# بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن با دیوارهی شیبدار

فرزین اسدزاده'، اکبر صفرزاده'، سید علی اکبر صالحی نیشابوری "\*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس ۲- دانشیار مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی ۳- استاد سازه های هیدرولیکی پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

#### salehi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۳۰] تاریخ پذیرش: [۱۳۹٤/۱/۱۸]

**چکید**ه- در این مقاله به مطالعهی آزمایشگاهی ساختار جریان پیرامون آبشکن با دیوارهی شیبدار پرداخته شده است. بدین منظور، هیدرودینامیک سه بعدی اطراف تک آبشکن مستقیم با دیوارهی شیبدار ۷۵ درجه، به صورت آزمایشگاهی و در یک کانال مستقیم با بستر صلب مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات جریان با برداشت پارامترهای آشفتگی اطراف آبشکن به وسیله سرعتسنج نقطهای سه بعدی ADV، بررسی شد. در پشت آبشکن با کاهش سرعت جریان که منجر به تشکیل ناحیهی سکون میشود، سرعت جریان در نواحی میانی افزایش می یابد. به همین علت جریان به دو قسمت تقسیم شده و قسمتی از جریان به سمت بالا و قسمتی از جریان به سمت پایین که فشار کمتر است، حرکت میکند. جریان پایین رونده عامل تشکیل گردابهی نعل اسبی است. دو ناحیهی تشدید سرعت، که اولی مربوط به تشدید سرعت در هستهی اصلی جریان ناشی از کاهش عرض عبوری جریان بوده و ناحیهی پرسرعت دیگر که مربوط به تشدید موضعی سرعت در پاییندست آبشکن در ناحیه-ی بیرونی لایهی برشی است، تشکیل شد. بیشینه مقدار مؤلفهی تنش آب<sup>10</sup> مربوط به تشدید موضعی سرعت در پاییندست آبشکن در ناحیه-های رینولدز (*آساز م*) و (*آساز م*)، تعمید مقدار مؤلفهی تنش آب<sup>10</sup> مربوط به تشدید موضعی مربوط به توجه به مقادیر منفی تنش-می و ییرونی لایه می برشی است، تشکیل شد. بیشینه مقدار مؤلفهی تنش آب<sup>10</sup> مربوخ به تشدید موضعی مربوع به توجه به مقادیر منفی تنش-می ییرونی لایه برخی می و (*آساز م*)، تجمع رسوبات در ناحیه ی چرخشی پشت آبشکن اتفاق می افتد.

**واژ گان کلیدی**: آبشکن مستقیم، دیوارهی شیبدار، میدان جریان، پارامترهای آشفتگی، تتش های رینولدز.

#### ۱- مقدمه

احداث سازههایی مانند آبشکن، با وجود کنترل فرسایش به وسیلهی شکلگیری ساختارهای موضعی جریان مانند تنگ-شدگی مقطع عبور جریان، شکلگیری جریان رو به پایین و برخورد آن به بستر کانال در بالادست آبشکن، شکلگیری لایه برشی و آشفتگیهای ناشی از آن و بالاخره شکلگیری گردابه نعل اسبی می تواند باعث ایجاد فرسایش موضعی حول سازه و تهدید ایمنی خود سازه شود.

قدیمی ترین پژوهش آزمایشگاهی در مورد آبشکن به وسیلهی Ahmed انجام شده است. وی با اندازهگیری تغییرات سطح آب حول تک آبشکن واقع در یک کانال مستقیم به غیر یکنواختی جریان در چنین میدانی اشاره کرده است [۱]. Chen

Ikeda & پژوهش های جامعی را در رابطه با الگوی جریان حول تک آبشکن در مسیر مستقیم انجام دادند و دریافتند که چرخابه های گذرایی از نوک آبشکن جدا شده و به صورت متناوب به سمت پایین دست منتقل می شوند. آن ها با آنالیز نتایج به دست آمده متوجه شدند که سرعت متوسط مهاجرت چرخابه ها تقریباً ثابت بوده و مقدار آن ها کمی بیشتر از ۱/۵ چرخابه ها تقریباً ثابت بوده و مقدار آن ها کمی بیشتر از ۱/۵ مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و توزیع تنش برشی بستر به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و توزیع تنش برشی بستر سرعت، این پژوهشگران به نتیجه رسیدند که در لایه های میانی، تشدید سرعت دارای کمینه مقدار بوده و در لایه های بالایی تشدید سرعت افزایش می یابد. [۳]. Uijtewaal به بررسی

