

## Effect of Various Spur Dikes Arrangement on Water Depth Changes in Gradually Varied Flow Condition

SHABNAM MOGHISPOUR<sup>1</sup>, SALAH KOUCHAKZADEH<sup>2\*</sup>

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Feb. 24, 2021- Revised: May. 28, 2021-Accepted: May. 29, 2021)

### ABSTRACT

River spur dikes are constructed for achieving different goals and researches are concentrated on investigation of their performances regarding the desired goals. While they show drastic impact on the flow hydraulic conditions in waterways including water surface elevation which still need further investigation and should be treated seriously. The objective of this study was to investigate the effect of spur dikes on water surface elevation variation. For this purpose, 18 different arrangements of spur dikes installation were experimentally studied. The tests were run for seven discharges in the range of 12 to 70 liters per second and by measuring and recording the longitudinal and transverse water depth along the channel. The spur dikes arrangement consists of eight unilateral arrangements and ten two-way symmetrical and asymmetrical arrangements. The results indicated that the water level increased in the upstream while it decreased at the downstream down to a specific length. The increment of the upstream water level was associated to the exerted drag force on the spur dike; accordingly, a nonlinear equation was proposed to estimate the drag coefficient of the single spur dike. The data also showed that the rate of upstream water level increment has increased by increasing flow discharge for all arrangements, while the length of the downstream, which is affected by the spur dikes, in two-way arrangement is depended on discharge while it is independent in one-way arrangement. The effect of spur dikes arrangement and flow conditions on the transverse water level has also been presented.

**Keywords:** Affected Length, Backwater, Drag Force, River Training, Transverse Structure.

---

\* Corresponding Author's Email: [skzadeh@ut.ac.ir](mailto:skzadeh@ut.ac.ir)

## تأثیر آرایش مختلف آبشکن‌ها بر تغییرات عمق آب در شرایط جریان متغیر تدریجی

شبنم مغیث‌پور<sup>۱</sup>، صلاح کوچک‌زاده<sup>\*</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۸)

### چکیده

آبشکن‌ها برای تأمین اهداف گوناگون در رودخانه احداث می‌شوند و پژوهش‌های صورت گرفته بر بررسی عملکردشان در تأمین اهداف مورد نظر متمرکز می‌شوند. در حالی که احداث آبشکن‌ها در آبراهه‌ها بر شرایط هیدرولیکی جریان از جمله عمق یا تراز سطح آب بالادست تأثیر جدی دارند و این موضوع همچنان نیازمند مطالعه است. در این پژوهش که با هدف بررسی نقش آبشکن بر تغییرات تراز سطح آب صورت گرفت، تعداد ۱۸ آرایش مختلف از آبشکن‌ها در دامنه دبی ۱۲ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه و با ثبت عمق آب در طول و عرض کانال آزمون شد. آرایش آبشکن‌ها شامل هشت آرایش یکطرفه و ده آرایش دو طرفه متقارن و نامتقارن است. نتایج بیانگر افزایش عمق آب در بالادست و کاهش آن در طول مشخصی از پایین‌دست میدان آبشکن‌ها است. از آنجا که افزایش عمق یا تراز سطح آب بالادست سازه به نیروی کششی مربوط است، یک معادله غیر خطی برای برآورد ضریب این نیرو برای آبشکن منفرد ارائه شد. همچنین داده‌ها نشان داد که در همه آرایش‌ها نرخ افزایش عمق آب بالادست، با افزایش دبی زیاد شده است. در حالی که طول تأثیر بر نیم‌رخ سطح آب پایین‌دست آبشکن‌ها در آرایش دو طرفه تابع دبی است؛ اما در آرایش یکطرفه مستقل از آن است. همچنین تأثیر آرایش آبشکن‌ها و شرایط جریان بر پروفیل عرضی سطح آب در عرض فلوام ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** اصلاح مسیر رودخانه، برگشت آب، سازه عرضی، طول تأثیر، نیروی کششی.

### مقدمه

آبشکن‌ها سازه‌های عرضی هستند که با اهدافی از قبیل کنترل سیلاب، حفاظت دیواره‌های رودخانه از فرسایش، بهبود شرایط کشتیرانی و تثبیت مسیر آبراهه احداث می‌شوند (Azinfar and Kells, 2007; Kuhnle et al., 2008; Pandey et al., 2018; Yossef, 2002). همچنین در سال‌های اخیر تأثیر این سازه بر بهبود زیستگاه آبزیان نیز مورد توجه قرار گرفته است (Im and Kang, 2011; Ma et al., 2020)؛ اما با وجود کاربرد گسترده آبشکن‌ها به دلیل مزایای آن‌ها، هنوز مقدار و چگونگی تأثیرشان بر تغییر تراز سطح آب آبراهه‌ها در جریان پایه و زمان رخداد سیلاب مورد سؤال است و در این خصوص میان محققان اتفاق نظر وجود ندارد. علت افزایش تراز سیلاب در رودخانه‌های راین در اروپا و Yellow River در چین به ساخت آبشکن‌ها نسبت داده شده است (Beiz et al., 2001; Wu et al., 2005). همچنین، بخشی از افزایش تراز سیلاب در رودخانه‌های می‌سی‌سی‌پی و میزوری در آمریکا را نیز ناشی از ساخت آبشکن‌ها دانسته‌اند (Pinter et al., 2001; Criss and Shock, 2001). این در حالی است که رسته مهندسين ارتش آمریکا (USACE) بیان می‌کند

که در جریان‌های کم، آبشکن‌ها با انحراف جریان به درون کانال اصلی رودخانه می‌سی‌سی‌پی، موجب کاهش تراز سطح آب رودخانه می‌شوند و در زمان سیلاب به علت استغراق کامل، بر تراز سیلاب تأثیری ندارند (USGAO, 2011). Huthoff et al. (2013) با ارائه یک تحلیل تئوری در مورد رودخانه می‌سی‌سی‌پی بیان کردند که احداث آبشکن ممکن است منجر به کاهش تراز سطح آب برای جریان‌های کمتر از سیلاب و افزایش آن برای جریان‌های سیلابی شود. با توجه به عدم اتفاق نظر و همچنین کمبود داده‌ها، U.S. Government Accountability Office (U.S. GAO) (2011) در گزارشی توصیه کرد که مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتری برای تعیین تأثیر سازه‌هایی مانند آبشکن بر تراز سیلاب انجام شود. با این وجود هنوز مطالعات آزمایشگاهی لازم در مورد افزایش عمق (یا تراز سطح) آب در اثر استفاده از آبشکن‌ها انجام نشده است. Ohmoto et al. (2002) با بررسی آبشکن‌های غیر مستغرق نشان دادند که برای نسبت‌های زوج فاصله به طول آبشکن، تغییرات سطح آب در عرض فلوام افزایش می‌یابد و برای نسبت‌های فرد این تغییرات کاهش می‌یابد. این نتیجه‌گیری فقط

## مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش یک فلوم مستطیلی با عرض ۸۰۰ میلی‌متر و عمق ۶۰۰ میلی‌متر در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران احداث شد (شکل ۱). این فلوم که طول آن دوازده متر است، از اتصال ۱۲ ماژول یک متری ساخته شد. قاب ماژول‌ها از پروفیل آهنی احداث شد و با ورق گالوانیزه پوشش یافت. فلوم و دو مخزن ورودی و خروجی آن بر روی یک سکوی یک پارچه شیب‌پذیر نصب شد. به‌منظور ثبت اعماق آب در امتداد طولی و عرضی فلوم، ۱۲۰ عدد پیزومتر به کف فلوم وصل شد. یک لوله فولادی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر آب را از یک مخزن هوایی با هد ثابت به مخزن ورودی به فلوم منتقل می‌کرد. دبی جریان ورودی به مخزن بالادست فلوم با استفاده از دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت نیم درصد مقیاس کامل اندازه‌گیری شد. برای ثبت عمق آب عکس‌برداری رقومی با قدرت تفکیک بالا از تابلو پیزومتری صورت گرفت که امکان ثبت عمق آب را با دقت یک صدم میلی‌متر فراهم کرد. علاوه بر آن، از ۲۳ عدد ترانسیمتر فشار در طول و عرض فلوم نیز استفاده شد. با توجه به هیدرواستاتیک بودن توزیع فشار، مقادیر فشار اندازه‌گیری شده بیانگر عمق جریان است. برای بررسی تغییرات عمق آب در عرض فلوم در بالادست، پایین‌دست و میدان آبشکن‌ها، در چهار ماژول از فلوم، پیزومترها در سه ردیف نصب شدند. این سه ردیف شامل محور مرکزی فلوم و دو محور قرینه نسبت به آن است.

آبشکن‌ها از صفحات فیبر شیشه با ضخامت ۱۰، طول ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر ساخته شده و در ۱۸ آرایش مختلف یکطرفه، دو طرفه متقارن و دو طرفه نامتقارن در فلوم نصب و آزمون شدند. محل نصب آبشکن‌ها در ماژول پنجم و ششم از ابتدای فلوم است.

تا به حال ساختارهای متنوعی از آبشکن‌ها و با امتدادهای مختلفی یعنی عمود بر جریان، در جهت بالادست و در جهت پایین‌دست مطالعه شده است. از جمله این ساختارها آبشکن‌های صلب، نفوذپذیر، مستغرق، غیر مستغرق بوده و طبیعتاً مصالح متنوعی در احداث آنها به‌کار رفته است. اما عمده مطالعات و کاربردها مربوط به آبشکن‌های صلب، غیر مستغرق و با جهت عمود بر جریان بوده است. بنابراین همین ساختار صلب، امتداد عمود بر جریان و غیر مستغرق برای مطالعه فعلی در نظر گرفته شده است. بدیهی است که سایر ساختارها و امتدادها نیازمند مطالعه مستقل هستند. در این پژوهش با توجه به اهمیت تأثیر آرایش آبشکن‌ها بر مقاومت جریان و به‌منظور ایجاد آرایش‌های

با یک دبی مشخص به دست آمده و تنها فاصله بین آبشکن اول و دوم در میدان آبشکن‌ها تغییر داده شده است. از این‌رو نتایج ارائه شده قابل تعمیم نیست و همچنان به مطالعات وسیع‌تری نیاز است.

