

## تعیین ابعاد بهینه آبشکن محافظ با هدف کاهش عمق آبشستگی در اطراف آبشکن‌ها در بازه مستقیم در آستانه حرکت ذرات بستر

حجت کرمی<sup>۱</sup>، عبدالله اردشیر<sup>۲</sup>، کوروش بهزادیان<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

behzadian@aut.ac.ir

**چکیده**- یکی از مسائل مهم در طراحی آبشکن‌ها، حداکثر عمق آبشستگی اطراف آنها می‌باشد. در این مقاله، کاهش عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌های متوالی در بازه مستقیم، با استفاده از یک آبشکن محافظ در بالادست بررسی شده است. تأثیر پارامترهای مختلف آبشکن محافظ از جمله چهار نسبت طول آبشکن محافظ به طول آبشکن‌های اصلی ( $L_p/L_f$ ) برابر  $0/2, 0/4, 0/6$  و  $0/8$ ، سه زاویه آبشکن ( $\theta$ ) برابر  $90, 45$  و  $135$  درجه و چهار نسبت فاصله آبشکن محافظ به طول آبشکن اول ( $X/L_f$ ) برابر  $1, 1/5, 2$  و  $2/5$  به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. آزمایش‌ها برای سرعت آستانه حرکت ذرات و دانه‌بندی بستر با قطر  $0/91$  میلی‌متر ( $D_{50}$ ) و انحراف معیار  $1/38$  انجام شد. همچنین تأثیر آبشکن محافظ بر الگوی جریان اطراف آبشکن‌ها در بستر صلب بررسی شد. آزمایش‌ها نشان داد که طراحی صحیح آبشکن محافظ می‌تواند حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌ها را به طور قابل توجهی کاهش دهد. آبشکن محافظ با  $L_p/L_f=0/8, X/L_f=2$  و  $\theta=45^\circ$  به طور متوسط  $76/6$  درصد عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌ها را کاهش داد. بیشترین کاهش عمق آبشستگی اطراف آبشکن اول ( $74/7$  درصد) با بکارگیری آبشکن محافظ  $L_p/L_f=0/8, X/L_f=2/5$  و  $\theta=90^\circ$  حاصل شد.

**کلید واژگان:** ساماندهی رودخانه، آبشکن، آبشستگی، کاهش آبشستگی، جریان سه‌بعدی.

### ۱- مقدمه

طرف محور آن با زوایای مختلفی نسبت به امتداد رودخانه تا فاصله‌ای به سمت درون بستر جریان امتداد یافته و از مصالح سنگی، پاره‌سنگی، شن و ماسه، خاکریزی، گابیونی، شمع‌کوبی و مانند آن ساخته می‌شود

آبشکن سازه‌ای است که به طور گسترده‌ای در ساماندهی رودخانه‌ها و حفاظت کناره‌های فرسایش‌پذیر استفاده می‌شود. این سازه به صورت عرضی از ساحل رودخانه به

آبشکن‌ها، می‌توان عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌های اصلی و به‌ویژه آبشکن اول را که در معرض مستقیم جریان قرار دارد کاهش داد. در این زمینه می‌توان تحقیقات (Karami et al. 2008) را نام برد. در طراحی و اجرای آبشکن محافظ، محاسبه طول، فاصله و زاویه نسبت به اولین آبشکن اصلی بسیار مهم بوده و تأثیر زیادی بر الگوی آبشستگی اطراف آبشکن‌های اصلی دارد. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آبشکن محافظ بر الگوی جریان و آبشستگی موضعی اطراف آبشکن‌های اصلی پرداخته شده است. نتایج این تحقیق را می‌توان در طراحی تکیه‌گاهها، آبشکن‌ها و کوله‌های پل به‌کار برد.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی و آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق فلومی با طول ۱۴ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱ متر با شیب طولی ۰/۰۰۰۴ در آزمایشگاه محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شد. جنس بدنه و کف فلوم از شیشه بوده و در کف فلوم به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر مصالحی با دانه‌بندی یکنواخت  $D_{50}=0/91\text{mm}$  و انحراف معیار ذرات،  $\sigma_g=1/38$  ریخته شد ( $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$ ). در بالادست فلوم، مخزن جریان قرار داشت که آب پس از ورود به داخل آن آرام و سپس به فلوم وارد می‌شد. با استفاده از سر ریز مستطیلی لبه تیز هم‌عرض با کانال که در انتهای فلوم نصب شده دبی جریان اندازه‌گیری می‌شد. در این تحقیق از سه آبشکن اصلی استفاده شد که به‌صورت نفوذناپذیر، غیرمستغرق و عمود بر جهت جریان عمل می‌کردند. Zhang (2005) دریافت که در آبشکن‌های متوالی، آبشستگی آبشکن چهارم به بعد قابل توجه نیست. طول آبشکن‌های اصلی ( $L_f$ ) برابر ۲۵ سانتی‌متر بود که تنگ‌شدگی ۰/۲۵ را ایجاد می‌کرد. هم‌چنین فاصله آنها

(Copeland 1983, Li et al 2006). آبشستگی موضعی اطراف آبشکن‌ها به‌صورت فرسایش حفره‌ای عمیق ظاهر می‌شود و یکی از دلایل اصلی خرابی این نوع سازه‌ها است. یکی از شاخص‌های مهم در تعیین مشخصات حفره آبشستگی، حداکثر عمق آبشستگی است. تاکنون روش مشخصی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌ها ارائه نشده که علت آن پیچیدگی جریان اطراف آبشکن‌ها و پارامترهای مختلف مؤثر بر پدیده آبشستگی اطراف آنها می‌باشد (Li et al. 2006). محققان مختلف بررسی‌های آزمایشگاهی گوناگونی را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی یا پیش‌بینی آن با استفاده از معادلات حاصل از نتایج آزمایشگاهی انجام داده‌اند که از میان آنها می‌توان (Zaghloul (1983)؛ Neill (1973)؛ Gill (1972)؛ Froehlich (1989)؛ Richardson (1990) و Ghodsian and Vaghefi (2009) را نام برد. بیشتر مطالعات آزمایشگاهی بر روی تک آبشکن انجام شده که در رودخانه‌ها چنین چیزی کمتر متداول است. بلکه برای کارایی بهتر، معمولاً آبشکن‌ها را بصورت چند آبشکن متوالی می‌سازند (Zhang 2005).

روش‌های کاهش عمق آبشستگی اطراف سازه‌ها به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم سازه مستقیماً در برابر آبشستگی محافظت می‌شود، مانند استفاده از سنگریزه، کف‌پوش. در روش غیرمستقیم با استفاده از سازه‌هایی مانند آبشکن‌ها، دیواره‌های هادی، طوقه و مانند آن، جهت جریان تغییر یافته و فرسایش و عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (بدلی و همکاران ۱۳۸۷؛ Li et al. 2006). یکی از روش‌های غیرمستقیم کاهش دادن عمق آبشستگی موضعی آبشکن‌های اصلی، استفاده از آبشکن محافظ است. با به‌کارگیری آبشکن محافظ در بالادست مجموعه

انجام شد (شکل ۱). براساس اندازه‌گیری اولیه و همچنین تحقیقات قبلی، مدت زمان اندازه‌گیری‌ها ۱۸۰ ثانیه (۳ دقیقه) انتخاب گردید تا سرعت‌های اندازه‌گیری مستقل از زمان به‌دست آید و تمامی محدوده تغییر سرعت پوشش داده شود (Ge et al. 2005). برای این مدت زمان در هر نقطه، بیش از ۴۵۰۰ داده سرعت سه‌بعدی لحظه‌ای برداشت شد. سپس برداشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار WinADV پردازش شد (Wahl 2000). با استفاده از این نرم‌افزار اندازه‌گیری‌هایی که ضریب همبستگی کمتر از ۰/۷ و نسبت سیگنال به نویز (SNR) کمتر از ۱۵ داشتند، از داده‌ها حذف شد. سرعت‌های لحظه‌ای  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  اندازه‌گیری شده است. از آنجا که ویژگی‌های جریان در این آزمایش‌ها در اطراف آبشکن اول مهم بوده، لذا منطقه اندازه‌گیری به ناحیه اطراف دو آبشکن اصلی اول و دوم و آبشکن محافظ محدود شد (شکل ۱).