یافته انجام دادند. پژوهشگران یاد شده به وقوع دو جریان گردابه نعلاسبی اشاره کردند که نوع اول آن بواسطه جریان رو به پایین در وجه بالادست آبشکن و ترکیب آن با لایه مرزی جریان نزدیک شونده تشکیل می شود، ولی دلیل خاصی برای وقوع چرخابه دوم که بسیار ضعیفتر از گردابه اصلی است، عنوان نکردند. [۷]. Koken & Constantinescu در ادامه مطالعه خود روی ساختار جریان حول تک آبشکن، به بررسی تأثیر بستر توسعه یافته بر روند شکل گیری جریان های گردابه ای و نیز توزیع تنش برشی بستر پرداختند. پژوهشگران مزبور به این نتیجه رسیدند که ساختار گردابه نعل اسبی در حالت بستر تخت، پایدارتر از حالت بستر توسعه یافته بوده و علاوه بر آن ساختار لحظهای آن در حالت دوم، بسیار پیچیدهتر از بستر تخت است. در بستر توسعه یافته گردابه نعل اسبی نوع دوم تشکیل نمیشود [۸]. Kuhnle و همکاران. به بررسی آزمایشگاهی و شبیهسازی عددی (با استفاده از CCHE3D) الگوی جریان اطراف آبشکن ذوزنقهای مستغرق در مسیر مستقیم در دو حالت بستر تخت و تعادل یافته پرداختند، ایشان

به طور خلاصه به نتایج زیر اشاره نمودهاند [۹،۱۰،۱۱]: ۱- طول ناحیه گردابی از قسمت جدایی جریان تا جایی که مجدداً متصل میشود برابر ۱/٦L است.

۲- شبیهسازی عددی انجام شده به جز در ناحیه بازگشتی جریان در پاییندست آبشکن، نتایج قابل قبولی داشته است.
 ۳- بیشینه تنش برشی به دست آمده در پاییندست آبشکن و در نقطه با X/L=5.85 رخ داده است و ۲/۷ برابر تنش برشی در بالادست آبشکن است.

٤- پس از ٥٣ دقیقه از شروع آزمایش، آبشستگی رخ داده است که ناحیه پاییندست در محل حداکثر تنش برشی اتفاق افتاده است، اما آبشستگی در نوک بالادست با تنش برشی محاسبه شده قابل پیش بینی نبوده است. این تناقض یک چالش در پیشبینی آبشستگی به وسیله تنش برشی محاسبه شده از الگوی جریان را نشان میدهد.

Duan به مطالعه ساختار جریانهای متوسط و آشفته حول آبشکن مستقیم واقع در یک کانال آزمایشگاهی با بستر صلب و تخت پرداخت. وی برای اندازهگیری میدان جریان از دستگاه

آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آبشکن ذوزنقهای مستغرق با چهار شیب کناره در مسیر مستقیم و تأثیر طرحبندی آبشکن ها بر الگوی گردابهها و جریان آشفته به دست آمده پرداخت. اندازه گیری میدان جریان با استفاده از روش PTV انجام شد و به این نتیجه رسید که در آبشکنهای نفوذپذیر، برخلاف آبشکنهای نفوذناپذیر، مومنتوم جریان عبوری از بدنه آبشکن، ساختار جریان چرخشی پشت آبشکن را به هم زده و در واقع مانع شکل گیری الگوی چرخشی می شود. همچنین ایشان با بررسی پروفیل های عمودی و پارامترهای آشفتگی به این نتیجه رسيد كه الكوى جريان اطراف أبشكن مستغرق كاملاً پيچيده است، به گونهای که مدلسازی عددی آن نیز مشکل است [٤]. Nagata و همکاران. به شبیه سازی عددی الگوی جریان سه بعدی حول تک آبشکن با بستر متحرک پرداخت [٥]. بر اساس نتايج پژوهشگران ياد شده، در لحظه شروع محاسبات، خطوط جریان در محل دماغه متمرکز شده، ولی در حالت بستر متعادل، بواسطه تشکیل حفره أبشستگی، ابعاد ناحیه چرخشی گسترش یافته و خطوط جریان به سمت مرکز کانال منتقل می شوند. در حالت بستر تخت، جریانهای چرخشی به اندازه کافی توسعه 🕽 نیافته ولی با وقوع حفره آبشستگی، جریانهای چرخشی تشديد شده و ضمن افزايش شدت جريان رو به پايين در وجه بالادست أبشكن، جريان برگشتی نزديک كف نيز تشديد می-شود [٥]. Kadota و همکاران. به بررسی ساختار جریان حول تک آبشکن در دو حالت مستغرق و نیمه مستغرق در جریان کم عمق پرداختند. کادوتا و همکاران برای اندازهگیری میدان از تکنیک ردیابی ذرات سطحی (PTV) استفاده کردند. بر اساس نتایج ارائه شده به وسیلهی پژوهشگران مزبور برای آبشکن غیرمستغرق، گردابههای پر انرژی در امتداد لایه برشی شکل گرفته و به سمت پاییندست توسعه پیدا میکند. در آبشکن غیر مستغرق، مسیر گردابههای پر انرژی به سمت دیواره جانبی کانال متمایل شده و برخلاف آبشکن مستغرق در فاصله نسبتاً زیادی از بدنه آبشکن شکل می گیرند [٦]. Koken & Constantinescu مطالعات جامعی در مورد ساختار جریان-های سه بعدی (متوسط و لحظهای) حول تک آبشکن واقع در کانال مستقیم در دو حالت بستر صلب تخت و بستر توسعه