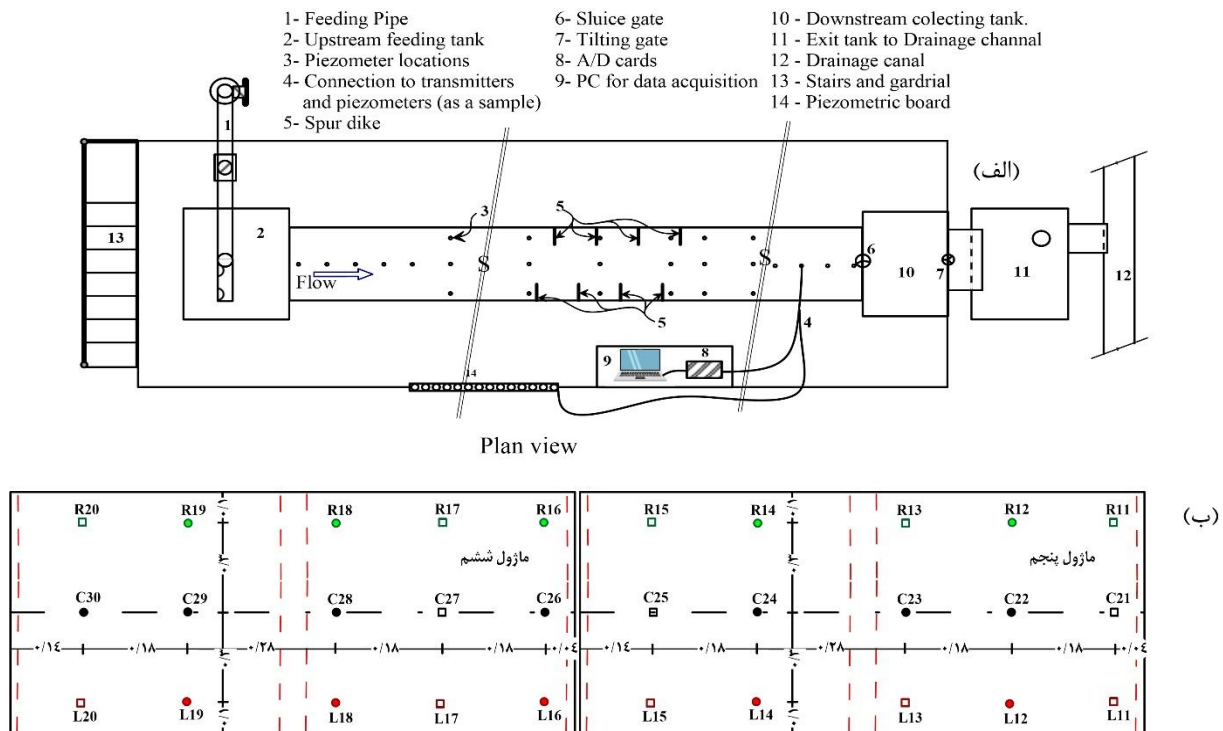
Azinfar and Kells (2009) بر اساس یک مطالعه آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که آبشکن‌ها می‌توانند مسئول افزایش خطرات سیلاب به دلیل تحمیل مقاومت در برابر جریان باشند. از این‌رو تأثیر برگشت آب ناشی از وجود این سازه باید مطالعه شود و نقش آن به عنوان یکی از ضوابط طراحی مورد توجه قرار گیرد. آن‌ها با مطالعه آبشکن منفرد، معادلاتی برای برآورد ضریب کششی و تخمین میزان برگشت آب ارائه دادند؛ اما تأکید کردند که برای رسیدن به نتیجه جامع به مطالعه گسترده‌تری نیاز است. علاوه بر این Meile et al. (2011) نشان داده‌اند که افزایش تراکم زبری لزوماً به مفهوم مقاومت زیاد در برابر جریان نیست بلکه آرایش‌های خاص از عناصر زبری می‌تواند منجر به بیشترین مقاومت جریان شود. این نتیجه اهمیت و لزوم مطالعه اثر آرایش‌های متنوع آبشکن‌ها بر برگشت آب را به خوبی برجسته می‌کند.

نزدیک‌ترین پژوهش‌های جدید مرتبط با آرایش موانع، مربوط به Martino et al. (2014) است. آنها با بررسی چندین آرایش از موانع استوانه‌ای مستغرق، معادله‌ای برای پیش‌بینی برگشت آب ارائه کردند. معادله‌ای ارائه شده به پارامترهایی مانند قطر مانع، طول کارگذاری و تراکم موانع وابسته است و با ساده‌سازی فرض‌های فیزیکی به‌دست آمده است؛ اما به دلیل محدودیت‌های طول و عرض بسیار کم فلوم آزمایشگاهی آنها، درستی و کارایی نتایج ارائه شده مورد سؤال است. اخیراً Möws and Koll (2019) نیز در بررسی برگشت آب و مقاومت جریان در میدان آبشکن‌های مستغرق یکطرفه بیان کردند که علاوه بر تعداد و فاصله بین آبشکن‌ها، طول میدان نیز بر مقاومت جریان مؤثر است.

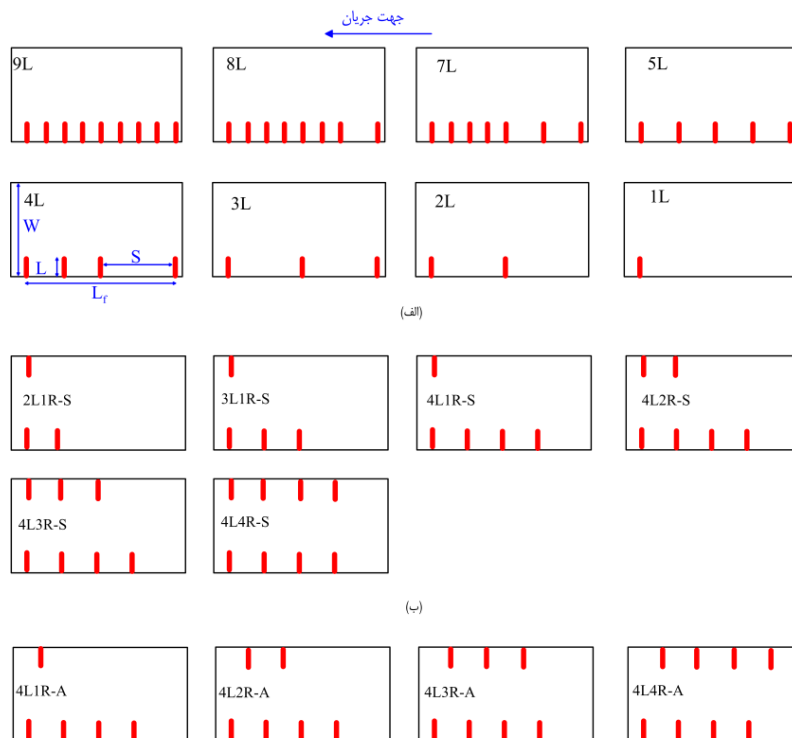
مرور بر سابقه مطالعات پس از انتشار توصیه U.S. Government Accountability Office (U.S. GAO) (2011) نشان می‌دهد که بررسی تغییرات عمق یا تراز سطح آب در اثر آرایش متنوع آبشکن‌ها مورد توجه قرار نگرفته و همچنان نیازمند مطالعه است. از این‌رو پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات عمق آب در سه موقعیت بالادست، پایین‌دست و میدان آبشکن‌های غیر مستغرق و برای آرایش‌های با تنوع گسترده یکطرفه و دو طرفه، انجام شده است.

متنوع، تعداد آبشکن‌ها، نسبت فاصله به طول، یکطرفه و دو طرفه بودن و همچنین تقارن و عدم تقارن آبشکن‌ها مد نظر قرار گرفت. آرایش یکطرفه آبشکن‌ها شامل هشت آزمایش با تعداد و فواصل مختلف بین آن‌هاست. آرایش دو طرفه شامل شش آرایش متقارن و چهار آرایش نامتقارن است.

شکل (۱) پلان تجهیزات آزمایشگاهی و موقعیت قرارگیری پیزومترها در محل نصب آبشکن‌ها و شکل (۲) آرایش آبشکن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی: (الف) پلان کلی فلو، (ب) موقعیت قرارگیری پیزومترها در ماژول‌های محل نصب آبشکن‌ها



شکل ۲- آرایش آبشکن‌ها: (الف) آرایش یکطرفه، (ب) آرایش دو طرفه متقارن، (ج) آرایش دو طرفه نامتقارن

فلوم در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۰۰۵ انتخاب شد. نامگذاری و تبیین آرایش‌ها در جدول (۱) آمده است. در آزمایش‌ها دامنه دبی از ۱۲ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه متغیر بوده و آبشکن‌ها در همه شرایط هیدرولیکی غیر مستغرق بودند.

پیش از انجام آزمایش‌های اصلی، تمام تجهیزات به صورت درجا واسنجی شد و عملکرد تمام آرایش‌ها در هفت دبی مختلف و در جریان متغیر تدریجی بررسی شد. معمولاً آبشکن‌ها در بخش‌های کم‌شیب آبراهه‌ها احداث می‌شوند. به همین دلیل شیب

جدول ۱- نامگذاری و تبیین آزمایش‌های انجام شده

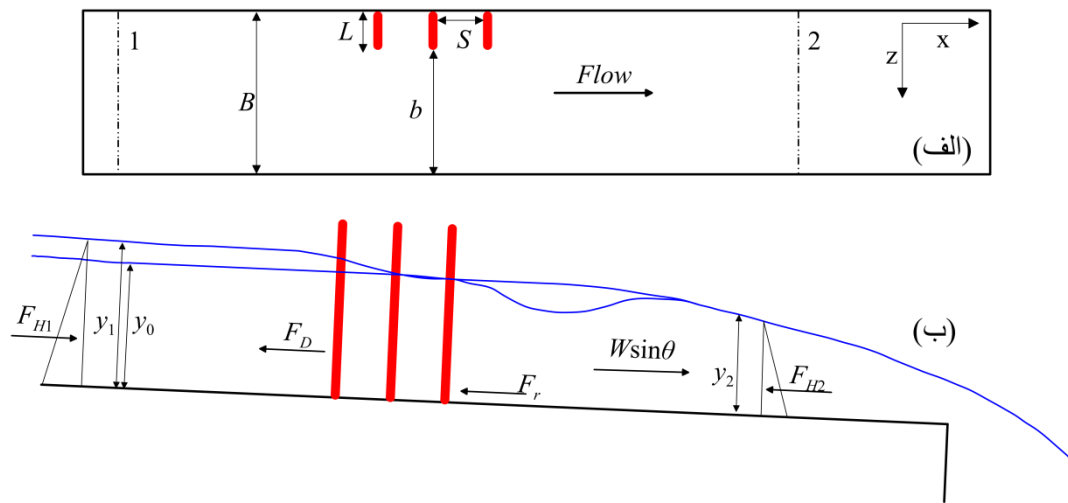
| آرایش   | نام آرایش | شماره گروه | توضیحات                                                        |
|---------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------|
|         | 1L        | ۱          | یک آبشکن منفرد                                                 |
|         | 2L        | ۱          | دو آبشکن با فاصله ۴۵ سانتی متر (سه برابر طول آبشکن)            |
|         | 3L        | ۱,۲        | سه آبشکن با فاصله ۴۵ سانتی متر (سه برابر طول آبشکن)            |
|         | 4L        | -          | چهار آبشکن با یک فاصله ۴۵ سانتی متری و دو فاصله ۳۰ سانتی متری  |
| یکطرفه  | 5L        | ۲          | پنج آبشکن با فاصله ۳۰ سانتی متر (دو برابر طول آبشکن)           |
|         | 7L        | -          | هفت آبشکن با چهار فاصله ۱۵ سانتی متری و دو فاصله ۳۰ سانتی متری |
|         | 8L        | -          | هشت آبشکن با شش فاصله ۱۵ سانتی متری و یک فاصله ۳۰ سانتی متری   |
|         | 9L        | ۲          | نه آبشکن با فاصله ۱۵ سانتی متر (برابر با طول آبشکن)            |
|         | 2L1R-S    | ۳          | دو آبشکن در سمت چپ فلوم و یک آبشکن در سمت راست فلوم            |
|         | 3L1R-S    | ۳          | سه آبشکن در سمت چپ فلوم و یک آبشکن در سمت راست فلوم            |
| دو طرفه | 4L1R-S    | ۳,۴        | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و یک آبشکن در سمت راست فلوم          |
|         | 4L2R-S    | ۴          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و دو آبشکن در سمت راست فلوم          |
| مقارن   | 4L3R-S    | ۴          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و سه آبشکن در سمت راست فلوم          |
|         | 4L4R-S    | ۴          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و چهار آبشکن در سمت راست فلوم        |
|         | 4L1R-A    | ۵          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و یک آبشکن در سمت راست فلوم          |
| دو طرفه | 4L2R-A    | ۵          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و دو آبشکن در سمت راست فلوم          |
|         | 4L3R-A    | ۵          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و سه آبشکن در سمت راست فلوم          |
| نامقارن | 4L4R-A    | ۵          | چهار آبشکن در سمت چپ فلوم و چهار آبشکن در سمت راست فلوم        |