### ۳- آزمایش شاهد (بدون آبشکن محافظ)

طبق نتایج محققان قبلی (Melville, 1997) حداکثر عمق آبشستگی در حالت آستانه حرکت ذرات بستر ( $U=U_{cr}$ ) ایجاد می‌شود ( $U_{cr}$ =سرعت آستانه حرکت ذرات بستر). بر این اساس، برای دستیابی به شرایط حداکثر عمق آبشستگی، آزمایش‌های این تحقیق، نزدیک به آستانه حرکت ( $U/U_{cr}=0.95$ ) انجام شد. بدین منظور چند آزمایش اولیه با عمق و دبی‌های مختلف انجام شد و آستانه حرکت ذرات به‌دست آمد. در هر یک از شرایط فوق نسبت  $U/U_{cr}$  نیز که شاخص آستانه حرکت ذرات است محاسبه شد. در این مطالعه، دبی ۵۲ لیتر بر ثانیه بر اساس آزمایش‌های تعیین آستانه حرکت ذرات برای نسبت  $U/U_{cr}=0.95$  به‌دست آمده است.

برابر ۵۰ سانتی‌متر ( $2L_f$ ) بود، زیرا تحقیقات قبلی این ابعاد را برای عملکرد بهینه آبشکن‌ها پیشنهاد کرده‌اند (Zhang 2005). برای ساخت آبشکن‌ها از پلکسی گلاس با ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شد. انجام آزمایش‌ها به این شکل بود که در آغاز هر آزمایش، فلوم آزمایشگاهی به آرامی با استفاده از لوله‌ای از آب پر می‌شد تا مصالح کف کاملاً اشباع شوند، سپس دریچه انتهای فلوم که به‌منظور تنظیم سطح آب ایجاد شده بالا آورده می‌شد. سپس دبی جریان برابر ۵۲ لیتر بر ثانیه تنظیم شده و به آرامی با پایین آوردن دریچه، عمق آب در کانال تنظیم می‌شد. در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان ( $Y$ ) در بالادست ثابت و برابر ۱۵ سانتی‌متر بود. تمامی آزمایش‌ها در شرایط آب صاف ( $U/U_{cr}<1$ ) و در آستانه حرکت ذرات انجام شد. در پایان هر آزمایش آب داخل فلوم زهکشی شده و تغییرات بستر اطراف آبشکن‌ها با استفاده از دستگاه لیزری برداشت توپوگرافی بستر<sup>۱</sup> ثبت می‌شد. این دستگاه می‌تواند تغییرات کف در عرض فلوم را با دقت ۱ میلی‌متر و در عمق با دقت ۰/۱ میلی‌متر با حرکت دستی اندازه‌گیری کند. در هر آزمایش بیش از ۶۰۰۰۰ داده از تغییرات بستر اطراف آبشکن‌ها ( $x,y,z$ ) برداشت شد.

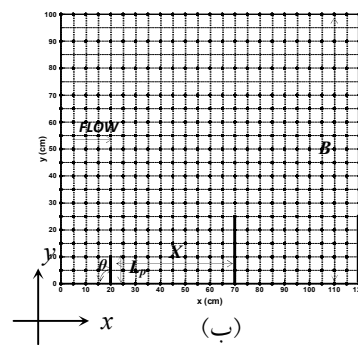
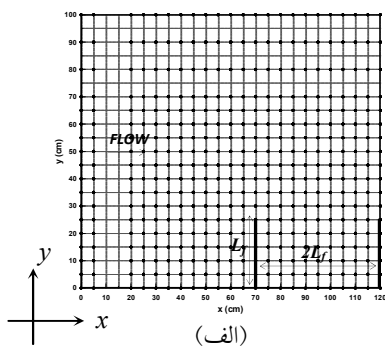
در این تحقیق برای آگاهی از فیزیک مسأله، از دستگاه ADV<sup>۲</sup> ساخت شرکت Nortek با کلاهک رو به پایین<sup>۳</sup> و فرکانس ۲۵ هرتز، برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت سه‌بعدی لحظه‌ای در بستر صلب در دو آزمایش استفاده شد. برای شبیه‌سازی بستر صلب، ذرات بستر بر روی ورق گالوانیزه چسبانیده و در کف فلوم در اطراف آبشکن‌ها قرار داده شد. در این آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌های سرعت در صفحه  $xy$  و نزدیک به کف بستر ( $z=1\text{cm}$ )

1. Laser Bed Profiler
2. Acoustic Doppler Velocimeter
3. Downlooking

آبشستگی (t) ثبت شد (شکل ۲). مشاهده نشان داد که برای دستیابی به عمق آبشستگی نزدیک به عمق آبشستگی (بیش از ۹۰ درصد از آبشستگی نهایی) لازم است زمان آزمایش‌ها برابر ۱۸۰۰ دقیقه (۳۰ ساعت) انتخاب شود. بدین ترتیب مدت زمان انجام تمامی آزمایش‌ها برابر ۳۰ ساعت انتخاب شد.

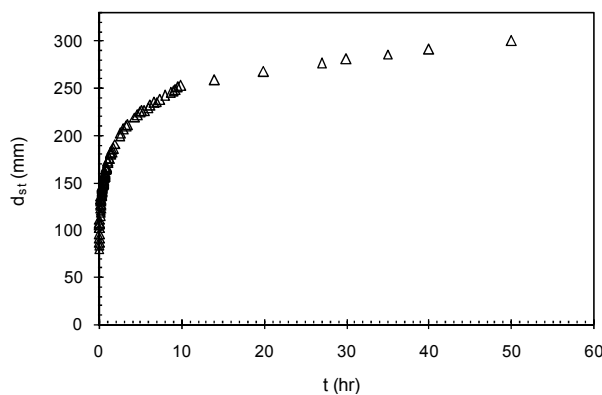
پس از تعیین مدت زمان آزمایش‌ها، آزمایش شاهد انجام و پس از ۳۰ ساعت تغییرات بستر اطراف آبشکن‌ها توسط دستگاه LBP برداشت شد. حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن اول و دوم و سوم به ترتیب برابر ۲۸۱، ۷۸ و ۱۰۳ میلی‌متر به دست آمد و حجم آبشستگی کل در حدود ۰/۱۱۷۱ مترمکعب برآورد شد.

آزمایش شاهد با استفاده از سه آبشکن اصلی برای تعیین مقدار حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن اصلی و مقایسه با آزمایش‌های اصلی (با آبشکن محافظ) انجام شده است. در آزمایش شاهد دبی جریان (Q) برابر ۵۲ لیتر بر ثانیه، متوسط سرعت جریان (U) برابر ۰/۳۵ متر بر ثانیه، سرعت برشی ( $u^*$ ) برابر ۰/۱۹۴ متر بر ثانیه، عدد فرود جریان (Fr) برابر ۰/۲۹ و عدد رینولدز جریان (Re) برابر ۱۶۰۰۰۰ بوده است. یکی از مهمترین پارامترها در آزمایش‌های آبشستگی، مدت زمان آزمایش است. برای تعیین مدت زمان لازم برای انجام آزمایش‌ها، آزمایش دراز مدتی برای  $U/U_{cr}=0.95$  انجام و تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن اول ( $d_{st}$ ) نسبت به زمان



شکل ۱ پارامترهای آزمایش‌ها و موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در صفحه xy ( $z=1\text{cm}$ )

(الف) آزمایش شاهد (بدون آبشکن محافظ)؛ (ب) آزمایش اصلی با آبشکن محافظ ( $L_p/L_r=0.4$ ,  $X/L_r=2$ ,  $\theta=90^\circ$ )



شکل ۲ تغییرات زمانی آبشستگی اطراف آبشکن اول ( $U/U_{cr}=0.95$ )

مختلف پارامترهای آبشکن محافظ مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. بنابراین آبشکن محافظ با نسبت‌های مختلف  $L_p/L_f = 0/8, 0/6, 0/4, 0/2$  و  $L_p/L_f = 1, 1/5$ ،  $X/L_f = 2/5$  و سه زاویه مختلف  $\theta = 45, 90, 135^\circ$  آزمایش شد. تأثیر این پارامترها بر آبشستگی در سه آبشکن اصلی بررسی شد. نتایج آزمایش‌های اصلی در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، نتایج عبارتند از: عمق آبشستگی نسبی در اطراف هر آبشکن ( $d_{sp}$ ) حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن محافظ؛  $d_{s1}$ ،  $d_{s2}$  و  $d_{s3}$  = حداکثر عمق آبشستگی اطراف به ترتیب اولین، دومین و سومین آبشکن اصلی)، درصد کاهش آبشستگی در اطراف هر آبشکن و متوسط درصد کاهش آبشستگی در اطراف آبشکن اصلی ( $R_{SD1}(\%)$ ،  $R_{SD2}(\%)$  و  $R_{SD3}(\%)$  = درصد کاهش عمق آبشستگی به ترتیب در اطراف اولین، دومین و سومین آبشکن اصلی؛  $R_{AV}(\%)$  = متوسط درصدهای کاهش عمق آبشستگی در اطراف تمامی آبشکن‌های اصلی).