سرعت سنج ADV استفاده نمود. بر اساس یافته های Duan، جریان متوسط در هر دو جهت جانبی و قائم جدا شده و در داخل ناحیه چرخشی پشت آبشکن، ترکیبی از گردابههای افقی و قائم مشاهده میشود. هر سه مؤلفه تنشهای قائم رینولدز با عبور از مقطع آبشکن تشدید شده و بیشینه تنش در عمق میانی کانال و در امتداد لایه تنش برشی اتفاق میافتد. بیشینه مقدار تنشرهای قائم مؤلفههای طولی و عرضی سرعت نزدیک به هم بوده، ولى بيشينه تنش قائم مؤلفه قائم سرعت در محدوده ١٥-۱۰ درصد کمتر از دو مؤلفه دیگر است. تنش برشی حداکثر به اندازه ۳ برابر تنش برشی بالادست تشدید شده، ولی این ناحیه بسیار محدود بوده و در نزدیکی دماغه بالادست سازه آبشکن اتفاق میافتد [۱۳و۱۲]. صفرزاده به بررسی هیدرودینامیک سه بعدی حول تک آبشکن با شکل های مختلف دماغه، به صورت آزمایشگاهی و در یک کانال با بستر صلب و تخت پرداخت. آزمایش ها در دو بخش شامل، استفاده از سرعت سنج نقطهای سه بعدی ADV برای برداشت میدان جریان و ترکیب ابزارهای دو لولهای و سه لولهای برای برداشت تنش برشی بستر حول آبشکنهای مستقیم، Tشکل و L شکل انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان میدهد که ساختار جریان متوسط و آشفته حول آبشکن های مستقیم و غیر مستقیم کاملاً متفاوت است. در ناحیه بالادست آبشکن مستقیم، شکل گیری و توسعه گردابههای نعل اسبی به سمت دماغه و پاییندست آبشکن، جریان حول سازه و همچنین توزیع تنش برشی بستر را كاملاً تحت تأثير قرار مىدهد. توزيع تنش برشى بستر حول آبشکن مستقیم، نشانگر تشدید تنش حول دماغه آبشکن و توسعه ناحیه پر تنش به سمت پاییندست، منطبق بر مسیر گردابه وقوع گردابه نعل اسبی و مماس بر بخش بیرونی لایه برشی است [18].

یکی از روش های عملی و اقتصادی، ساختن آبشکن با استفاده از سنگچین است و به این دلیل آبشکن ها اغلب ذوزنقهای شکل ساخته میشوند. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن با دیوارهی شیبدار پرداخته شد.

