### طول نسبی $s/S=0.166$

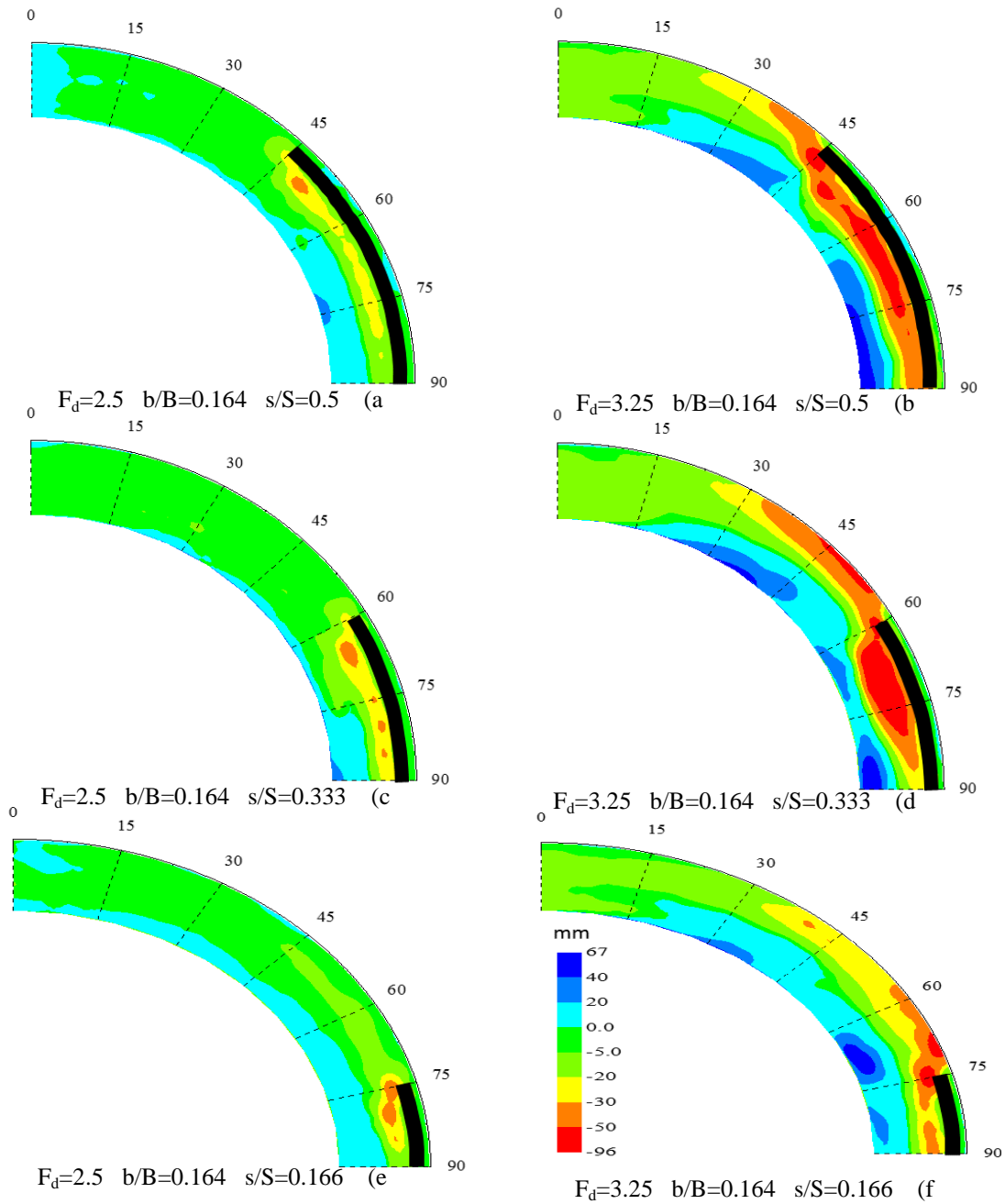
آزمایش‌های تک و دو ردیفه در شرایط مختلف جریان نشان دادند که با کاهش طول دیواره عملکرد حفاظتی آن کاهش می‌یابد چرا که خط‌القعر در بالادست سازه با ساحل بیرونی برخورد می‌کند. با توجه به شکل (e, f) ملاحظه می‌شود که در حالت سه‌ردیفه هم عملکرد سازه در این طول نسبی فقط در محدوده بین سازه و ساحل بیرونی موفق بوده و در بالادست آن خط‌القعر به ساحل بیرونی رسیده است. بنابراین چنانچه هدف حفاظت ناحیه کوتاهی از قوس به ویژه در نیمه اول قوس یا اول نیمه دوم قوس باشد، این طول سازه می‌تواند موثر واقع شود.