یادآور می‌شود که کاهش عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد محاسبه شده و همچنین  $L_e =$  طول مؤثر آبشکن محافظ برابر است با  $L_p \times \sin \theta$ . برای ارزیابی نتایج جدول ۱، دو معیار ارزیابی به شرح ذیل در نظر گرفته شده: معیار ۱- حداکثر درصد کاهش عمق آبشستگی در اطراف آبشکن اول که در جدول به صورت  $R_{SD1}(\%)$  نشان داده شده و ۲- حداکثر متوسط درصد کاهش عمق آبشستگی در اطراف تمامی آبشکن‌های اصلی که در جدول به صورت  $R_{AV}(\%)$  نشان داده شده است. ۱۰ درصد برتر آزمایش‌ها با توجه به هر یک از معیارهای بالا به‌طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج آزمایش شاهد نشان داد که شکل کلی آبشستگی در دماغه تمامی آبشکن‌ها مانند هرم وارونه‌ای است که شعاع آن در اعماق پایین‌تر کمتر می‌شود. در تمامی آزمایش‌ها بیشترین حجم و عمق آبشستگی همواره مربوط به آبشکن اول بوده است. در تمامی آزمایش‌ها مکان بیشترین عمق آبشستگی برای آبشکن‌ها در نزدیکی دماغه آبشکن بود. شیب حفره آبشستگی در بالادست حفره، همواره بیشتر از شیب پایین‌دست بود. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که متوسط شیب در بالادست حفره آبشستگی نزدیک به زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر ( $\theta$ ) است. متوسط زاویه حفره آبشستگی در بالادست حفره نزدیک به  $30^\circ$  درجه به دست آمد، حال آنکه با انجام آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر در این آزمایش در حدود  $\theta = 30^\circ$  حاصل شد. این نتیجه تأییدی است بر مشاهدات (Dey and Barbhuiya (2005a) در رابطه با پایه و کوله پل.

#### ۴- آزمایش‌های اصلی (با استفاده از آبشکن محافظ)

پس از انجام آزمایش شاهد، آزمایش‌های اصلی با استفاده از آبشکن محافظ برای بررسی تأثیر آن بر آبشستگی در آبشکن‌های اصلی انجام شد. شکل ۱ طرحی را از پارامترهای هندسی آزمایش نشان می‌دهد. در این شکل  $B =$  عرض فلوم؛  $L_f =$  طول آبشکن اصلی،  $L_p =$  طول آبشکن محافظ؛  $X =$  فاصله آبشکن محافظ از اولین آبشکن و  $\theta =$  زاویه آبشکن محافظ نسبت به جهت جریان است. در آزمایش‌های اصلی، با جایگذاری آبشکن محافظ بالادست مجموعه آبشکن‌ها (شکل ۱)، تأثیر طول ( $L_p$ )، فاصله ( $X$ )، و زاویه آبشکن محافظ ( $\theta$ ) بررسی شد. با توجه به اینکه  $L_f$  معادل ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد، مقادیر

جدول ۱ مشخصات و نتایج آزمایش‌ها برای آبشکن محافظ

$R_{AV}$ (%)	$R_{SD3}$ (%)	$R_{SD2}$ (%)	$R_{SD1}$ (%)	$d_{S3}/Y$	$d_{S2}/Y$	$d_{S1}/Y$	$d_{SP}/Y$	$L_p/B$	$X/L_f$	$\theta$ (deg)	$L_p/L_f$	شماره آزمایش
-	-	-	-	0.687	0.520	1.873	-	-	-	-	-	آزمایش شاهد
28.1	17.5	51.3	15.7	0.567	0.253	1.580	0.753	0.035	1	45	0.2	1
43.0	21.4	79.5	28.1	0.540	0.107	1.347	0.787	0.035	1.5	45	0.2	2
46.8	24.3	82.1	34.2	0.520	0.093	1.233	0.553	0.035	2	45	0.2	3
46.1	33.0	76.9	28.5	0.460	0.120	1.340	0.627	0.035	2.5	45	0.2	4
22.8	6.8	50.0	11.7	0.640	0.260	1.653	0.847	0.05	1	90	0.2	5
55.3	37.9	92.3	35.6	0.427	0.040	1.207	0.693	0.05	1.5	90	0.2	6
43.6	19.4	74.4	37.0	0.553	0.133	1.180	0.627	0.05	2	90	0.2	7
51.9	31.1	92.3	32.4	0.473	0.040	1.267	0.740	0.05	2.5	90	0.2	8
20.3	6.8	41.0	13.2	0.640	0.307	1.627	0.967	0.035	1	135	0.2	9
37.3	9.7	75.6	26.7	0.620	0.127	1.373	0.773	0.035	1.5	135	0.2	10
43.9	17.5	80.8	33.5	0.567	0.100	1.247	0.507	0.035	2	135	0.2	11
40.8	18.4	70.5	33.5	0.560	0.153	1.247	0.447	0.035	2.5	135	0.2	12
49.3	34.0	78.2	35.6	0.453	0.113	1.207	1.040	0.071	1	45	0.4	13
57.2	38.8	92.3	40.6	0.420	0.040	1.113	0.973	0.071	1.5	45	0.4	14
58.8	44.7	96.2	35.6	0.380	0.020	1.207	1.100	0.071	2	45	0.4	15
60.3	52.4	100.0	28.5	0.327	0.000	1.340	1.107	0.071	2.5	45	0.4	16
43.7	23.3	70.5	37.4	0.527	0.153	1.173	1.180	0.1	1	90	0.4	17
43.6	35.0	64.1	31.7	0.447	0.187	1.280	1.233	0.1	1.5	90	0.4	18
56.9	54.4	78.2	38.1	0.313	0.113	1.160	1.213	0.1	2	90	0.4	19
65.8	44.7	100.0	52.7	0.380	0.000	0.887	1.067	0.1	2.5	90	0.4	20
28.9	6.8	56.4	23.5	0.640	0.227	1.433	0.873	0.071	1	135	0.4	21
36.9	10.7	64.1	35.9	0.613	0.187	1.200	0.873	0.071	1.5	135	0.4	22
47.5	35.9	75.6	31.0	0.440	0.127	1.293	0.927	0.071	2	135	0.4	23
56.4	33.0	97.4	38.8	0.460	0.013	1.147	0.860	0.071	2.5	135	0.4	24
58.8	50.5	80.8	45.2	0.340	0.100	1.027	1.220	0.106	1	45	0.6	25
53.9	57.3	70.5	33.8	0.293	0.153	1.240	1.387	0.106	1.5	45	0.6	26
72.5	67.0	100.0	50.5	0.227	0.000	0.927	1.280	0.106	2	45	0.6	27
67.3	57.3	100.0	44.5	0.293	0.000	1.040	1.287	0.106	2.5	45	0.6	28
50.3	42.7	60.3	48.0	0.393	0.207	0.973	1.313	0.15	1	90	0.6	29
55.1	59.2	57.7	48.4	0.280	0.220	0.967	1.407	0.15	1.5	90	0.6	30
58.2	57.3	65.4	52.0	0.293	0.180	0.900	1.420	0.15	2	90	0.6	31
75.0	69.9	89.7	65.5	0.207	0.053	0.647	1.307	0.15	2.5	90	0.6	32
22.6	4.9	38.5	24.6	0.653	0.320	1.413	1.020	0.106	1	135	0.6	33
34.0	25.2	50.0	26.7	0.513	0.260	1.373	1.153	0.106	1.5	135	0.6	34
43.5	43.7	61.5	25.3	0.387	0.200	1.400	1.140	0.106	2	135	0.6	35
67.3	58.3	97.4	46.3	0.287	0.013	1.007	0.967	0.106	2.5	135	0.6	36
67.4	69.9	78.2	54.1	0.207	0.113	0.860	1.447	0.141	1	45	0.8	37
69.0	75.7	78.2	53.0	0.167	0.113	0.880	1.527	0.141	1.5	45	0.8	38
76.6	62.1	100.0	67.6	0.260	0.000	0.607	1.447	0.141	2	45	0.8	39
72.6	59.2	100.0	58.7	0.280	0.000	0.773	1.533	0.141	2.5	45	0.8	40
53.3	68.9	30.8	60.1	0.213	0.360	0.747	1.460	0.2	1	90	0.8	41
51.7	64.1	24.4	66.5	0.247	0.393	0.627	1.520	0.2	1.5	90	0.8	42
55.2	65.0	26.9	73.7	0.240	0.380	0.493	1.527	0.2	2	90	0.8	43
60.5	63.1	43.6	74.7	0.253	0.293	0.473	1.620	0.2	2.5	90	0.8	44
21.5	10.7	37.2	16.7	0.613	0.327	1.560	1.173	0.141	1	135	0.8	45
35.8	38.8	37.2	31.3	0.420	0.327	1.287	1.280	0.141	1.5	135	0.8	46
43.8	49.5	50.0	32.0	0.347	0.260	1.273	1.273	0.141	2	135	0.8	47
60.0	61.2	74.4	44.5	0.267	0.133	1.040	1.280	0.141	2.5	135	0.8	48