۲- روش انجام آزمایشها

کانال آزمایشگاهی مورد نظر که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس قرار داشت، به طول ٦ متر، عرض ٥٤/٠ متر و ارتفاع ٤٥/٠ متر است. جدارهها و کف کانال از جنس شیشه شفاف به ضخامت ۱۰ میلیمتر است. در شکل (۱) مشخصات کانال مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۱) شکل شماتیکی از کانال مورد آزمایش

قطر متوسط مصالح مورد استفاده ۱/٤۸ میلیمتر است و org=1.19 که نشان دهنده یی یکنواخت بودن مصالح مورد آزمایش است. آزمایش ها در حالت بستر تخت انجام شد. برای این منظور سطح بستر با یک لایه ی نازک از دوغاب سیمان تثبیت شده به گونه ای که در تمام طول آزمایش آبشستگی مشاهده نمی شود. آزمایش تحت دبی ۱۵ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۱۱ سانتی متر انجام شد. در این آزمایش برای تنظیم دبی از دبی سنج مغناطیسی استفاده شد و برای اندازه گیری ارتفاع سطح آب، از عمق سنج نقطه ای استفاده شد. تنظیم ارتفاع آب به وسیله ی دریچه ی پروانه ای که در انتهای کانال قرار داشت، انجام می شد.

آبشکن مورد استفاده در این پژوهش، نفوذناپذیر و از جنس پلکسی گلاس بود. آبشکن با دیوارههای کنارهی شیبدار با عرض تاج ۵ سانتیمتر، ارتفاع ۲۲ سانتیمتر و طول ۱۰ سانتیمتر و شیب کناره ۷۵ درجه مورد استفاده قرار گرفت. آبشکن ۲۵ سانتیمتر درون رسوبات قرار گرفت که در فاصله ۲/۵ متری از بالادست کانال قرار گرفت. در شکل (۲) نمایی از آبشکن مورد استفاده آورده شده است. به منظور بررسی دقیق ساختار هیدرودینامیک اطراف آبشکن با استفاده از سرعتسنج سه بعدی ADV مؤلفههای سهبعدی سرعت در محدودهی وسیعی حول آبشکن اندازه گیری شد.

بررسی الگوی جریان اطراف أبشکن با دیواره¬ی شیب¬دار





شکل (۲) مشخصات آبشکن مورد استفاده

## ۳- مشاهدات کیفی ساختار جریان حول تک آبشکن

برای مشاهده یکیفی ساختار جریان و شناخت اولیه ی آن از طریق ترزیق ماده رنگی و استفاده از نوارهای روبان رنگی در نواحی بالادست و نیز نواحی چرخشی میدان، جریان استفاده شد. مشاهده شد که در پشت آبشکن با کاهش سرعت جریان و تشکیل ناحیه ی سکون، سرعت جریان در نواحی میانی افزایش مییابد که باعث ایجاد یک صفحه ی جدایی می شود. به همین علت قسمتی از جریان به سمت بالا و قسمتی از جریان به سمت پایین، حرکت میکند. جریانهای پایین رونده و بالارونده تبدیل به دو گردابه ی پادساعتگرد با جهتی عمود بر جهت جریان اصلی می شوند و همزمان با این گردابه های پشت آبشکن با ناحیه جدایی جریان در لبه ی آبشکن ایجاد می شود.

# ٤- الگوی جریان حول آبشکن با دیواره شیب دار

ابعاد طولی و عرضی میدان جریان نسبت به طول آبشکن و بعد قائم نیز نسبت به ارتفاع جریان بی بعد شده است. مش بندی انجام شده برای برداشت دادهها، بدین صورت بود که در جهت طولی کانال نقطه 0=1/x تاج بالا دست آبشکن و 0.5+=1/x تاج پایین دست آبشکن است. (x: مختصات طولی کانال، L طول آبشکن). در شکل (۳) شبکهبندی دو بعدی مورد استفاده در این پژوهش برای اندازه گیری میدان جریان در لایه ای مختلف جریان در مقاطع ارتفاع مشاهده می شود.



شکل (۳) پلان شبکه بندی مقاطع ارتفاعی

### 1-٤- الگوی جریان متوسط

با استفاده از مقادیر متوسط سریهای زمانی سرعت اندازهگیری شده در هر نقطه، خطوط جریان صفحات مختلف افقی، حاصل از دو مؤلفهی طولی و عرضی سرعت در کل محدوده میدان جریان اندازهگیری شده و در شکل (٤) نشان داده شده است. با توجه به شکل، در بالادست میدان و دور از سازه آبشکن، خطوط جریان نسبتاً موازی بوده و در امتداد دیوارههای کانال است. با حرکت به سمت آبشکن، جریان تحت تأثیر آبشکن قرار گرفته و خطوط جریان به شکل تدریجی از دیوارهی سمت آبشکن به سمت قسمت مرکزی کانال منحرف می شوند. در لایههای نزدیک بستر، جدایی جریان از دیوارهی سمت آبشکن، سریعتر از لایههای بالایی است، که علت این امر تشکیل جریان برگشتی در ناحیه نزدیک بستر و اندرکنش آن با