## نتایج و بحث

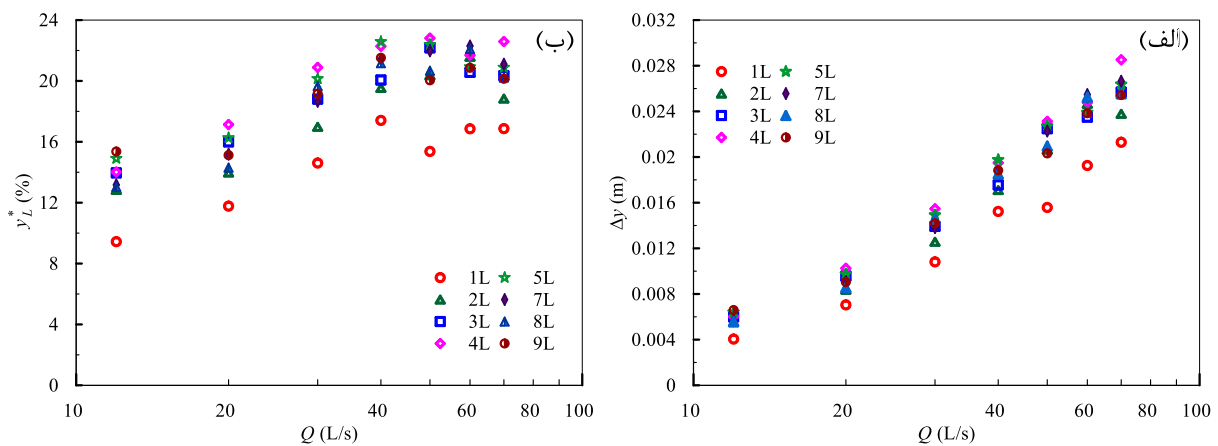
**تأثیر آرایش یکطرفه آبشکن‌ها بر تغییرات عمق آب در بالادست**  
بررسی داده‌های مربوط به نصب تمامی آرایش‌های یکطرفه نشان داد که در این شرایط نیم‌رخ طولی جریان متغیر تدریجی ( $M2$ ) تشکیل شده، شبیه به نیم‌رخ است که بدون نصب آبشکن ایجاد شد با این تفاوت که در تمام نقاط بالادست سازه، عمق آب،  $y_1$ ، (و به تبع آن تراز سطح آب) با آبشکن نسبت به عمق آب بدون نصب آبشکن،  $y_0$ ، افزایش می‌یابد (شکل ۳). این میزان افزایش عمق آب با  $\Delta y = y_1 - y_0$ ، و تغییرات عمق نسبی آب که با رابطه (۱) محاسبه شد، با  $y_L^*$  نشان داده شد. این دو کمیت در بالادست آرایش‌های یکطرفه محاسبه و در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$y_L^* = \left( \frac{y_1 - y_0}{y_0} \right) * 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

با اندازه‌گیری عمق آب در طول فلوم و مقاطع عرضی مختلف، اثر آرایش یکطرفه و دو طرفه آبشکن‌ها بر تغییرات عمق آب در بالادست، به صورت جداگانه، بررسی شد و رابطه‌ای برای برآورد ضریب کششی آبشکن منفرد ارائه گردید. سپس با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر میزان افزایش عمق آب در بالادست آرایش یکطرفه، پارامتر بی‌بعدی که شامل متغیرهای مورد مطالعه است، پیشنهاد شد. در گام بعد، تغییرات عمق آب در پایین‌دست آبشکن‌های یکطرفه و دو طرفه بررسی شده و اثر دبی بر طول تحت تأثیر پایین‌دست آبشکن‌ها نشان داده شده است. در بخش پایانی، چگونگی تغییرات پروفیل عرضی عمق آب در سه مقطع بالادست، پایین‌دست و مرکز میدان آبشکن‌ها ارائه شده است.



شکل ۳- شماتیک قرار گیری آبشکن‌ها در فلوم: (الف) در پلان، (ب) در مقطع طولی



شکل ۴- اثر آرایش‌های یکطرفه: (الف) - افزایش عمق آب،  $\Delta y$ ، (ب) - افزایش عمق نسبی آب،  $y_L^*$ ، در دبی‌های مختلف

نظر گرفته شدند. با صرف نظر کردن از نیروی وزن سیال و نیروی اصطکاک، معادله (۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

(رابطه ۳)

$$\frac{F_D}{\gamma} = \left( \frac{q^2}{gy_1} - \frac{y_1^2}{2} \right) - \left( \frac{q^2}{gy_2} - \frac{y_2^2}{2} \right) = M_1 - M_2$$

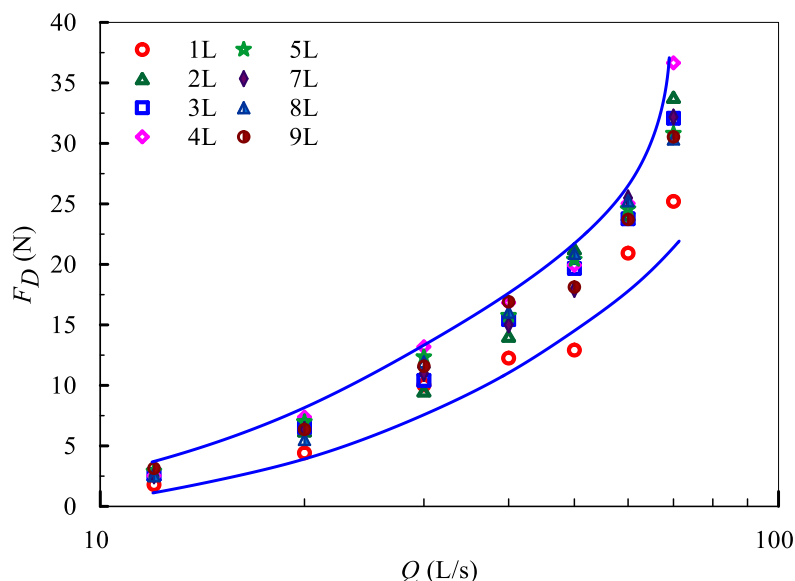
با استفاده از رابطه (۳) نیروی کششی کل میدان آبشکن‌ها قابل محاسبه است که مقادیر آن برای آرایش‌های یکطرفه تعیین و در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است نیروی کششی نیز مانند افزایش عمق آب، با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که داده‌های همه آرایش‌ها در نواری با عرض متغیر تجمع شده‌اند، طوری که عرض نوار تأثیر تعداد و آرایش آبشکن‌ها را بر مقدار نیروی کششی در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۴) در تمام آرایش‌ها، با افزایش دبی، میزان  $\Delta y$  نیز افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان با اصل اساسی مومنوم تحلیل کرد. معادله اندازه حرکت برای مقاطع بالادست و پایین‌دست آبشکن‌ها مطابق معادله (۲) نوشته می‌شود:

(رابطه ۲)

$$F_{H1} - F_{H2} + W \sin \theta - F_r - F_D = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1)$$

در این معادله  $F_{H1}$  و  $F_{H2}$  به ترتیب نیروهای هیدرواستاتیک در بالادست و پایین‌دست میدان آبشکن‌ها (مقاطع ۱ و ۲ در شکل (۳)) هستند. مؤلفه نیروی وزن سیال در جهت جریان،  $F_r$ ، نیروی اصطکاک و  $F_D$  بیانگر نیروی کششی است.  $\rho$  و  $Q$  چگالی و دبی سیال،  $V_1$  و  $V_2$  نیز بیانگر سرعت متوسط جریان در بالادست و پایین‌دست آبشکن‌هاست.  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب تصحیح اندازه حرکت هستند که با فرض یکنواخت بودن توزیع سرعت برابر با یک در



شکل ۵- مقادیر نیروی کششی در دبی‌های مختلف برای آرایش‌های یک‌طرفه

رینولدز بالا مربوط به شرایط مستغرق است (Munson *et al.*, 2002; White, 2016). علاوه بر آن در مطالعه و مدل‌سازی تأثیر پوشش گیاهی بر ضریب کششی با استفاده از ایجاد موانع در کانال، که توسط محققین متعدد انجام شده است، عدد رینولدز به عنوان یک عامل مؤثر معرفی شده است (Busari and Li, 2016; Cheng and Nguyen, 2011; Tanino and Nepf, 2008). از این رو با استفاده از داده‌های پژوهش حاضر و داده‌های Azinfar and Kells (2009) تغییرات ضریب کششی نسبت به عدد رینولدز تعیین و در شکل (۷) ترسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب کششی با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد و هرچه آبشکن طول‌تر باشد تغییرات ضریب کششی هم بیش‌تر می‌شود؛ بنابراین با استفاده از مجموع داده‌ها و با کاربرد رگرسیون خطی چند متغیره، ابتدا ضرایب رابطه‌ی ایشان تعدیل شد (رابطه ۵). سپس یک رابطه جدید با در نظر گرفتن عدد رینولدز ارائه شد (رابطه ۶) که برآورد بهتری از ضریب کششی ارائه می‌کند. ضریب تعیین ( $R^2$ ) این دو رابطه به ترتیب برابر با ۰/۹۴ و ۰/۹۷ است. ضریب کششی محاسبه شده با استفاده از روابط (۵) و (۶) در مقابل مقادیر مشاهده شده، در شکل (۸) ترسیم شده است. بر اساس این شکل تفاوت مقادیر تخمین زده شده و مشاهداتی در محدوده  $\pm 10\%$  درصد قرار دارد.