برای نمونه شکل ۳، توپوگرافی بستر آبشستگی را بین آزمایش شاهد و یک آزمایش اصلی (آزمایش ۱۹) نشان می‌دهد. با مقایسه این دو شکل دیده می‌شود که مطابق انتظار، آبشکن محافظ نقش محافظ آبشکن‌های اصلی را در برابر آبشستگی ایفا می‌کند. این محافظت به‌ویژه در مورد آبشکن اول درست است. برای نمونه، حجم کل حفره‌های آبشستگی در اطراف آبشکن‌های اصلی و محافظ برای آزمایش ۱۹ در حدود ۰/۰۷۰۸ مترمکعب است که در مقایسه با آزمایش شاهد (۰/۱۱۷۱ مترمکعب) کاهش ۴۰ درصدی را در حجم حفره‌های آبشستگی نشان می‌دهد.

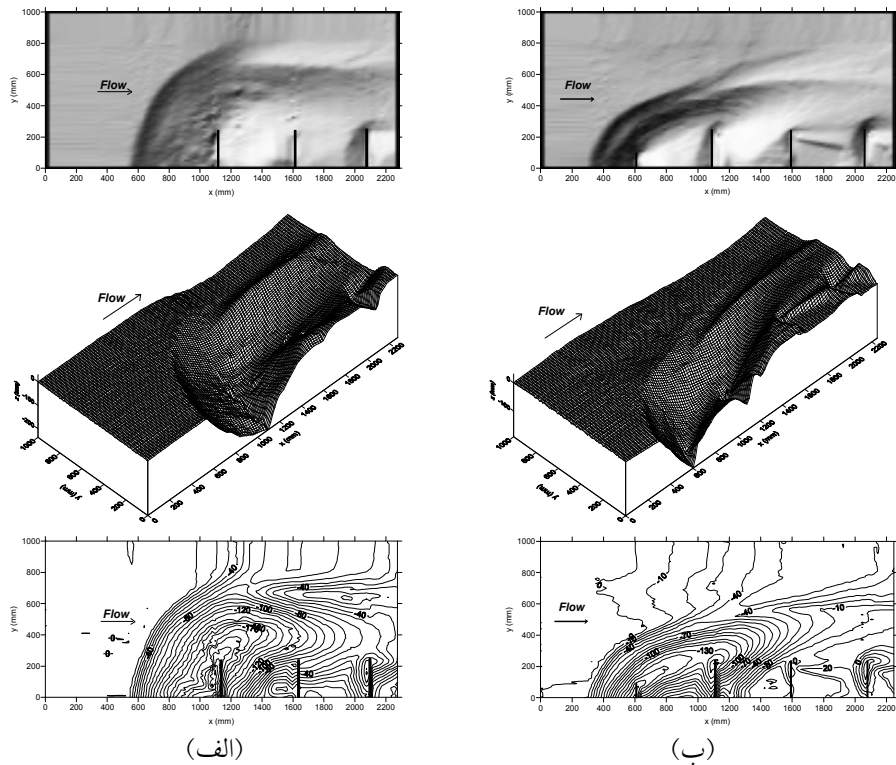
#### ۵- مطالعه اثر آبشکن محافظ بر محدوده جریان در اطراف آبشکن‌های اصلی

برای مطالعه تأثیر آبشکن محافظ بر خصوصیات جریان، محدوده جریان در دو آزمایش متناظر با شکل ۳، در بستر صلب برداشت شد. به دلیل اهمیت خصوصیات جریان در نزدیکی بستر، اندازه‌گیری‌های سرعت در نزدیکی بستر ( $z=1\text{cm}$ ) و مطابق شکل ۱ انجام شد.

تحلیل جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که استفاده از آبشکن محافظ با  $\theta=90^\circ$ ،  $X/L_f=2/5$ ،  $L_p/L_f=0/8$  (آزمایش ۴۴) بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی را در اطراف اولین آبشکن (۷۴/۷٪ کاهش) در پی دارد؛ در حالی که آبشکن محافظ با  $\theta=45^\circ$ ،  $X/L_f=2$ ،  $L_p/L_f=0/8$  (آزمایش ۳۹) به بیشترین کاهش از نظر معیار دوم با کاهش متوسط ۷۶/۶ درصد منجر می‌شود (جدول ۲). جالب است که آبشکن‌های محافظ در ۱۰ درصد برتر با توجه به هردو معیار، ویژگیهای مشابه زیر را دارند:  $\theta=45^\circ$  یا  $\theta=90^\circ$  (بدین معنا که این دو زاویه بهتر از زاویه ۱۳۵ درجه هستند)؛  $0/6$  یا  $L_p/L_f=0/8$ ؛  $2/5$  یا  $X/L_f=2$ . آبشکن‌های محافظ در ۱۰ درصد برتر با توجه به اولین معیار این ویژگی خاص را دارند که معمولاً بزرگترین طول‌های مؤثر در بین آزمایش‌ها، موجب بیشترین کاهش در عمق آبشستگی در اطراف اولین آبشکن می‌شوند. به عکس، ۱۰ درصد برتر آزمایش‌ها با توجه به معیار دوم، لزوماً بیشترین طول را برای آبشکن محافظ مربوط نیاز ندارند. در تمامی آزمایش‌ها مقایسه تغییرات بستر بین آزمایش شاهد (بدون آبشکن محافظ) و آزمایش اصلی (با استفاده از آبشکن محافظ) در کاهش عمق آبشستگی انجام شد.

جدول ۲ ده درصد برتر آزمایش‌های آبشکن محافظ (۵ آزمایش از ۴۸ آزمایش) با توجه به معیار ۱ و ۲

شماره آزمایش	$L_p/L_f$	$\theta$ (deg)	$X/L_f$	Le (mm)	$R_{SD1}$ (%)	$R_{AV}$ (%)
معیار ۱	08	90	25	200	74.7	60.5
	08	90	2	200	73.7	55.2
	08	45	2	141	67.6	76.6
	08	90	1.5	200	66.5	51.7
	06	90	25	150	65.5	75
معیار ۲	08	45	2	141	67.6	76.6
	06	90	25	150	65.5	75
	08	45	25	141	58.7	72.6
	06	45	2	106	50.5	72.5
	08	45	1.5	141	53	69



شکل ۳ مقایسه تغییرات بستر: (الف) آزمایش اصلی و (ب) آزمایش شاهد (آزمایش ۱۹)

تنش برشی بستر همواره به عنوان یکی از معیارهای انتقال رسوب و آبشستگی شناخته می‌شود. بر اساس تحقیقات انجام شده محدوده‌های دارای تنش برشی بیشتر، محتمل‌ترین مناطق برای آبشستگی هستند. با استفاده از تنش‌های رینولدزی نزدیک بستر می‌توان تقریبی از تنش برشی بستر به دست آورد.