خطوط جریان نزدیک بستر، نشان دهنده ی وقوع یک جریان برگشتی به سمت بالادست، در محل تقاطع آبشکن و دیواره ی سمت آبشکن است. همچنین در لایه های نزدیک کف، جریان عرضی قوی در نزدیکی دماغه به سمت قسمت میانی کانال ایجاد می شود. در لایه های نزدیک به سطح آب تأثیر آبشکن بر جریان های عبوری از جلوی آبشکن کمتر بوده و از میزان انحراف جریان به سمت دیواره ی مقابل کاسته می شود.

در پاییندست آبشکن و نزدیک دیواره یسمت آبشکن یک ناحیه ی چرخشی شکل گرفته است. طول و عرض ناحیه ی چرخشی در لایه ی نزدیک سطح بستر بیشتر از لایه های فوقانی است. مرکز ناحیه چرخشی با عمق تغییر میکند. در نواحی نزدیک بستر، مرکز ناحیه چرخشی نزدیک بدنه ی آبشکن، و با حرکت به سمت سطح آب، مرکز ناحیه ی چرخشی به سمت پاییندست منتقل می شود. همچنین با نزدیک شدن به سطح دور شده و به سمت پاییندست منتقل می شود. توزیع بر آیند سرعت حاصل از سه مؤلفه ی متوسط سرعت در صفحات مختلف در شکل (٦) ارائه شده است. با توجه به شکل در تمامی لایه ها در ارتفاع، دو ناحیه ی تشدید سرعت مشاهده می شود. یک ناحیه مربوط به تشدید سرعت در هسته-ی اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان و در نتیجه افزایش عمومی سرعت است. ناحیه ی پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین دست آبشکن و در ناحیه ی بیرونی لایه ی برشی می باشد که میزان تشدید سرعت در این ناحیه از تشدید سرعت عمومی بیشتر است. تشدید میدان بوده و همچنین، گستردگی ناحیه ی پر سرعت نیز در لایه های فوقانی بیشتر از نواحی نزدیک بستر است. بیشینه سرعت متوسط جریان در پایین دست آبشکن 1/00 بر ابر



شکل (٦) توزیع برآیند سرعت در ترازهای مختلف قائم جریان

آب، فاصله مرکز ناحیه چرخشی از دیوارهی سمت آبشکن بیشتر شده و به وسط کانال منتقل می شود. در صفحات نزدیک به بستر، خطوط جریان مورب در انتهای ناحیهی چرخشی و در کنار دیوارهی سمت آبشکن کانال تشکیل شده که در لایههای نزدیک سطح آب دیده نمی شود. این خطوط جریان ناشی از شکل گیری یک جریان چرخشی با محور چرخشی در امتداد محور طولی کانال است. (Z ارتفاع از سطح بستر بر حسب سانتی متر.)



**شکل (٤)** خطوط جریان حول آبشکن با شیب دیوارهی ۷۵ درجه در ترازهای مختلف.

شکل (٥) توزیع مؤلفهی عرضی سرعت را در صفحات مختلف نشان می دهد. با توجه به شکل حداکثر مقدار مؤلفهی عرضی سرعت در محل دماغهی آبشکن رخ داده و شدت آن در لایه-های نزدیک به بستر بیشتر از نواحی سطح آب است. حداکثر مقدار مؤلفهی عرضی سرعت در نزدیکی بستر ١/٥ برابر مقدار سرعت در لایهی نزدیک سطح آب است. در نزدیکی بستر، انحراف عرضی جریان در مقطع آبشکن تا دیوارهی مقابل کانال ادامه داشته و با حرکت به سمت پاییندست، از میزان انحراف عرضی کاسته می شود. نقطه شروع توزیع میزان انحراف جانبی سرعت متوسط به طرف دیوارهی سمت آبشکن (مقدار منفی مؤلفهی عرضی سرعت)، هر چه از لایهی نزدیک بستر به سمت لایههای فوقانی پیشروی شود، از جلوی دماغهی آبشکن