#### آزمایش سه ردیفه

در شکل (g) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون دیواره مستغرق سه ردیفه ( $b/B=0.166$ ) در سه طول نسبی  $۰/۵$ ،  $۰/۳۳۳$  و  $۰/۱۶۶$  به ازای اعداد فرود ذره مختلف  $۲/۵$  و  $۳/۲۵$  نشان داده شده است.

#### طول نسبی $s/S=0.5$

نتایج شکل (a, b) نشان می‌دهد که در سه عدد فرود ذره  $۲/۷۵$ ،  $۲/۵$  و سه چاله آبشستگی از ابتدای دیواره تشکیل شده ولیکن در عدد فرود ذره  $۳/۲۵$  بخشی از ساحل بیرونی بالادست دچار فرسایش موضعی شده است که در مقایسه با آزمایش شاهد مقدار این آبشستگی  $۲۵$  درصد کمتر است. همچنین در اعداد فرود ذره  $۲/۷۵$ ،  $۲/۵$  و  $۳$  موقعیت حداکثر عمق آبشستگی به ابتدای سازه و حد فاصل  $۴۵$  و  $۶۰$  درجه تغییر پیدا کرده است ولی در عدد فرود ذره  $۳/۲۵$  کمی پایین‌تر و مابین  $۶۰$  و  $۷۵$  درجه است. مقایسه حداکثر عمق آبشستگی با آزمایش‌های شاهد نشان می‌دهد در اعداد فرود ذره  $۲/۷۵$  و  $۲/۵$  افزایش  $۱۳$  و  $۳$  درصدی و در اعداد فرود ذره  $۳$  و  $۳/۲۵$  کاهش  $۱۰$  درصدی عمق آبشستگی رخ داده است.



**Fig.7- Bed topography changes for three row submerged wall In three different relative lengths (0.5, 0.333 and 0.166) and particle Froud numbers 2.5 and 3.25**

شکل ۷ - تغییرات توپوگرافی بستر برای دیواره‌های مستغرق سه ردیفه در سه طول نسبی مختلف (۰/۱۶۶ و ۰/۳۳۳ و ۰/۵) و اعداد فرود ذره ۲/۵ و ۳/۲۵

دلیل این امر این است با افزایش عرض سازه، سطح مقطع عبور جریان کاهش می‌یابد و منجر به افزایش سرعت جریان و تنش برشی اعمال شده به بستر می‌شود. شکل (۹) نیز نشان می‌دهد برای یک مقدار ثابت از عرض نسبی دیواره، با افزایش طول نسبی دیواره حداکثر عمق آبستگي کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر این است که هر چقدر طول دیواره بیشتر می‌شود، توانایی آن در

با بررسی مقدار حداکثر عمق آبستگي در شرایط مختلف جریان تأثیر تغییرات عرض و طول نسبی دیواره بر حداکثر عمق آبستگي در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر عمق آبستگي با افزایش شرایط جریان در همه حالت‌های دیواره مستغرق افزایش می‌یابد. شکل (۸) نشان می‌دهد برای یک مقدار ثابت از طول نسبی، با افزایش عرض نسبی دیواره حداکثر عمق آبستگي نسبی افزایش پیدا می‌کند.

$$\frac{Z_m}{y} = 0.044 \left( \frac{b}{B} \right)^{0.223} \left( \frac{s}{S} \right)^{-0.21} F_d^{2.612} \quad (5)$$

ضریب  $R^2$  معادله فوق برابر ۰/۹۵ محاسبه شد. همچنین درصد متوسط خطای مطلق معادله نیز برابر ۵/۱ درصد محاسبه شد.