$$C_D = 2.18 \left(1 - \frac{L}{B}\right)^{-3.295} \left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.204} \quad (\text{رابطه ۵})$$

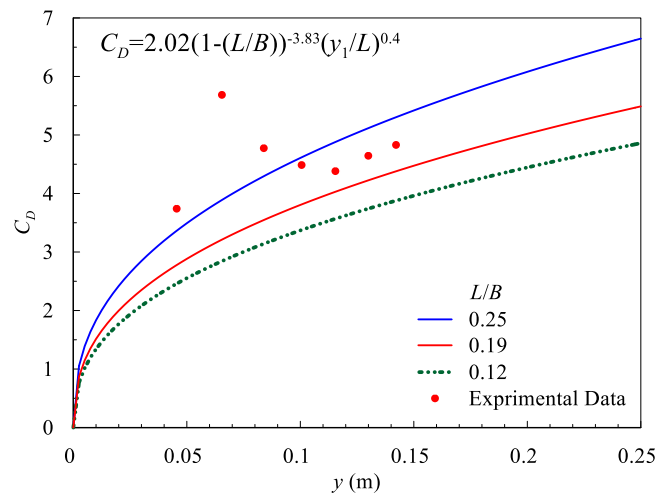
$$C_D = 0.092 \text{Re}_L^{0.298} \left(1 - \frac{L}{B}\right)^{-2.686} \left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.108} \quad (\text{رابطه ۶})$$

Azinfar and Kells (2009) در مطالعه مقاومت جریان و نیروی کششی آبشکن منفرد، با بررسی سه نسبت مختلف تنگ شدگی ( $L/B$ )، ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۵ معادله‌ی  $C_D = 2.02(1 - (L/B))^{-3.83} (y_1/L)^{0.4}$  را برای برآورد ضریب کششی در شرایط غیر مستغرق ارائه کردند. بر اساس این معادله با افزایش نسبت تنگ شدگی ضریب کششی افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که مقدار ضریب کششی مربوط به آرایش 1L این پژوهش با نسبت تنگ شدگی ۰/۱۹ باید بین مقادیر ضریب کششی مربوط به تنگ شدگی ۰/۲۵ و ۰/۱۲ ایشان باشد. اما ترسیم معادله فوق به همراه داده‌های این پژوهش در شکل (۶) این نتیجه را به صورت کامل تأیید نمی‌کند. ضمن آنکه داده‌های مربوط به تنگ شدگی ۰/۱۹ این پژوهش با مقادیری که از معادله ایشان برای همین تنگ شدگی به دست می‌آید، از ۱۰ تا ۷۰ درصد اختلاف دارد. بنابراین بنظر می‌رسد معادله‌ی پیشنهادی ایشان در محدوده مشخصی کارکرد دارد و برای ارائه معادله جامع نیازمند مطالعه و داده‌های بیشتر است. در معادله مذکور با استناد به Munson *et al.* (2002) از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر شده است. بر اساس آنالیز ابعادی ضریب کششی برای یک صفحه تخت عمود بر جریان، تابع پارامترهای زیر است (White, 2016):

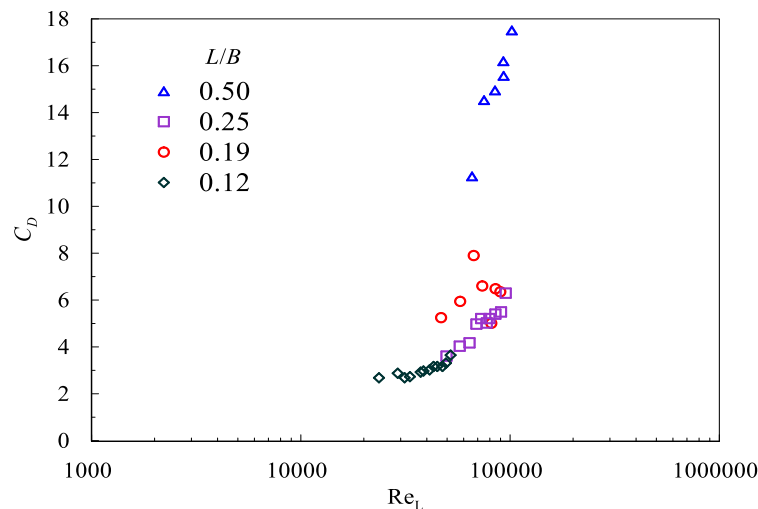
$$C_D = f\left(\text{Re}_L, \frac{L}{B}, \frac{y_1}{L}\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه  $\text{Re}_L = VL/\nu$  عدد رینولدز،  $L$  طول آبشکن،  $B$  عرض کانال و  $y_1$  عمق آب در بالادست آبشکن است. عدم تغییرات ضریب کششی یک صفحه تخت در اعداد

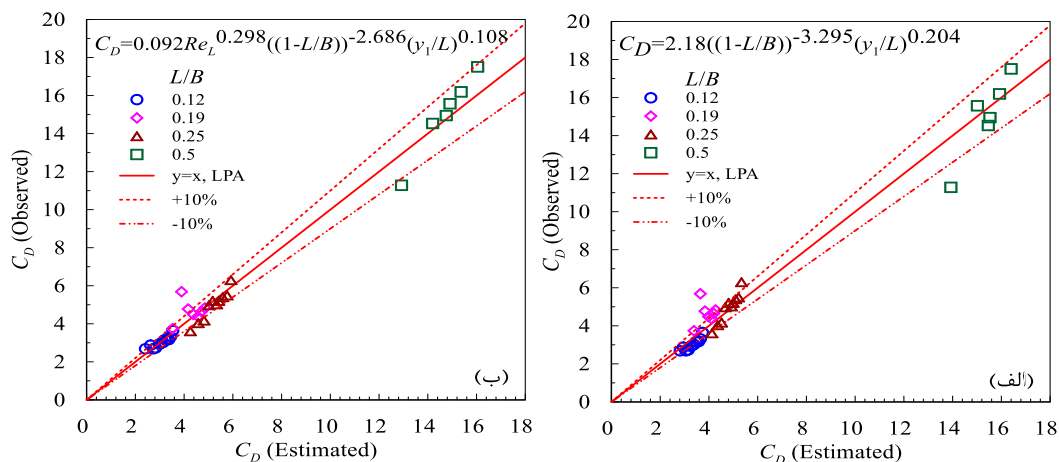
رابطه (۶) برآورد خوبی از ضریب کششی پایه  $(C_{D0})$  نیز تنگ شدگی بسیار ناچیز باشد و  $L/B$  صفر در نظر گرفته شود. ارائه می‌کند. ضریب کششی پایه زمانی تعریف می‌شود که نسبت



شکل ۶- ضریب کششی آبشکن منفرد در نسبت‌های تنگ شدگی مختلف بر اساس رابطه پیشنهادی Azinfar and Kells (۲۰۰۹) و داده‌های پژوهش حاضر



شکل ۷- تغییرات ضریب کششی آبشکن منفرد با طول‌های مختلف در برابر عدد رینولدز



شکل ۸- مقادیر مشاهده شده ضریب کششی آبشکن منفرد در مقابل مقادیر محاسبه شده: (الف) رابطه (۵) (ب) رابطه (۶)

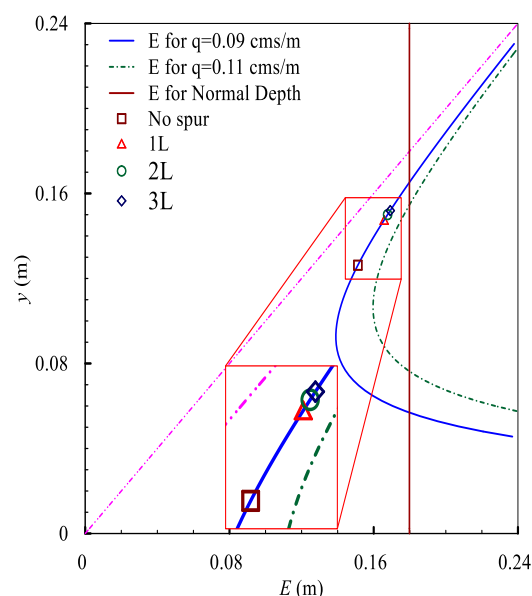
آبشکن‌ها بر مقدار نیروی کششی و افزایش عمق آب ناشی از آن، افزایش می‌یابد. به همین دلیل برای بررسی دقیق‌تر اثر تعداد

بررسی تأثیر تعداد آبشکن‌ها بر افزایش عمق آب  
شکل (۵) نشان داد که در دبی‌های بالاتر تأثیر تعداد و آرایش



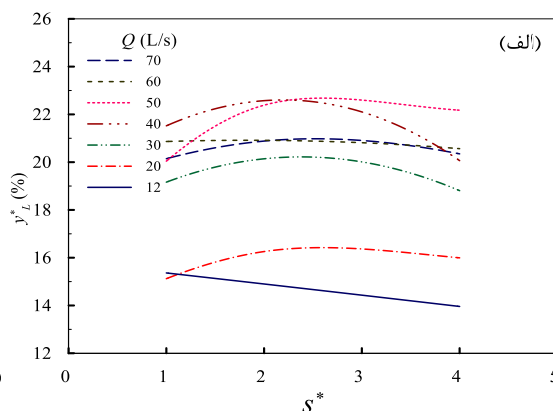
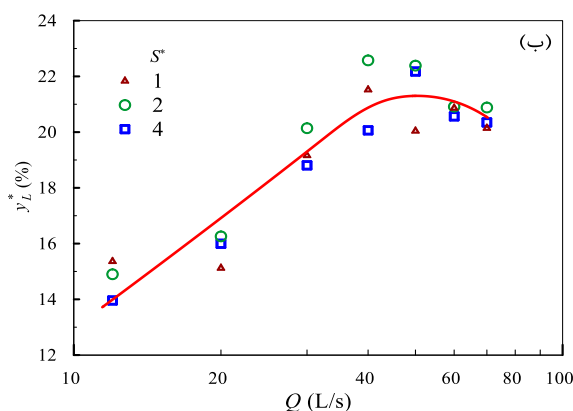
آرایش  $L3$ ،  $L5$  و  $L9$  مقایسه شدند. در این آرایش‌ها طول کلی میدان آبشکن ثابت و مقدار  $S^*$  به ترتیب برابر با چهار، دو و یک بوده است. افزایش  $S^*$  به معنی کاهش تعداد آبشکن‌ها در طول میدان است. تغییرات افزایش عمق نسبی آب،  $y_L^*$ ، برای دبی‌های مختلف در مقابل  $S^*$  در شکل (۱۰-الف) و در برابر دبی برای نسبت‌های مختلف  $S^*$  در شکل (۱۰-ب) ترسیم شد. شکل (۱۰-الف) نشان می‌دهد که تقریباً  $S^*=2$  بیشینه تأثیر در تمام دبی‌ها ایجاد کرده است. که احتمالاً دلیل آن، تولید حداکثر نیروی کششی مؤثر در هر دبی در این  $S^*$  است. اما شکل (۱۰-ب) در مجموع نشان می‌دهد که با ثابت نگهداشتن طول کلی میدان و همچنین طول آبشکن، افزایش دبی منجر به افزایش عمق نسبی  $y_L^*$  می‌شود اما در این حالت نیز بیشینه‌ای برای میزان تأثیر دبی وجود دارد که از آن پس، ابتدا کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. Azinfar and Kells (2011) با ثابت نگه داشتن تعداد آبشکن‌ها و تغییر در طول میدان، نشان دادند که با افزایش نسبت فاصله به طول آبشکن نیروی کششی کل میدان و میزان افزایش عمق آب بالادست، افزایش می‌یابد. بنابراین در این سه آرایش از یک طرف افزایش نسبت فاصله به طول آبشکن موجب افزایش عمق نسبی و از طرف دیگر کاهش تعداد آبشکن‌ها باعث کاهش عمق نسبی  $y_L^*$  می‌شود. این در حالی است که Azinfar and Kells (2011) در ارائه فرمول برای محاسبه نیروی کششی نسبی کل از اثر تعداد آبشکن‌ها در مقابل نسبت فاصله به طول آبشکن صرف نظر کردند. ضمن آنکه این فرمول از انجام چند آزمایش در یک دبی مشخص استخراج شده است. در حالی که مطابق شکل (۱۱) نمی‌توان از تأثیر دبی بر نتایج صرف نظر کرد.