در دو آزمایش حاضر، در نزدیکی بستر ( $z=0.5\text{cm}$ ) سرعت‌های جریان برداشت و با استفاده از آنها تنش‌های رینولدزی محاسبه شد. با استفاده از رابطه  $\tau_b = \sqrt{(\tau_b^x)^2 + (\tau_b^y)^2}$  می‌توان مقداری تقریبی را برای تنش برشی بستر به دست آورد (Dey and Barbhuiya, 2005b). در این رابطه  $\tau_b$  تنش برشی بستر بوده و  $\tau_b^x = -\rho(\overline{u'w'} + \overline{u'v'})$ ،  $\tau_b^y = -\rho(\overline{v'w'} + \overline{v'u'})$  در مطالعه حاضر، برای بی‌بعدسازی تنش برشی بستر، از

مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت اندازه‌گیری شده مطابق روابط زیر بی‌بعد شده است.

$$\hat{u} = \overline{u}/U \quad (1)$$

$$\hat{v} = \overline{v}/U \quad (2)$$

$$\hat{w} = \overline{w}/U \quad (3)$$

در این روابط  $\overline{u}$ ،  $\overline{v}$  و  $\overline{w}$  میانگین زمانی سرعت لحظه‌ای در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  و  $U$  متوسط سرعت جریان در بالادست است. همچنین انرژی جنبشی آشفتگی جریان تحلیل و با رابطه (۴) بی‌بعد شده است. در این رابطه  $K$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  تغییرات لحظه‌ای مؤلفه‌های سرعت و  $u_*$  سرعت برشی جریان در بالادست است:

$$\hat{K} = K/u_*^2 = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/u_*^2 \quad (4)$$



سرعت ( $\hat{w}$ ) نشان می‌دهد که در آزمایش شاهد در بالادست آبشکن اول یک جریان پائین‌رونده وجود دارد. هنگامی که جریان اصلی فلوم با آبشکن اول برخورد می‌کند، مؤلفه اصلی سرعت جریان یعنی  $\hat{u}$  (سرعت جریان در راستای فلوم) صفر شده و سرعت به فشار تبدیل می‌شود. از آنجا که مقدار  $\hat{u}$  از تراز سطح آزاد به سمت کف کاهش می‌یابد (تغییرات سرعت در عمق) در نتیجه فشار از پیشانی آبشکن به سمت بستر کم می‌شود. این گرادیان فشار ایجاد شده در عمق سبب می‌شود که خطوط جریان تغییر جهت داده و به سمت کف فلوم متمایل شوند. یعنی اندازه  $\hat{W}$  (سرعت جریان در راستای عمود بر بستر) افزایش می‌یابد و جریان پایین‌رونده شکل می‌گیرد. شکل ۴-ج، نشان می‌دهد که در بالادست آبشکن اول  $\hat{W}$  مثبت است، بنابراین در بالادست آبشکن اول، به خلاف آزمایش شاهد، جریان پایین‌رونده وجود ندارد. بنابراین نتیجه بسیار جالب آن است که آبشکن محافظ موجب شده است که روند شکل‌گیری گردابه نعل اسبی در بالادست آبشکن اول از بین برود. تأثیر آبشکن محافظ بر سرعت برآیند ( $\hat{v}$ ) در شکل ۴-د نشان داده شده است. مشابه آزمایش شاهد، به دلیل بزرگتر بودن مؤلفه طولی سرعت ( $\hat{u}$ ) و غالب بودن این مؤلفه بر دو مؤلفه دیگر، بیشترین مقدار  $\hat{v}$  در محل بیشینه  $\hat{u}$  رخ داده است. در آزمایش اصلی، حداکثر  $\hat{v}$  نسبت به آزمایش شاهد کاهش یافته است. بعد از آبشکن محافظ و تا دماغه آبشکن دوم، دو محدوده متفاوت  $\hat{v}$  وجود دارد: در ناحیه داخلی، محدوده‌ای وجود دارد که در آن  $\hat{v}$  بسیار کم بوده و نشان‌دهنده ناحیه جریان چرخشی بین آبشکن‌ها است. در واقع جریان اصلی در ناحیه‌ای که  $\hat{v}$  بزرگ است، ایجاد می‌شود.

با به‌کار بردن آبشکن محافظ، عرض ناحیه جداشدگی در

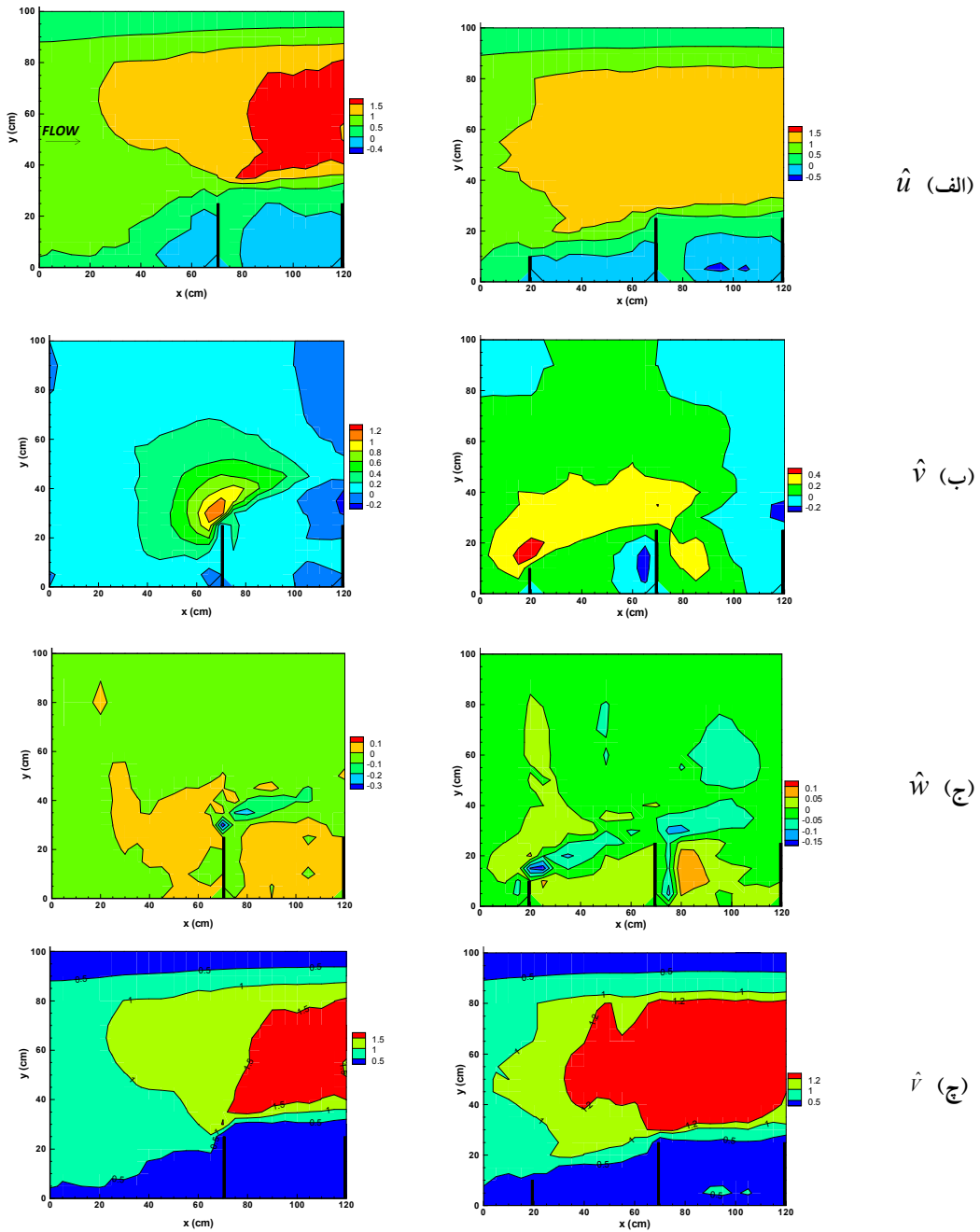
تنش بحرانی استفاده شد. تنش بحرانی ذرات بستر از رابطه  $\tau_{cr} = \rho u_{*cr}^2$  به دست می‌آید. در این رابطه  $u_{*cr}$  سرعت برشی بحرانی است که از روی دیاگرام شیلدز برابر  $0.213$  متر بر ثانیه به دست آمد. برای شرایط حاکم بر این آزمایشها،  $\tau_{cr}$  برابر  $0.4566$  پاسکال محاسبه شد. بدین ترتیب، تنش برشی بی‌بعد بستر ( $\hat{\tau}_b$ ) با تقسیم تنش برشی بستر بر تنش بحرانی ( $\hat{\tau}_b = \tau_b / \tau_{cr}$ ) حاصل می‌شود.