شکل (۱۰) مقایسه حداکثر عمق آبستگي نسبي آزمایشگاهی و محاسباتی از معادله (۵) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تنها چهار داده از مجموع ۳۶ داده خارج از محدوده خطای ۱۵ درصد می‌باشد و نشان‌دهنده دقت معادله می‌باشد.

دور کردن جریان ثانویه اصلی شکل گرفته افزایش پیدا می‌کند و بدین ترتیب باعث کاهش مقدار آبستگي می‌شود.

در بخش آنالیز ابعادی، متغیرهای هیدرولیکی و طراحی تأثیرگذار بر تغییرات حداکثر عمق آبستگي نسبی مورد بررسی قرار گرفت و توسط معادله (۳) بیان شد.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و معادله (۳) و با استفاده از نرم افزار SPSS نحوه تأثیر هر کدام از متغیرها تعیین شد و معادله زیر برای محاسبه حداکثر عمق آبستگي در حضور دیواره مستغرق در قوس ۹۰ درجه به دست آمد:

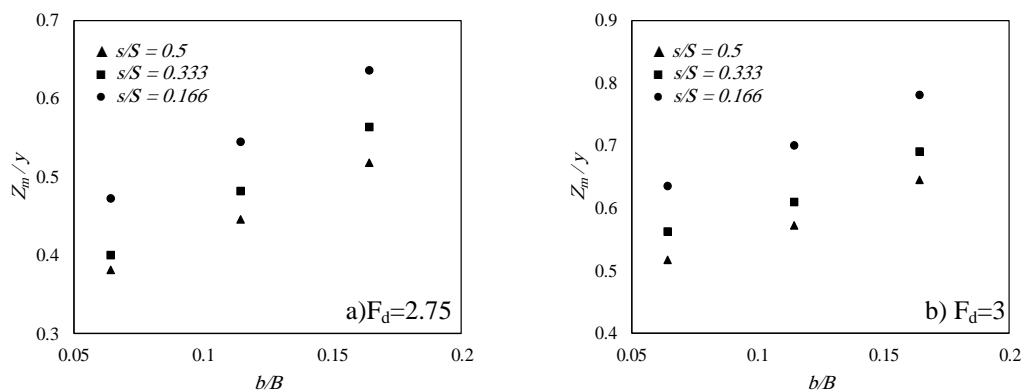


Fig. 8- Changes in the relative width of the submerged wall over the maximum scour depth

شکل ۸- تغییرات عرض نسبی دیواره مستغرق بر حداکثر عمق آبستگي

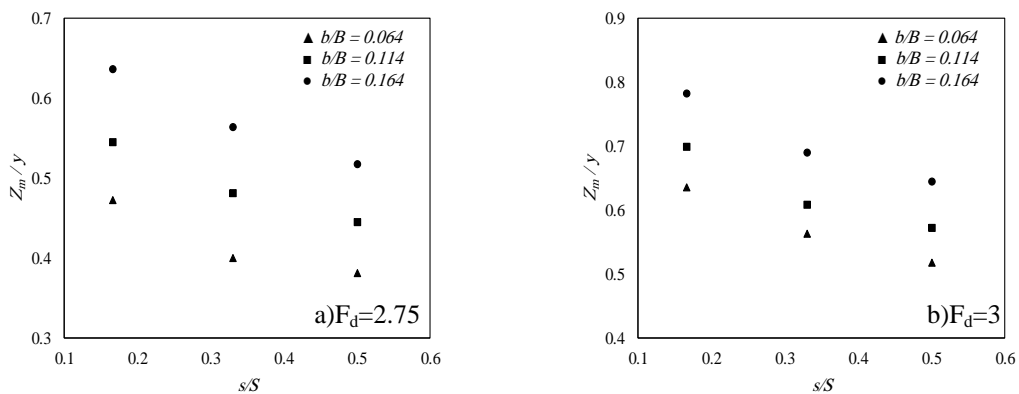


Fig. 9- Changes in the relative length of the submerged wall over the maximum scour depth