آبشکن‌ها بر میزان افزایش عمق آب، آرایش‌های  $1L$ ،  $2L$  و  $3L$  در تمام دبی‌ها مطالعه شد؛ اما نتایج مربوط به دبی  $70$  لیتر بر ثانیه به عنوان نمونه در شکل (۹) ارائه شد. در این آرایش‌ها نسبت فاصله به طول آبشکن ثابت و برابر با چهار است ( $S^*=S/L=4$ )؛ اما طول میدان آبشکن‌ها متغیر است. بر اساس این نتایج در نسبت یکسان فاصله به طول آبشکن، با افزایش تعداد آبشکن‌ها میزان افزایش عمق آب به مقدار اندکی افزایش می‌یابد.



شکل ۹- تأثیر تعداد آبشکن‌ها بر تغییرات انرژی مخصوص و میزان افزایش عمق آب

بررسی اثر نسبت فاصله آبشکن به طول آن بر افزایش عمق آب برای بررسی تأثیر نسبت فاصله به طول آبشکن ( $S^*=S/L$ ) بر میزان نیروی کششی و افزایش عمق آب در بالادست آبشکن‌ها، سه

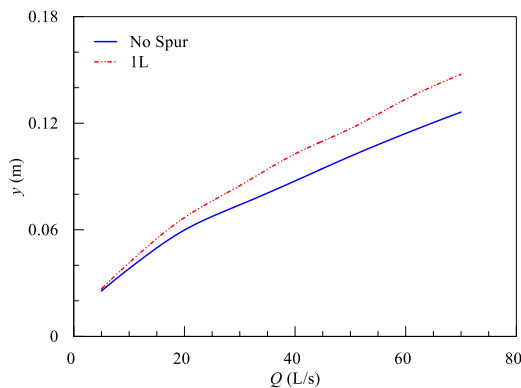


شکل ۱۰- افزایش عمق نسبی آب در برابر: (الف) نسبت فاصله آبشکن به طول آن،  $S^*$ ، برای دبی‌های مختلف، (ب) دبی برای  $S^*$  مختلف

آبشکن‌ها و طول کلی میدان می‌توانند بر نیروی کششی و افزایش عمق آب بالادست مؤثر باشند. محققان دیگر نیز در بررسی نیروی

نتایج به دست آمده تا کنون نشان می‌دهد که در شرایط غیر مستغرق، نه تنها نسبت فاصله به طول آبشکن بلکه تعداد

(۱۲) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در یک دبی مشخص با وجود آبشکن عمق بیشتری در بالادست آبشکن وجود دارد. Muto et al. (2002) نیز بیان کردند که با بررسی منحنی سنجه تأثیر مقاومت آبشکن‌ها بر ظرفیت انتقال فلوم قابل تخمین است.



شکل ۱۲- منحنی سنجه برای آرایش 1L

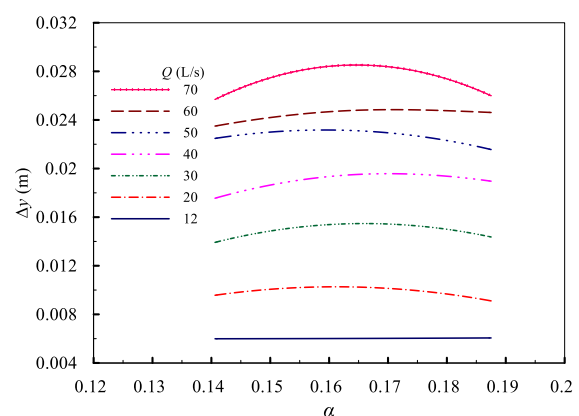
تأثیر آرایش دو طرفه آبشکن‌ها بر تغییرات عمق آب در بالادست در همه آرایش‌های دو طرفه نسبت فاصله آبشکن به طول آن برابر با دو بوده است ( $S^*=2$ ). در این آرایش‌ها نیز مانند آرایش‌های یکطرفه، میزان افزایش عمق آب، با افزایش دبی، افزایش یافته است. اما نرخ تغییرات عمق نسبی،  $y_L^*$  با افزایش دبی کاهش می‌یابد (شکل ۱۳)، طوری که تغییرات ناچیزی در عمق نسبی برای دبی‌های بالا مشاهده می‌شود. این موضوع را می‌توان به افزایش عمق جریان در دبی‌های زیاد و بدون حضور آبشکن منسوب کرد. به عبارت دیگر با افزایش  $y_0$  در دبی‌های بالا جمله دوم در صورت کسر معادله (۱) و همچنین مخرج آن افزایش یافته که نتایجاً منجر به کاهش گرادیان تغییرات عمق نسبی می‌شود. مقایسه اثر آرایش‌های یکطرفه و دو طرفه آبشکن‌ها بر عمق نسبی در شکل (۱۴-الف) نشان داده شده است. اگر چه آرایش‌های دو طرفه، همانطور که انتظار می‌رود، عمق نسبی بالاتری نسبت به آرایش یکطرفه ایجاد کرده است، اما کاهش گرادیان تغییرات در هردو آرایش به خوبی دیده می‌شود. نقش تعداد آبشکن‌ها در آرایش دو طرفه بر عمق نسبی در شکل (۱۴-ب) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش تعداد آبشکن‌ها بر عمق نسبی آب در دبی ثابت نیز منجر به کاهش گرادیان تغییرات عمق نسبی،  $y_L^*$  می‌شود.

نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که با وجود یک تنگ شدگی دو طرفه در فلوم، اضافه کردن تعداد آبشکن‌ها در یک طرف فلوم، نمی‌تواند تأثیر چندانی بر تغییرات عمق نسبی بگذارد. این مسئله با مقایسه سه آرایش  $2L1R-S$ ،  $3L1R-S$  و  $4L1R-S$

کششی موانع و آبشکن‌ها در شرایط مستغرق عوامل یاد شده را حائز اهمیت دانسته‌اند (Martino et al., 2014; Möws and Koll, 2019). بنابراین در شرایط غیر مستغرق هم لازم است در ارائه معادلات برای برآورد نیروی کششی و پیش‌بینی افزایش عمق آب ناشی از آن، همه عوامل یاد شده در نظر گرفته شوند. به همین دلیل لازم دیده شد که یک فاکتور شکل ارائه شود تا با استفاده از آن بتوان آرایش آبشکن‌ها را به شکلی تعریف کرد که تأثیر همه پارامترها قابل مشاهده و بررسی باشد. بدین منظور در این تحقیق با کاوش در فرم‌های بی بعد مختلف، مناسب‌ترین فاکتور شکل،  $\alpha$ ، برای آرایش‌های یکطرفه در معادله (۷) پیشنهاد شد:

$$\alpha = \frac{(N-1)SL}{BL_f} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه  $N$  تعداد آبشکن‌ها،  $S$  فاصله بین آبشکن‌ها،  $L$  و  $L_f$  به ترتیب طول آبشکن و طول میدان است.  $B$  نیز بیانگر عرض فلوم است. با وجود تنوع قابل توجه عوامل دخیل در رابطه (۷)، دامنه تغییرات  $\alpha$  برای آرایش‌های متنوع بررسی شده در این پژوهش محدود است. مقدار  $\alpha$  برای آرایش‌های  $5L$ ،  $7L$ ،  $8L$  و  $9L$  ثابت و برابر با  $0.1875$  است. تفاوت مقدار افزایش عمق،  $\Delta y$ ، برای این آرایش‌ها با فاکتور شکل یکسان ( $\alpha=0.1875$ ) کم‌تر از حدود ده درصد است (شکل ۴-الف). مقدار  $\alpha$  برای دو آرایش  $3L$  و  $4L$  به ترتیب برابر با  $0.1406$  و  $0.1640$  است. با بررسی تغییرات افزایش عمق نسبت به  $\alpha$  مشخص شد که در همه دبی‌ها، بیشینه آن مربوط به فاکتور شکل  $0.1640$  است (شکل ۱۱).

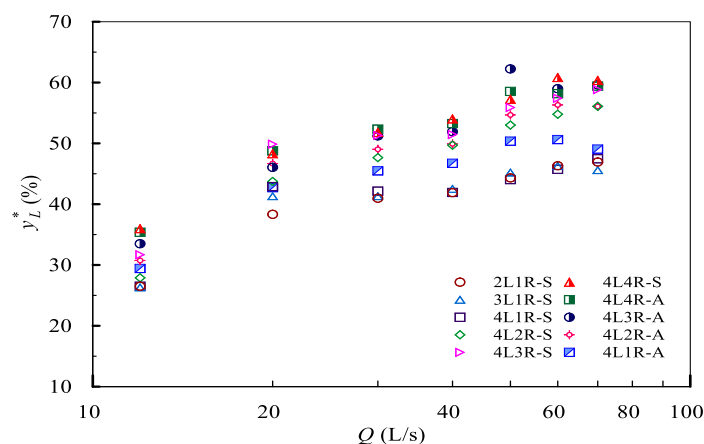


شکل ۱۱- تغییرات افزایش عمق در برابر فاکتور شکل  $\alpha$  در دبی‌های مختلف

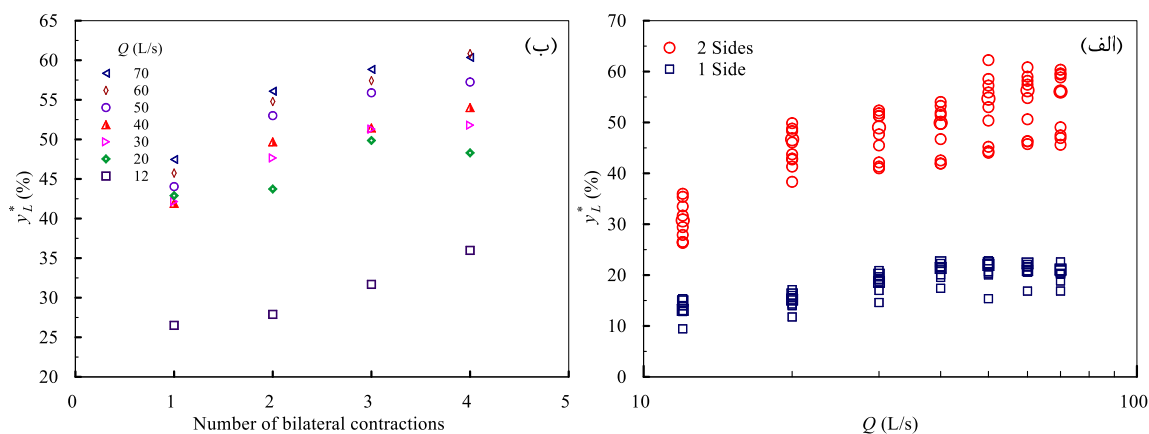
علاوه بر معادله مومنتوم، منحنی سنجه در بالادست آبشکن‌ها نیز نشان‌دهنده افزایش عمق آب بالادست ناشی از وجود آبشکن‌ها است. منحنی سنجه بالادست آبشکن منفرد، یعنی آرایش  $1L$ ، در مقایسه با زمانی که آبشکن وجود ندارد در شکل

برگشت آب است و با افزایش دبی تأثیر تنگ شدگی‌های یکطرفه کمتر می‌شود.