نتایج تحلیل پارامترهای بالا در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی شکل ۴-الف نشان می‌دهد که در آزمایش شاهد با به‌کار بردن آبشکن‌های اصلی در فلوم، پارامتر  $\hat{u}$  نسبت به بالادست آبشکن‌ها در حدود  $50\%$  درصد افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در فاصله بین آبشکن اول و دوم اتفاق می‌افتد. بالادست آبشکن اول و نزدیک بدنه فلوم و همچنین بین آبشکن اول و دوم مقدار  $\hat{u}$  منفی بوده و نشان‌دهنده جریان برگشتی است. با به‌کار بردن آبشکن محافظ، حداکثر  $\hat{u}$  نسبت به آزمایش شاهد در حدود  $50\%$  درصد کاهش یافته است. زیرا با به‌کار بردن آبشکن محافظ، عرض ناحیه جداشدگی در دماغه آبشکن اول کاهش یافته و بنابراین عرض بیشتری از فلوم در اختیار جریان اصلی قرار گرفته (شکل ۴-د) و لذا بر طبق قانون پیوستگی جریان، مقدار  $\hat{u}$  در آزمایش اصلی، به دلیل زیاده‌تر شدن عرض جریان، نسبت به آزمایش شاهد کاهش می‌یابد. بررسی مؤلفه عرضی سرعت  $\hat{v}$  (شکل ۴-ب) بیانگر آن است که بیشترین مقدار  $\hat{v}$  در نزدیکی نوک آبشکن اول و کمترین مقدار آن در نزدیکی نوک آبشکن دوم به علت جریان برگشتی رخ می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در آزمایش اصلی با آبشکن محافظ حدود  $67\%$  درصد از مؤلفه عرضی سرعت ( $\hat{v}$ ) در نوک آبشکن اول نسبت به آزمایش شاهد کاهش یافته است. بررسی مؤلفه قائم

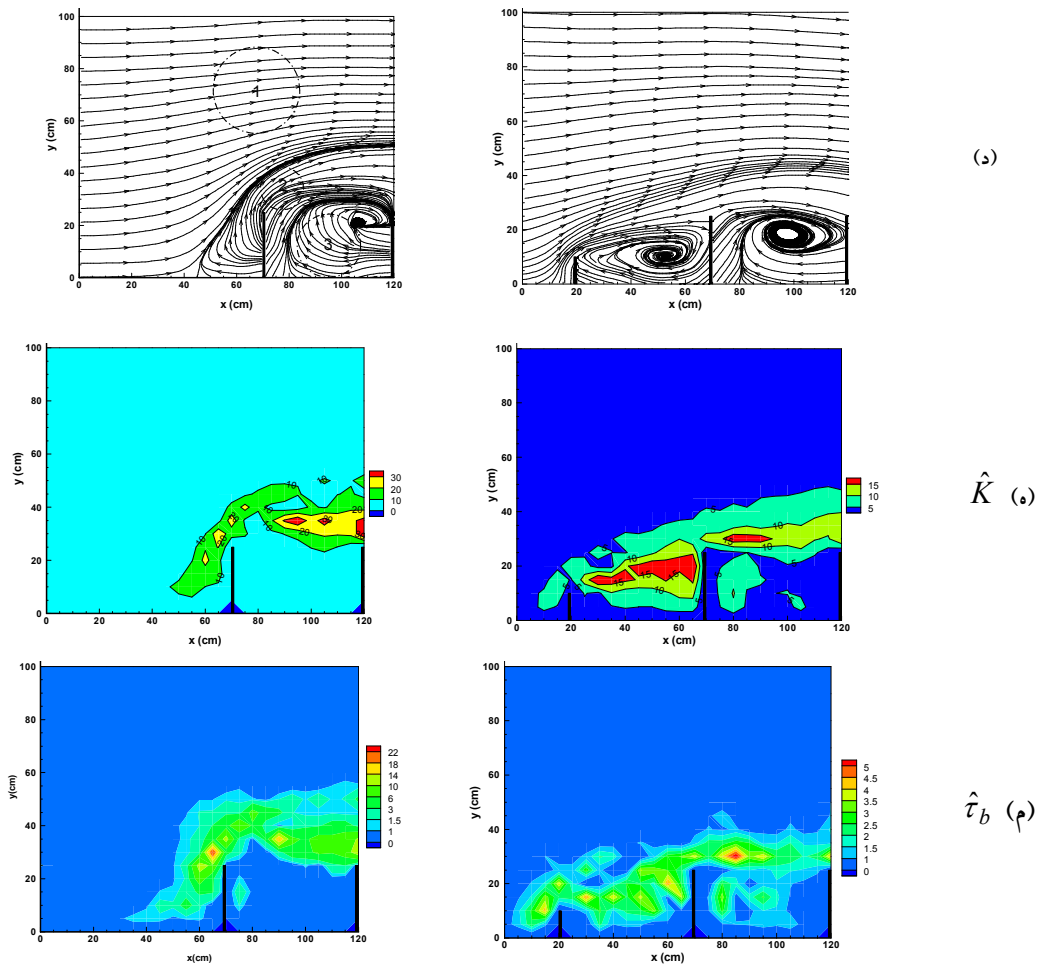
محدوده‌ای در اطراف آبشکن اول وجود دارد که در آن افزایش یافته و نشان‌دهنده حرکت گردابه‌ای است که  $\hat{K}$  گرداب اولیه نام دارد و در واقع سازوکار اصلی آبشستگی توسط این گردابه شکل می‌گیرد. آبشکن محافظ به‌خوبی توانسته در حدود ۵۰ درصد از انرژی جنبشی آشفتگی پیرامون آبشکن اول و قدرت گردابه را کاهش دهد. اگر کف فلوم فرسایش‌پذیر باشد، انتظار می‌رود که در محدوده‌هایی که  $\hat{t}_b$  بیشتر از یک باشد، پدیده آبشستگی مشاهده شود. بررسی شکل ۴-م نشان می‌دهد که در آزمایش شاهد با قرار دادن آبشکن‌ها در فلوم،  $\hat{t}_b$  در اطراف آبشکن اول به سمت پایین‌دست افزایش یافته و بیشتر از یک شده است، بنابراین در بستر فرسایش‌پذیر پدیده آبشستگی روی خواهد داد. مقایسه توزیع  $\hat{t}_b$  در آزمایش اصلی با توزیع  $\hat{t}_b$  در آزمایش شاهد نشان می‌دهد که آبشکن محافظ به‌خوبی تنش‌های برشی بستر را کاهش داده است. بیشترین مقدار  $\hat{t}_b$  در آزمایش اصلی برابر ۵/۵ محاسبه شده که نسبت به بیشترین مقدار  $\hat{t}_b$  در آزمایش شاهد در حدود ۷۶ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، آبشکن محافظ، در محدوده آبشکن‌های اصلی، عرض ناحیه  $\hat{t}_b > 1$  را نیز کاهش داده است. در آزمایش اصلی تا عرض حدود ۴۰ سانتی‌متری،  $\hat{t}_b$  بیشتر از یک دیده می‌شود، در حالی که در آزمایش شاهد تا حدود ۵۵ سانتی‌متری،  $\hat{t}_b$  بیشتر از یک وجود دارد. بنابراین آبشکن محافظ علاوه بر این‌که عمق‌های آبشستگی را کاهش می‌دهد، عرض محدوده آبشستگی را نیز کم کرده است. بررسی الگوی آبشستگی ایجاد شده در آزمایش شاهد و اصلی (شکل ۳) نشان می‌دهد که تحلیل‌های حاصل از برداشت‌های سرعت و توزیع تنش برشی کف در بستر صلب، به‌خوبی تأثیر آبشکن محافظ را بر الگوی آبشستگی و رسوبگذاری پیش‌بینی کرده است.

دماغه آبشکن اول کاهش می‌یابد، بنابر این عرض بیشتری از فلوم در اختیار جریان اصلی قرار گرفته و لذا بر طبق قانون پیوستگی جریان،  $\hat{v}$  در آزمایش اصلی به دلیل بزرگتر شدن عرض جریان، نسبت به  $\hat{v}$  در آزمایش شاهد کاهش می‌یابد.