شکل ۹- تغییرات طول نسبی مستغرق بر حداکثر عمق آبستگي

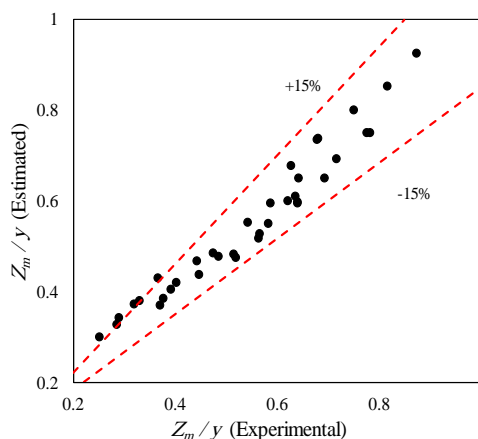


Fig. 10- Comparison of experimental and estimated data

شکل ۱۰- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی

نسبت به ساحل بیرونی فقط برای اعداد فرود ذره کمتر از ۲/۵ و برای حفاظت بخش کوتاهی از قوس توجیه‌پذیر است. مقایسه تعداد ردیف هم نشان داد در مقایسه با دیواره‌های تک ردیفه و دو ردیفه، مقدار آبستگي در حالت سه ردیفه افزایش پیدا کرده است و دلیل آن کاهش سطح مقطع عبوری جریان و در ادامه افزایش سرعت و تنش وارده بر رسوبات است.

#### تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر با کمک مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم به شماره Scw-wh1400.470 انجام گردیده است. بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌منظور تأمین هزینه‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

در تمامی آزمایش‌های ارزیابی این تحقیق، آبستگي بین دیواره مستغرق و ساحل بیرونی ناچیز بوده و دیواره توانسته آبستگي ساحل بیرونی را در مقایسه با آزمایش شاهد حدود ۱۰۰ درصد کاهش دهد و موجب دور شدن خط‌القعر از ساحل بیرونی شده است. با افزایش عدد فرود ذره، موقعیت حداکثر عمق آبستگي به سمت بالادست سازه تغییر کرده و می‌تواند پایداری ساحل بیرونی را به مخاطره بیندازد ولی در ادامه به‌دلیل حضور تأثیر سازه و تأثیر آن، به سمت میانه کانال تغییر مسیر داده و در راستای دیواره به سمت پایین دست ادامه پیدا کرده است. همان‌طور که مشاهده شد عملکرد دیواره مستغرق با طول نسبی ۰/۵ نسبت به دیواره با طول نسبی ۰/۳۳۳ بهتر می‌باشد. همچنین استفاده از دیواره مستغرق با طول نسبی کم (۰/۱۶۶)

#### References

- 1- Atashi, V., Shafai Bejestan, M. and Golrokh, I., 2016. Experimental study of the effect of W-weir on reduction of scour depth at 90 degree sharp bend. *Journal of Water and Soil, Ferdowsi University of Mashhad*, 30(2), pp.392-404. DOI: 10.22067/JSW.V30I2.39431. (In Persian).
- 2- Bahrami Yarahmadi, M. and Shafai Bejestan, M., 2016a. Sediment management and flow patterns at river bend due to triangular vanes attached to the bank. *Journal of Hydro Enviromental Research*, 10, pp.64-75. DOI: 10.1016/j.jher.2015.10.002.
- 3- Bahrami Yarahmadi, M. and Shafai Bejestan, M., 2016b. Study of the effect of length variations of triangular-shaped vanes on erosion and sedimentation patterns in a 90° mild bend. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*. 27(1), pp.87-100. Doi: 10.22067/civil.v27i1.24565 (In Persian).
- 4- Blanckaert, K. and Graf, W.H., 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10), pp.835-847. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:10(835).
- 5- Blanckaert, K. and De Vriend, H.J., 2004. Secondary flow in sharp open-channel bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 498, pp.353-380. DOI: 10.1017/S0022112003006979.
- 6- Blanckaert, K., 2010. Topographic steering flow recirculation, velocity redistribution and bed topography in sharp meander bends. *Water Resources Research*, 46(9), pp. 231-245. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009WR008303>.