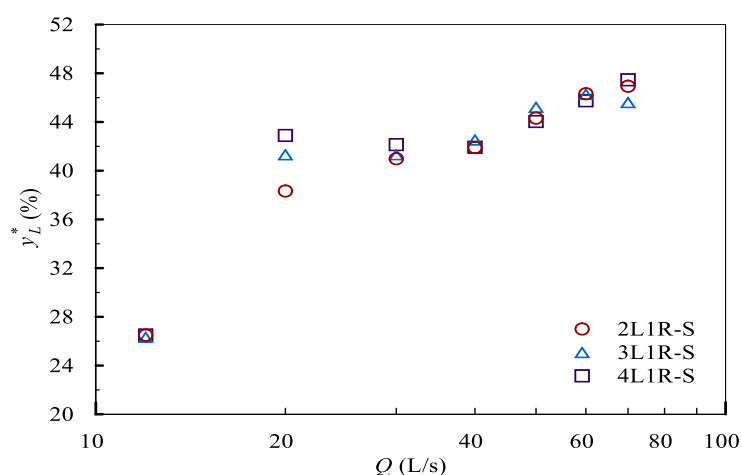
در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت در این آرایش‌ها، تنگ شدگی دو طرفه عامل اصلی



شکل ۱۳- تغییرات عمق نسبی آب در دبی‌های مختلف برای آرایش‌های دو طرفه



شکل ۱۴- تغییرات عمق نسبی آب: (الف) آرایش یکطرفه و دو طرفه (ب) گروه چهار از آرایش دو طرفه متقارن



شکل ۱۵ تغییرات عمق نسبی آب در گروه سه از آرایش دو طرفه

در یک یا چند مقطع از طول میدان آبشکن، نسبت تنگ شدگی  $(L/B)$  برابر با  $۰/۳۷۵$  است. در حالی که در آرایش دو طرفه نامتقارن در تمام مقاطع طول میدان آبشکن، نسبت تنگ شدگی

در مقایسه آرایش‌های دو طرفه متقارن و نامتقارن مشخص شد که تفاوت زیادی در میزان برگشت آب وجود ندارد و بیش‌ترین اختلاف حدود ده درصد است. در آرایش دو طرفه متقارن

مستقل از دبی است.

#### تأثیر آبشکن‌ها بر تغییرات پروفیل عرضی عمق آب

برای مطالعه تأثیر آبشکن‌ها بر پروفیل عرضی سطح آب، تغییرات عمق آب در عرض فلوم در سه مقطع بالادست، پایین‌دست و مرکز میدان آبشکن‌ها بررسی شد. مقطع عرضی در مرکز میدان آبشکن‌ها منطبق بر پیزومترهای  $R15$ ،  $C25$  و  $L15$  است (شکل ۱). با آنکه مقطع عرضی انتخاب شده تقریباً در مرکز میدان کلی آبشکن‌ها قرار دارد اما موقعیت آن نسبت به آرایش‌های مختلف، ناگزیر متفاوت است. در آرایش‌های یکطرفه و در مرکز میدان آبشکن‌ها، تغییرات سطح آب بیشتری در سمتی از فلوم که آبشکن‌ها نصب شده است، مشاهده شد. در بالادست و قسمتی از پایین‌دست که همچنان تحت تأثیر آبشکن‌هاست، تغییرات سطح آب در عرض فلوم ناچیز است؛ اما تفاوت عمق آب نسبت به زمانی که آبشکن وجود ندارد، در این پروفیل‌ها نیز قابل مشاهده است. در واقع تأثیر تفاوت آرایش‌های مختلف بر تغییرات عمق جریان در عرض فلوم، فقط در میدان آبشکن قابل مشاهده است. این تغییرات برای دبی  $70$  لیتر بر ثانیه در آرایش‌های یکطرفه با طول میدان یکسان در برابر فاصله از ساحل چپ،  $z$  در شکل (۱۸) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در آرایش‌های  $4L$  و  $5L$  در کل مقطع عرضی مرکز میدان، عمق آب پایین‌تر از حالتی است که آبشکن وجود دارد. اختلاف عمق آب در این مقطع عرضی برای آرایش  $4L$  و  $5L$  در مقایسه با آرایش  $L3$  کمتر است؛ زیرا در آرایش‌های  $4L$  و  $5L$ ، دو آبشکن قبل و بعد از مقطع عرضی نسبت به آن قرینه هستند. با این حال هنوز هم عمق آب در سمت چپ کانال یعنی محل قرارگیری آبشکن‌ها بیش‌تر از عمق آب در سمت راست کانال است.

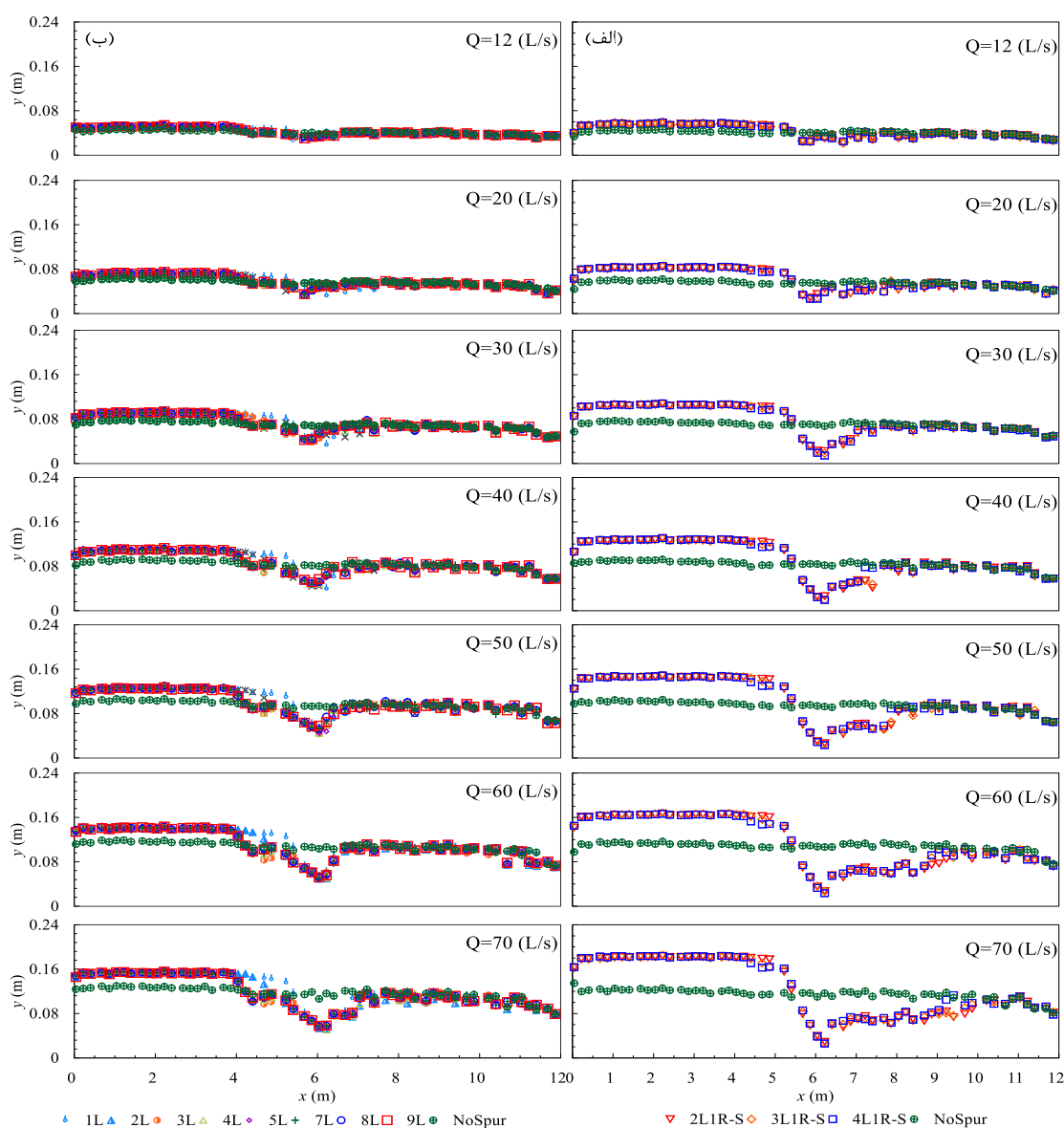
در آرایش‌های  $L7$ ،  $L8$  و  $L9$  که مقطع عرضی در فاصله بسیار کمی در بالادست یکی از آبشکن‌ها قرار دارد، افزایش عمق آب پشت آبشکن و تفاوت آن در مقطع عرضی، بخوبی قابل مشاهده است. با افزایش تعداد آبشکن‌ها در بالادست مقطع عرضی و تجمیع اثر آن‌ها، افزایش عمق در سمت چپ کانال (محل قرارگیری آبشکن‌ها) بیش‌تر می‌شود. افزایش تعداد آبشکن بالادست مقطع عرضی مرکز میدان، علاوه بر افزایش عمق در سمت چپ کانال، موجب انحراف بیش‌تر آب به سمت دیواره مقابل هم می‌شود؛ در نتیجه اختلاف عمق در مقطع عرضی (سمت راست و چپ کانال) کاهش می‌یابد. به همین دلیل، همانطور که در شکل (۱۸) هم مشخص است، اختلاف عمق (یا تراز) آب در مقطع عرضی برای آرایش  $L9$  با تعداد آبشکن بیش‌تر، کمتر از آرایش  $L8$  و  $L7$  است.