برای درک بهتر الگوی جریان، خطوط جریان در شکل ۴-د ترسیم شده است. به‌طور کلی می‌توان جریان را در محدوده آبشکن‌ها (آزمایش شاهد) به سه ناحیه تقسیم کرد: ناحیه ۱ که جریان اصلی در آن واقع شده و از منطقه جدایی جریان در نوک آبشکن اول تا دیوار مقابل فلوم را شامل می‌شود. ناحیه ۲، ناحیه‌ای است که جدایی جریان بعد از آبشکن اول و گردابه‌های دنباله‌دار<sup>۲</sup> در این ناحیه واقع می‌شود. ناحیه ۳، ناحیه جریان برگشتی بین دو آبشکن اول و دوم است. در آزمایش شاهد، عرض جداشدگی جریان در حدود ۶۰ سانتی‌متر است. در این شکل جریان برگشتی در بالادست آبشکن اول کاملاً مشهود است و همچنین بین آبشکن اول و دوم یک گرداب پایدار وجود دارد که در جهت ساعتگرد می‌چرخد. مقایسه خطوط جریان در آزمایش شاهد و آزمایش اصلی نشان می‌دهد که آبشکن محافظ، مانند تبدیل تدریجی در بالادست مجموعه آبشکن‌ها عمل کرده و از تغییر ناگهانی خصوصیات جریان در اطراف آبشکن اول جلوگیری می‌کند. در آزمایش اصلی بین آبشکن محافظ و آبشکن اول یک گرداب پایدار مشاهده می‌شود و همچنین آبشکن محافظ، عرض ناحیه جداشدگی را در نوک آبشکن اول کاهش داده و عرض بیشتری را در اختیار جریان اصلی قرار داده است. تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی نسبی ( $\hat{K}$ ) در اطراف آبشکن‌ها در شکل ۴-ه نشان داده شده است. در آزمایش شاهد



شکل ۴ اثر آبشکن محافظ بر ویژگیهای جریان در اطراف آبشکن‌های اصلی در صفحه  $xy$  ( $z=1\text{cm}$ ): (الف) سرعت نسبی  $\hat{u}$ ، (ب) سرعت نسبی  $\hat{v}$ ، (ج) سرعت نسبی  $\hat{w}$ ، (د) خطوط جریان و (ه) انرژی جنبشی آشفتگی نسبی  $\hat{K}$ ، (م) تنش برشی بی‌بعد بستر  $\hat{\tau}_b$  (شکل‌های سمت راست با آبشکن محافظ و شکل‌های سمت چپ آزمایش شاهد می‌باشند).



ادامه شکل ۴

طرفی هرچه طول آبشکن محافظ افزایش یابد، عمق آبشستگی در اطراف آن افزایش می‌یابد (شکل ۶). در مجموع، طول نسبی آبشکن محافظ برابر  $0.6$  می‌تواند به‌عنوان طول مؤثر آبشکن محافظ در نظر گرفته شود. از آنجاکه آبشکن اول دارای بیشترین عمق آبشستگی بوده و نقش مهمی در آبشکن‌های متوالی ایفا می‌نماید، لذا در ادامه تأثیر پارامترهای آبشکن محافظ فقط بر آبشکل اصلی اول بررسی می‌شود.

شکل ۷ تأثیر طول نسبی آبشکن محافظ را بر عمق آبشستگی در اطراف اولین آبشکن اصلی در آزمایش‌هایی

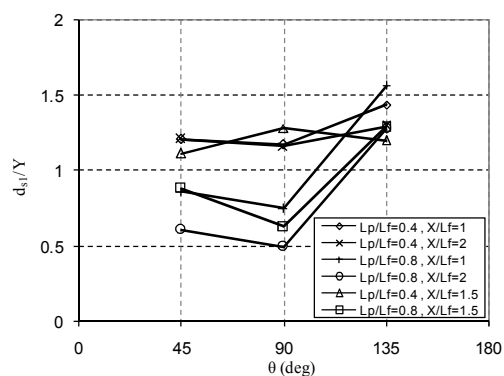
## ۶- بررسی تأثیر پارامترهای آبشکن محافظ

### ۶-۱- اثر طول آبشکن محافظ بر آبشستگی

شکل ۵ اثر هر یک از طول‌های بهینه آبشکن محافظ حاصل از بیشترین کاهش عمق آبشستگی در اطراف آبشکن‌های اصلی را بر عمق نسبی آبشستگی در اطراف سه آبشکن اصلی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که عمق نسبی آبشستگی با افزایش طول آبشکن محافظ کاهش می‌یابد. مقدار کاهش برای آبشستگی در اطراف آبشکن اول قابل توجه است. همچنین نرخ کاهش برای طول نسبی  $(L_p/L_T)$  بیش از  $0.6$  قابل چشمپوشی است. از

۶-۲- اثر زاویه آبشکن محافظ بر عمق آبشستگی

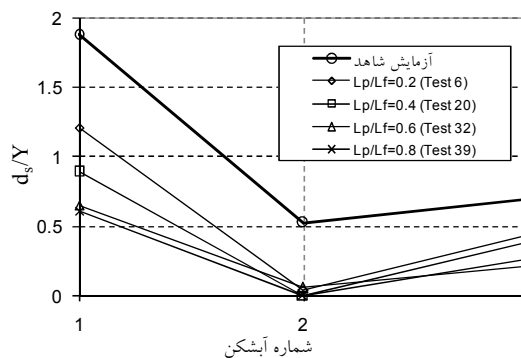
شکل ۸ تأثیر زاویه آبشکن محافظ را بر عمق آبشستگی در اطراف اولین آبشکن اصلی با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای آبشکن محافظ نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود آبشکن محافظ با  $90^\circ$  و  $45^\circ$  کمترین عمق آبشستگی را در مقایسه با زاویه  $135^\circ$  درجه به وجود می‌آورد. البته آزمایش‌های با آبشکن محافظ با  $90^\circ$  عمق آبشستگی را مقداری بیشتر از آبشکن محافظ با  $45^\circ$  کاهش می‌دهد.



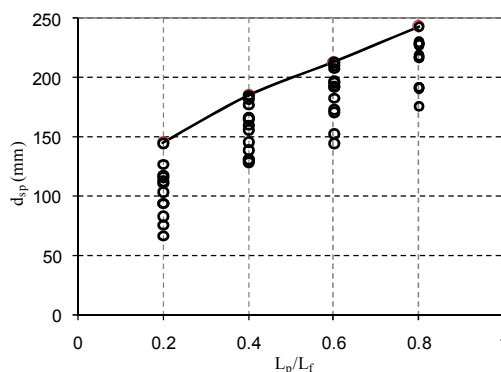
شکل ۸ اثر زاویه آبشکن محافظ بر عمق نسبی آبشستگی در اطراف اولین آبشکن محافظ

به‌علاوه نگاهی دقیق به جدول ۱ نشان می‌دهد که آبشکن محافظ با  $90^\circ$  عمق آبشستگی بیشتری در اطراف خود نسبت به حالت با زاویه  $45^\circ$  درجه دارد، زیرا طول مؤثر ( $L_e$ ) ایستاده در برابر جهت جریان برای زاویه  $45^\circ$  برابر  $L_p \times \sin 45^\circ$  است؛ در حالی که در حالت  $90^\circ$ ، طول مؤثر برابر  $L_p$  است. این نتیجه، کار محققان پیشین را -که گفته‌اند عمق آبشستگی در اطراف آبشکن با افزایش طول آبشکن یا افزایش نسبت تنگ‌شدگی افزایش می‌یابد- تأیید می‌کند (Zhang 2005). بنابراین آبشکن محافظ با زاویه  $45^\circ$  درجه برای اهداف طراحی پیشنهاد می‌شود.

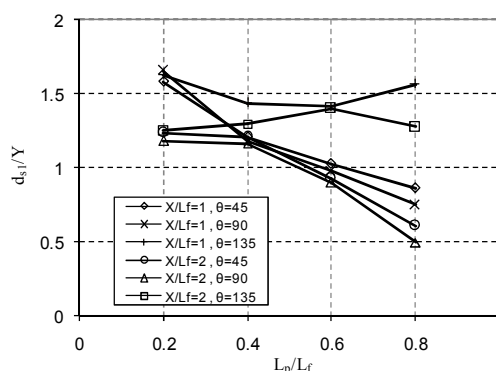
با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای آبشکن محافظ نشان می‌دهد.