- 7- Da Silva, A.M.F., El-Tahawy, T. and Tape, W.D., 2006. Variation of flow pattern with sinuosity in sine-generated meandering streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), pp.1003-1014. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:10(1003).
- 8- Ferro, V., Shokrian Hajibehzad, M., Shafai-Bejestan, M. and Kashefipour, S.M., 2019. Scour around a permeable groin combined with a triangular vane in river bends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145 (3). pp.04019003(1-12). DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001380
- 9- Jarrahzade F. and Shafai-Bejestan. M. 2011. Comparison of maximum scour depth in Bank line and nose of submerged weirs in a sharp bend. *Scientific Research and Essays*. 6(5). pp. 1071-1076.
- 10-Jarrahzade, F., Kashefipour, S.M. and Shafai-Bejestan, M. 2017. The effects of permeable, impermeable and bandal-like spur-dike angel on geometric dimensions of scouring in submerged conditions. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, pp.1-14. DOI: 10.22055/jise.2017.13153. (In Persian).
- 11-Kashyap, S., Constantinescu, G., Rennie, C.D., Post, G. and Townsend, R., 2012. Influence of channel aspect ratio and curvature on flow, secondary circulation and bed shear stress in a rectangular channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(12). pp.1045-1059. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000643.
- 12-Khalifehei, K., Aziziyani, Gh.R., Shafai Bejestan, M. and Chau, K.W., 2020. Stability of A-Jack concrete block armors protecting the riverbeds. *Ain Shams Engineering Journal*. DOI: 10.1016/j.asej.2020.04.018
- 13-Odgaard, A.J. and Bergs, M.A., 1988. Flow processes in a curved alluvial channel. *Water Resources Research*, 24(1), pp.45-56. DOI: 10.1029/WR024i001p00045.
- 14-Pourmansouri, R., Shafai Bejestan. M. and Bahrami Yarahmadi, M., 2020. Investigation of the effect of the immersed vanes angle on scouring around the bridge abutment. *Jornal of Water and Soil Conservation*, 26(5). pp. 77-93. DOI: 10.22069/JWSC.2019.16010.3124. ( In Persian).
- 15-RashkiGhalehNou, M., Azhdary –Moghaddam, M., Shafai Bajestan, M. and Azmathulla, H.M., 2020. Control of bed scour downstream of ski-jump spillway by combination of six-legged concrete elements and riprap, *Ain Shams Engineering Journal*. pp.1-13. DOI: 10.1016/j.asej.2020.01.009.
- 16-Rezania, A.R., Shafai-Bejestan, M. and Kashefipour, S. M., 2009. Experimental investigation on the effects of horizontal footing on topography of bed in 90 bend. *Journal of Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 3(6). pp.27-38. (In Persian).
- 17-Rozovskiĭ, I.L., 1957. *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, *Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering*.
- 18-Shukry, A., 1950. Flow around bends in an open flume. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 115(1), pp.751-778. DOI: 10.1061/TACEAT.0006426.
- 19-Thornton, C.I., Watson, C.C., Abt, S.R., Lipscomb, C.M. and Ullman, C.M., 1999. Laboratory testing of A-Jacks units for inland applications: pier scour protection testing. *Colorado State University research report for Armortec Inc. February*.
- 20-Thornton, C.I., Abt, S.R. and Watson, C.C., 2001. Field Assessment of A-Jacks Installation, A Case Study of Brush Creek, Kansas City, Missouri, and Powell Creek, Waukegan, Illinois. In *Wetlands Engineering & River Restoration 2001* (pp. 1-8). DOI: 10.1061/40581(2001)58.
- 21-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. American Society of Civil Engineers*, 138(5). pp.471-474. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000536.

- 
- 22-Zilai, Z. and Shafai Bajestan, M., 2016. Effects of six-leg elements row quantity on reduction of cubic bridge pier scour depth. *Journal of Water and Soil science*, 26(4.2). pp 187-200. (In Persian).
- 22- Zolghadr, M., Shafai Bajestan, M. and Rezaeianzadeh, M., 2016. Investigating the effect of six-legged element placement density on local scour at wing-wall bridge abutments. *World Environmental and Water Resources Congress. Florida. USA: West Palm Beach*, pp.28-36. DOI: 10.1061/9780784479872.004.
- 23- Zolghadr, M. and Shafai Bajestan, M., 2020. Six legged concrete (SLC) elements as scour countermeasures at wing wall bridge abutments. *International Journal of River Basin Management*. DOI: 10.1080/15715124.2020.1726357.