کمتر از مقدار مذکور است؛ اما فاصله کمی که بین آبشکن‌ها در دوطرف فلوم وجود دارد مانع از ایجاد تفاوت در عملکرد دو آرایش متقارن و نامتقارن می‌شود.

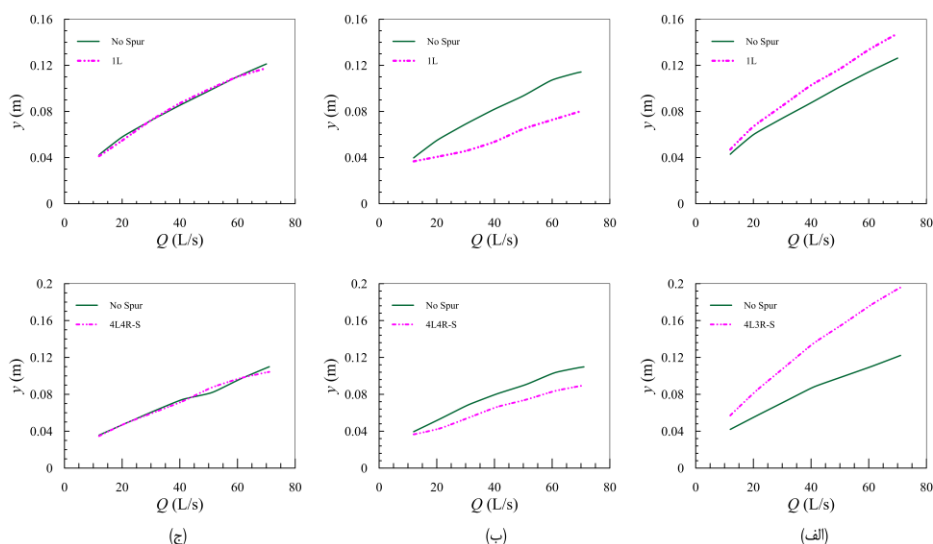
#### تغییرات عمق آب در پایین‌دست آبشکن‌ها

با بررسی پروفیل‌های طولی سطح آب همه آرایش‌ها مشخص شد که آبشکن‌ها با آرایش یکطرفه و دو طرفه طول مشخصی از پایین‌دست را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در واقع آبشکن‌ها علاوه بر افزایش عمق آب در بالادست، در طول مشخصی از پایین‌دست نیز باعث کاهش عمق جریان می‌شوند. پروفیل‌های طولی آرایش‌های یکطرفه و یک گروه از آرایش‌های دو طرفه در دبی‌های مختلف در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در آرایش‌های دو طرفه با افزایش دبی طول ناحیه تحت تأثیر بیش‌تر شده است. این در حالی است که در آرایش‌های یکطرفه تأثیر دبی بر طول این ناحیه کمتر است. نکته قابل توجه دیگر محل ایجاد کمترین عمق در این طول است که در آرایش یکطرفه و دو طرفه مشابه است. این بدان معنی است که مقطع کنترل آخرین آبشکن (ها) در میدان آبشکن است که در تمام آرایش‌ها یکسان بوده است. برای تعیین طول تحت تأثیر در پایین‌دست آبشکن‌ها، علاوه بر رسم پروفیل طولی سطح آب اعداد فرود نیز تعیین کننده هستند؛ زیرا در تمام آرایش‌ها، جریان پایین‌دست آبشکن‌ها فوق بحرانی است و پس از طی مسیری به حالت زیر بحرانی برمی‌گردد. با توجه به آنکه جریان فوق بحرانی به وسیله بالادست کنترل می‌شود می‌توان اینگونه استنباط کرد طولی از پایین‌دست که اعداد فرود آن بیش‌تر از یک است، تحت تأثیر آبشکن است.

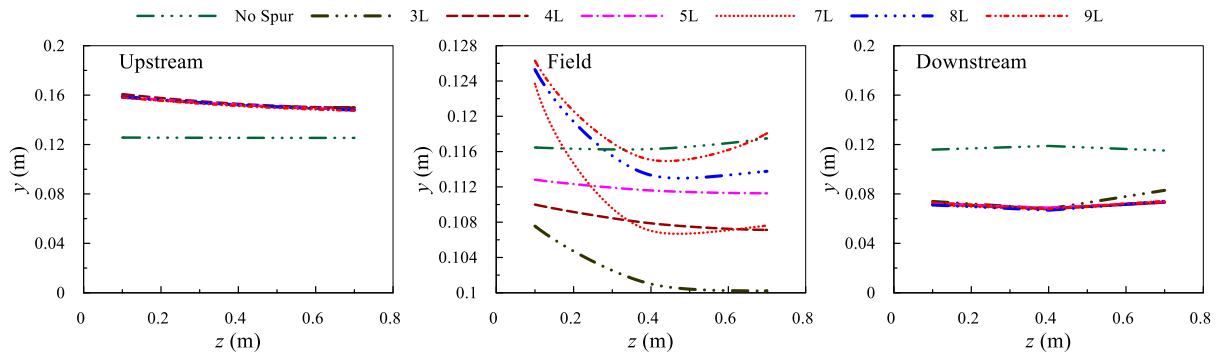
استفاده از منحنی‌های سنجه نیز می‌تواند تعیین کننده طول تأثیر آبشکن‌ها در پایین‌دست باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد آبشکن‌ها تا طول مشخصی موجب کاهش عمق آب در پایین‌دست می‌شوند بنابراین با وجود آبشکن، منحنی سنجه در یک دبی مشخص عمق کمتری را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که بعد از پایان طول تأثیر آبشکن، منحنی‌های سنجه برهم منطبق می‌شوند. تغییرات منحنی سنجه برای آرایش‌های  $1L$  و  $4L4R-S$  در شکل (۱۷) نشان داده شده است. انطباق منحنی‌های سنجه فقط در شرایط جریان متغیر تدریجی بطور واقعی قابل مشاهده است. این نشان می‌دهد که انجام آزمایش‌ها در شرایط جریان متغیر تدریجی یک عامل کمک کننده و مهم در درک بهتر عملکرد سازه آبشکن است. بررسی این منحنی‌ها در طول فلوم نیز تأیید می‌کند که طول تأثیر پایین‌دست آبشکن‌ها در آرایش دو طرفه با افزایش دبی افزایش می‌یابد و در آرایش یکطرفه



شکل ۱۶- پروفیل طولی عمق آب: (الف) گروه سه از آرایش‌های دو طرفه، (ب) آرایش‌های یکطرفه



شکل ۱۷- منحنی‌های سنجه: (الف) بالادست آبشکن‌ها، (ب) بلافاصله پایین دست آبشکن‌ها، (ج) پایین دست پس از اتمام طول تأثیر آبشکن‌ها



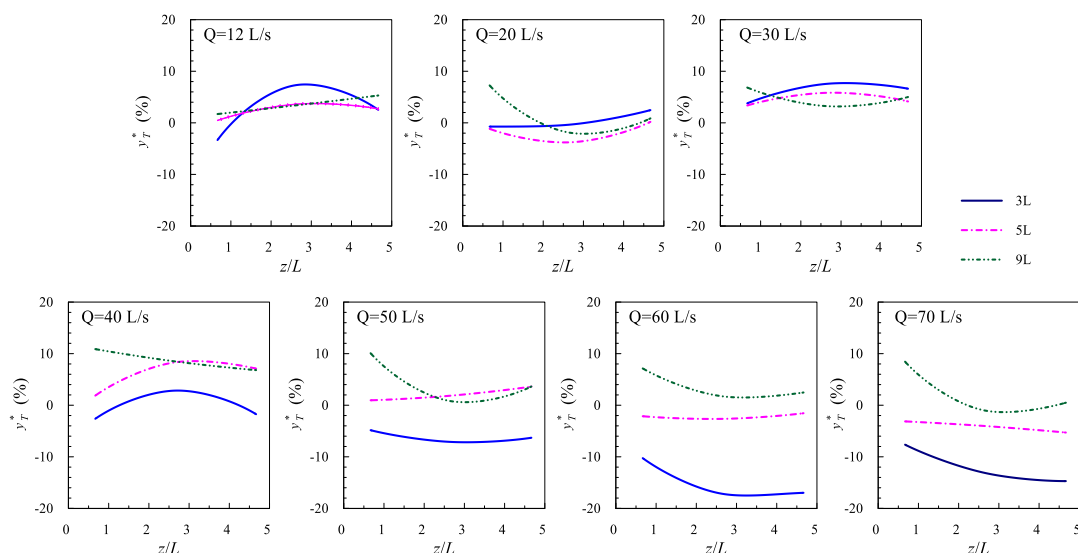
شکل ۱۸- تغییرات عمق آب در عرض فلوم برای آرایش‌های یکطرفه در دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

با حضور آبشکن و بدون آن است. تغییرات عمق نسبی عرضی در برابر عرض نسبی،  $z/L$ ، که در آن  $z$  فاصله از ساحل چپ است، در شکل (۱۹) ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که تا دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه،  $y_T^*$  رفتار متفاوتی دارد اما در دبی‌های بالاتر در آرایش ۵L ( $S^*=2$ ) کمترین تغییرات سطح در عرض فلوم دیده می‌شود. در دو آرایش ۳L و ۹L درصد تغییرات عرضی سطح آب مشابه هم است؛ اما این تغییرات در آرایش ۹L با کمترین  $S^*$ ، مثبت و در آرایش ۳L با بیش‌ترین  $S^*$ ، منفی است. یعنی در مقایسه با زمانی که آبشکن در فلوم وجود ندارد، در کمترین و بیش‌ترین نسبت فاصله به طول آبشکن به ترتیب افزایش عمق آب و کاهش آن در میدان آبشکن‌ها اتفاق می‌افتد.