شکل ۵ اثر طول‌های بهینه مختلف آبشکن محافظ بر عمق آبشستگی نسبی در اطراف سه آبشکن اصلی



شکل ۶ حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن محافظ نسبت به طول‌های مختلف آبشکن محافظ



شکل ۷ اثر طول نسبی آبشکن محافظ بر عمق نسبی آبشستگی در اطراف اولین آبشکن محافظ

### ۶-۳- اثر فاصله آبشکن محافظ و اولین آبشکن

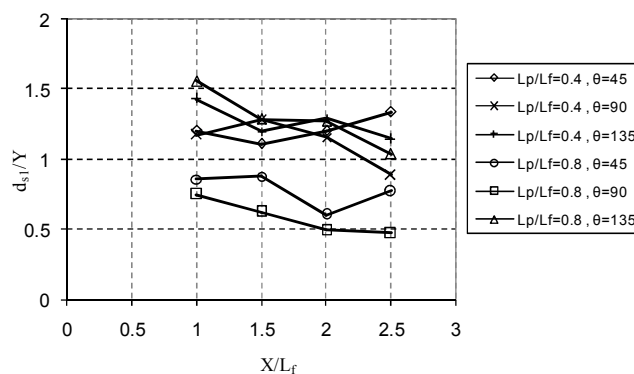
#### اصلی بر عمق آبستگی

شکل ۹ تأثیر فاصله بین آبشکن محافظ و اولین آبشکن اصلی (X) را بر عمق نسبی آبستگی در اطراف اولین آبشکن اصلی با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای آبشکن محافظ نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود دامنه  $X/L_f$  بین ۲ و ۲/۵، به کاهش اندکی بیشتر در عمق آبستگی نسبت به دیگر فواصل منجر می‌شود. این احتمالاً به این دلیل است که آبشکن محافظ برای فواصل نزدیکتر تقریباً داخل و نزدیک به حفره آبستگی اولین آبشکن اصلی قرار دارد و در نتیجه تأثیر کمتری بر عمق آبستگی اولین آبشکن اصلی می‌گذارد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر کاربرد آبشکن محافظ در بالادست مجموعه‌ای از آبشکن‌های متوالی در بازه مستقیم به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. آزمایش‌ها در دو بخش آزمایش شاهد (بدون آبشکن محافظ) و آزمایش‌های اصلی (با آبشکن محافظ) انجام شد. در آزمایش‌های اصلی دو معیار زیر برای ارزیابی تأثیر آبشکن محافظ به کار رفت: ۱) درصد کاهش عمق آبستگی در اطراف

اولین آبشکن اصلی؛ ۲) متوسط درصد کاهش عمق آبستگی در اطراف تمامی آبشکن‌های اصلی. همچنین تأثیر پارامترهای هندسی آبشکن محافظ بررسی شد. نتایج زیر از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به دست آمد: در یک مجموعه از آبشکن‌های متوالی، بیشترین عمق آبستگی به ترتیب در اطراف اولین و آخرین آبشکن رخ می‌دهد. استفاده از آبشکن محافظ با  $\theta=90^\circ$ ،  $X/L_f=2/5$ ،  $L_p/L_f=0/8$  منجر به بیشترین درصد کاهش عمق آبستگی در اطراف اولین آبشکن اصلی می‌شود ( $0/74/7$  کاهش)؛ درحالی‌که آبشکن محافظ با  $\theta=45^\circ$ ،  $X/L_f=2$ ،  $L_p/L_f=0/8$  منجر به بیشترین کاهش با توجه به معیار دوم با متوسط کاهش  $76/6$  درصد می‌شود (جدول ۲). آبشکن‌های محافظ در ۱۰ درصد برتر آزمایش‌ها با توجه به هر دو معیار دارای مشخصات مشترک ذیل بودند: زاویه  $45^\circ$  یا  $90^\circ$  (نسبت به  $135^\circ$ )؛  $0/8$  یا  $0/6$ ؛ معمولاً  $2/5$  یا  $2$ ؛  $X/L_f=2$  (۴) موثرترین طول نسبی آبشکن محافظ  $(L_p/L_f)$  برابر  $0/6$  پیشنهاد می‌شود. همچنین نتایج تحلیل جریان آبستگی و مؤلفه‌های سرعت در اطراف آبشکن‌های اصلی نشان داد که آبشکن محافظ به خوبی انرژی جنبشی آشفته‌گی را در اطراف آبشکن اول کاهش می‌دهد.



شکل ۹ اثر فاصله بین آبشکن محافظ و اولین آبشکن اصلی بر عمق نسبی آبستگی در اطراف اولین آبشکن

		<b>۷- فهرست علائم</b>	
$\rho$	چگالی جرمی آب	$B$	عرض فلوم
$\theta$	زاویه آبشکن محافظ نسبت به جهت جریان	$D_{50}$	اندازه متوسط ذرات رسوب
$\emptyset$	زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر	$D_{84}$	قطر ذرات کمتر از ۸۴٪
$\tau_b$	تنش برشی بستر	$D_{16}$	قطر ذرات کمتر از ۱۶٪
$\tau_{cr}$	تنش برشی بستر	$d_{st}$	حداکثر عمق آبستنگی در اطراف آبشکن اول
$\sigma_g$	انحراف معیار ذرات	$d_{Si}$	حداکثر عمق آبستنگی در اطراف
		$d_{Si}$	نامین آبشکن اصلی با محافظ
		$d_{SP}$	حداکثر عمق آبستنگی
		$Fr$	در اطراف آبشکن محافظ
		$Fr$	عدد فرود جریان
		$K$	انرژی جنبشی آشفتگی
		$L_p$	طول آبشکن محافظ
		$L_f$	طول آبشکن اصلی
		$L_e$	طول مؤثر آبشکن محافظ
		$Q$	دبی جریان
		$R_{SDi}$	درصد کاهش عمق آبستنگی
		$R_{AV}$	در اطراف نامین آبشکن اصلی
		$R_{AV}$	متوسط درصد کاهش عمق آبستنگی
		$Re$	در اطراف تمامی آبشکن‌های اصلی
		$Re$	عدد رینولدز جریان
		$t$	زمان آبستنگی
		$U$	متوسط سرعت جریان
		$U_{cr}$	سرعت آستانه حرکت ذرات بستر
		$u^*$	سرعت برشی جریان بالادست
		$u^*_{cr}$	تنش برشی بحرانی
		$u', v', w'$	تغییرات لحظه‌ای مؤلفه‌های سرعت
		$u', v', w'$	در راستاهای x, y و z
		$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	میانگین زمانی سرعت لحظه‌ای
		$X$	در راستای x, y و z
		$x, y, z$	فاصله آبشکن محافظ و اولین آبشکن
		$Y$	جهت‌های دکارتی
			عمق جریان

### ۸- منابع

بدلی مشاهیر، محمد، زراتی امیررضا، مکلف سربند ابراهیم، تاثیر طوق بر توسعه آبستنگی موضعی اطراف پایه مستطیل شکل پلها، مجله هیدرولیک، ص ۱-۱۱، ۱۳۸۷.

Copeland RR. (1983). Bank protection techniques using SDs. Hydraulics Laboratory, U. S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.

Dey S. and Barbhuiya AK (2005a). Time variation of scour at abutments. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 131(1), pp. 11-23.

Dey, S and Barbhuiya, A.K. (2005b). Flow field at a vertical-wall abutment. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 131(12), pp. 1126-1135.

Froehlich DC. (1989). Local scour at bridge abutments. proceedings of the 1989 national conference on hydraulic engineering, Edited by Michael A. Ports, New Orleans, Louisiana

Ge, L., Lee, S. O., Sotiropoulos, F. and Sturm, T. (2005). 3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows. II: Model validation and flow physics. J. Hydraulic Engng. 131(9), pp. 809-820.

Gill MA. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. Journal of the Hydraulics Division 98(HY9): pp. 1587-1602.

Ghodsian M. and Vaghefi M. (2009). Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend, International Journal of Sediment Research, Elsevier 24(2): pp. 145-158.

Richardson E.V, Harrison LJ and Davis SR. (1990). Evaluating scour at bridges. report No. FHWA-IP-90-017 HEC 18, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.

Zaghloul NA. (1983). Local scour around spur-dikes. *Journal of Hydrology* 60 (1983), pp. 123-140.

Wahl, T.L. (2000). Analyzing ADV data using WinADV. Proc. Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, ASCE. Reston, Va.

Zhang H. (2005). Study on flow and bed deformation in channels with spur dyke. Doctoral Dissertation, Kyoto University, Japan.

Karami, H., Ardeshir, A., Saneie, M., Behzadian, K. and Jalilsani, F. (2008). Reduction of local scouring with protective spur dike. Proceedings of the World Environmental and Water Resources congress ASCE, Hawaii USA.

Li H, Barkdoll BD, Kuhnle R. and Alonso C. (2006). Parallel walls as an abutment scour countermeasure, *Journal of Hydraulic Engineering* 132(5), pp. 510-520.

Melville, B.W. (1997). "Pier and abutment scour: integrated approach.", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* ,123(2), pp. 125-136.

Neill, CR. (1973). Guide to bridge hydraulics. Roads and Transportation Assoc. of Canada, Univ. of Toronto Press, Toronto, Canada.