بررسی اثر  $S^*$  بر تغییرات پروفیل عرضی در آرایش یکطرفه تأثیر نسبت فاصله به طول آبشکن،  $S^*$ ، بر پروفیل عرضی عمق آب در وسط میدان آبشکن‌ها، با مقایسه سه آرایش ۳L، ۵L و ۹L بررسی شد. در این آرایش‌ها،  $S^*$  به ترتیب برابر با چهار، دو و یک بوده است. تغییرات عمق نسبی در جهت عرضی نسبت به زمانی که آبشکن وجود ندارد با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده و در برابر عرض نسبی در شکل (۱۹) نمایش داده شده است.

$$y_T^* = \frac{y_{Spur} - y_{Nospur}}{y_{Nospur}} * 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن  $y_T^*$  عمق نسبی آب در جهت عرضی مجرا در میدان آبشکن‌ها،  $y_{Spur}$  و  $y_{Nospur}$  به ترتیب عمق در میدان آبشکن



شکل ۱۹- تغییرات عمق نسبی در جهت عرض در مرکز میدان آبشکن‌ها برای سه آرایش ۳L، ۵L و ۹L در دبی‌های مختلف

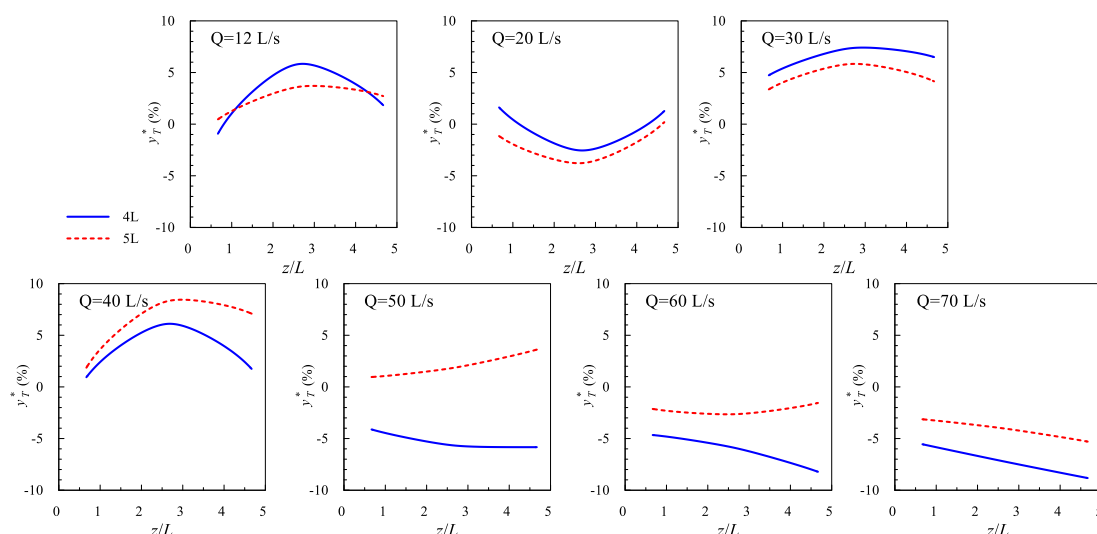
است. بر اساس این شکل تغییرات عمق نسبی عرضی،  $y_T^*$ ، در آرایش ۴L نسبت به آرایش ۵L لزوماً بیش‌تر نیست. *Ohmoto et al.* (2002) در بررسی آبشکن‌های دو طرفه متقارن با تغییر

در آرایش ۴L نسبت به آرایش ۵L فاصله بین آبشکن‌های اول و دوم، دو برابر فاصله بین سایر آبشکن‌هاست. تغییرات عمق نسبی در جهت عرض این آرایش‌ها در شکل (۲۰) نشان داده شده

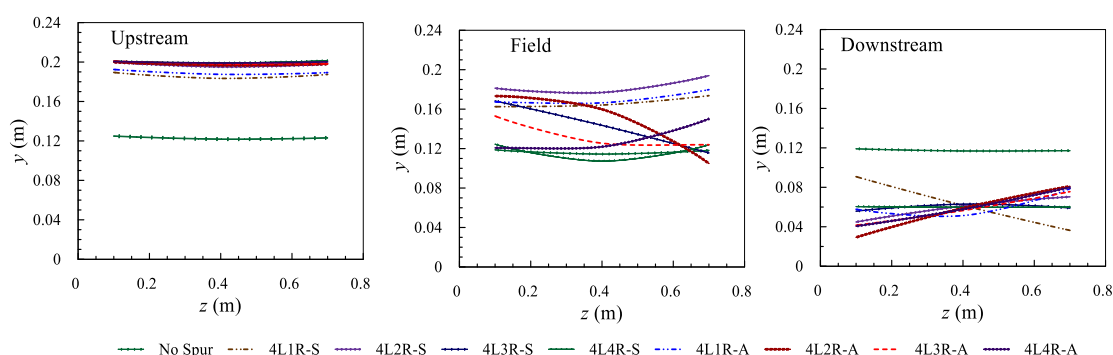
ثانیه در شکل (۲۱) نشان داده شده است. تغییرات پروفیل عرضی در بالادست آرایش‌های دو طرفه نیز مانند آرایش‌های یکطرفه ناچیز است؛ اما در پایین‌دست اینگونه نیست. همانطور که قبلاً اشاره شد در آرایش‌های دو طرفه نسبت به آرایش یکطرفه طول بیش‌تری از پایین‌دست تحت تأثیر است، در نتیجه در طول بیش‌تری جریان فوق بحرانی است و امواج لوزی شکل در آن طول مشاهده می‌شدند. تشکیل همین امواج باعث نوسان در پروفیل عرضی عمق آب در پایین دست آرایش‌های دو طرفه می‌شود.

فاصله آبشکن‌های اول و دوم بیان کردند که این تغییرات برای نسبت‌های زوج فاصله به طول آبشکن بیش‌تر از نسبت‌های فرد است. این نتیجه‌گیری فقط با آزمایشی با جریان دو لیتر بر ثانیه به دست آمده است. در حالی که با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش نمی‌توان تأثیر مشخصات جریان را بر شکل و میزان نوسانات سطح آب نادیده گرفت.

**بررسی تغییرات پروفیل عرضی در آرایش دو طرفه**  
پروفیل عرضی سطح آب آرایش‌های دو طرفه در دبی ۷۰ لیتر بر



شکل ۲۰- تغییرات عمق نسبی در جهت عرضی در برابر عرض نسبی در مرکز میدان آبشکن‌ها برای دو آرایش ۴L و ۵L در دبی‌های مختلف



شکل ۲۱- تغییرات عمق آب در عرض فلوام برای آرایش‌های دو طرفه در دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

بالادست با استفاده از اصل مومنتوم تحلیل و به نیروی کششی نسبت داده شد. معادله‌ی تخمین ضریب کششی ارائه شده توسط Azinfar and Kells (2009) برای آبشکن منفرد در شرایط غیر مستغرق، بهبود داده شد و همچنین با منظور کردن عدد رینولدز، یک معادله جدید ارائه شد. این معادله نشان می‌دهد ضریب کششی علاوه بر نسبت تنگ شدگی، به عدد رینولدز نیز وابسته است. در بررسی افزایش عمق آب در بالادست آرایش‌های یکطرفه،

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ۱۸ آرایش مختلف یکطرفه و دو طرفه آبشکن بر تغییرات عمق آب در شرایط جریان متغیر تدریجی بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده همه آرایش‌ها موجب افزایش عمق آب در بالادست می‌شوند که میزان آن با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. در آرایش‌های یکطرفه که میزان تنگ شدگی ایجاد شده از میزان تنگ شدگی بحرانی کمتر است، افزایش عمق آب

نیز می‌شوند. طول تحت تأثیر پایین‌دست برای آبشکن‌های یکطرفه کوتاه‌تر از آبشکن‌های دو طرفه است. در آبشکن‌های دو طرفه، این طول با افزایش دبی افزایش می‌یابد در حالی که در آبشکن‌های یکطرفه مستقل از دبی است.

بررسی پروفیل عرضی نشان داد که نوسان سطح آب در بالادست آرایش یکطرفه و دو طرفه ناچیز است و بیش‌ترین تغییرات پروفیل عرضی در میدان آبشکن‌ها وجود دارد که این تغییرات برای یک آرایش مشخص در مقادیر مختلف دبی، متفاوت است. در واقع نوسان سطح آب در میدان آبشکن‌ها متأثر از دو عامل شرایط جریان و آرایش آبشکن‌ها است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Azinfar, H. & Kells, J. A. (2007). Backwater effect due to a single spur dike. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(1), 107–115.
- Azinfar, H. & Kells, J. A. (2009). Flow resistance due to a single spur dike in an open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 755–763.
- Azinfar, H. & Kells, J. A. (2011). Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike field. *Journal of Hydraulic Research*, 49(2), 248–256.
- Beiz, J. U., Busch, N., Engel, H., & Gasber, G. (2001). Comparison of river training measures in the Rhine - Catchment and their effects on flood behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering*, 148(3), 123–132.
- Busari, A. O., & Li, C. W. (2016). Bulk drag of a regular array of emergent blade-type vegetation stems under gradually varied flow. *Journal of Hydro-Environment Research*, 12, 59–69.
- Cheng, N.-S., & Nguyen, H. T. (2011). Hydraulic Radius for Evaluating Resistance Induced by Simulated Emergent Vegetation in Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 995–1004.
- Criss, R. E., & Shock, E. L. (2001). Flood enhancement through flood control. *Geology*, 29(10), 875–878.
- Huthoff, F., Pinter, N., & Remo, J. W. F. (2013). Theoretical analysis of wing dike impact on river flood stages. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 550–556.
- Im, D., & Kang, H. (2011). Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration. *Water Science and Engineering*, 4(4), 386–395.
- Kuhnle, R. A., Jia, Y., & Alonso, C. V. (2008). Measured and simulated flow near a submerged spur dike. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 916–924.
- Ma, B., Dong, F., Peng, W. Q., Liu, X. B., Huang, A. P., Zhang, X. H., & Liu, J. Z. (2020). Evaluation of impact of spur dike designs on enhancement of aquatic habitats in urban streams using 2D habitat numerical simulations. *Global Ecology and Conservation*, 24, 1–12.
- Martino, R., Paterson, A., & Piva, M. (2014). Water level rise upstream a permeable barrier in subcritical flow: Experiment and modeling. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 136(4), 1–9.
- Meile, T., Boillat, J.-L., & Schleiss, A. J. (2011). Flow resistance caused by large-scale bank roughness in a channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12), 1588–1597.
- Möws, R., & Koll, K. (2019). Roughness effect of submerged groyne fields with varying length, groyne distance, and groyne types. *Water*, 11(6), 1253.
- Munson, B.R., Young, D.F., Okishi, T. H. (2002). *Fundamentals of fluid mechanics* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Muto, Y., Baba, Y., & Aya, S. (2002). Velocity measurements in open channel flow with rectangular embayments formed by spur dykes. *Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University*, 45, 449–457.
- Ohmoto, T., Hirakawa, R., & Koreeda, N. (2002). Effects of water surface oscillation on turbulent flow in an open channel with a series of spur dikes. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, 14, 1–10.
- Pandey, M., Ahmad, Z., & Sharma, P. K. (2018). Scour around impermeable spur dikes: a review. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(1), 25–44.
- Pinter, N., Thomas, R., & Wlosinski, J. H. (2001). Assessing flood hazard on dynamic rivers. *Eos*, 82(31).
- Tanino, Y., & Nepf, H. M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 34–41.
- United States Government Accountability Office



- (GAO). (2011). Mississippi River : Actions Are Needed to Help Resolve Environmental and Flooding Concerns about the Use of River Training Structures. GAO-12-41(December), 59.
- White, F. M. (2016). *Fluid mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Wu, B., Wang, G., Ma, J., & Zhang, R. (2005). Case Study: River training and its effects on fluvial Processes in the Lower Yellow River, China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 85–96.
- Yossef, M. (2002). The effect of groynes on rivers: Literature review. *Delft Cluster Publicatienummer 03.03. 04*.