به منظور بررسي دقيق تغييرات متوسط جريان اطراف أبشكن، توزیع منحنی های هم تراز مؤلفه ی طولی سرعت، در شکل (۷) در مقاطع مختلف عرضی در طول کانال آورده شده است. با توجه به شکل در مقطع بالادست آبشکن، به واسطهی تـأثیر آبشکن بر ناحیهی بالادست و کاهش سرعت جریان نزدیک شونده در امتداد دیوارهی سمت آبشکن و نیز انحراف جریان به سمت دیوارهی مقابل، سرعت در امتداد مجرای اصلی کانال (به سمت دیوارهی مقابل) افزایش یافته و سرعت در لایههای نزدیک به سطح آب بیشترین مقدار خود را دارد و با نزدیک شدن به آبشکن، سرعت افزایش می یابد. با گذر از آبشکن، وقوع ناحیهی چرخشی در پشت آبشکن و در امتداد دیـوارهی سمت آبشکن به صورت جریان برگشتی (مقدار منفی مؤلفهی طولی سرعت) مشخص شده، گسترش عرضی ناحیه ی چرخشی در لایههای فوقانی بیشتر از لایههای تحتانی بود. وجود ناحیهی کم سرعت در نزدیکی بستر و در امتداد دیوارهی سمت کانال ناشی از تشکیل جریان چرخشی ذکر شده است. با گذر طولی از آبشکن به سمت پاییندست، ناحیه پر سرعت از جلوی آبشکن دور شده و به سمت وسط کانال متمایل می-شود. همچنین وسعت این ناحیه در مقاطع طولی با حرکت به سمت پاييندست بزرگتر مي شود و ايـن ناحيـه تـا x/L=+3.6 ادامه دار د.

با مقایسه توزیع برآیند سرعت (شکل۸) و مؤلفهی طولی سرعت مشاهده می شود که تفاوت چندانی در الگوی توزیع سرعت و بیشینه سرعت مشاهده نمی شود. تنها در مقطع قرارگیری آبشکن و در جلوی آبشکن، بخاطر آثار مؤلفههای جانبی و قائم سرعت بر روند توزیع، برآیند سرعت با توزیع طولی سرعت تفاوت دارد، که توزیع طولی سرعت در مقطع آبشکن یکنواخت بوده، اما در توزیع برآیند سرعت در مقطع

توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط (شکل۹) مشابه توزیع برآیند سرعت میباشد، با این تفاوت که در مقاطع بالادست آبشکن و در امتداد جدارهی سمت راست کانال آثار آبشکن در شکلگیری جریان برگشتی و کاهش سرعت جریان نزدیک بستر، به وسیلهی منحنی های هم تراز انرژی جنبشی قابل

مشاهده است که این موضوع در توزیع پارامترهای دیگر مشهود نبود. بیشینه مقدار انرژی جنبشی جریان متوسط به اندازه ۲/۵ برابر انرژی جنبشی جریان نزدیک شونده تشدید می شود. کمترین انرژی جنبشی جریان متوسط در ناحیه چرخشی رخ داده و ناحیه مزبور تا انتهای میدان جریان ادامه دارد. پارامتر انرژی جنبشی جریان متوسط، شاخص بهتری نسبت به مؤلفههای سرعت و همچنین برآیند سرعت در نشان دادن آثار آبشکن بر محدوده بالادست خود، به ویژه نواحی نزدیک بستر و وقوع جریان متوسط (cm/s) ۲ است).



شکل (۸) توزیع برآیند سرعت در مقاطع عرضی



شکل (۹) توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط

٤-٢- الگوی جریان آشفته

در شکلهای (۱۰) و (۱۱) توزیع مجذور مربع نوسانات مؤلفه طولی سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در صفحات عرضی در طول کانال مشاهده می شود. با توجه به شکل ۹ در مقاطع بالادست آبشکن، نوسانات مؤلف، ی طولی سرعت در نواحی نزدیک بستر شدیدتر از نواحی فوقانی بوده و مقادیر حداکثر در بالادست آبشکن در امتداد دیواره سمت آبشکن رخ می دهد. مقدار حداکثر نوسانات طولی سرعت در مقابل دماغهی آبشکن اتفاق افتاده کـه ناشـی از شـکلگیـری گردابـهی نعـلاسـبی و گسترش آن به سمت پاییندست است. با گذر از مقطع آبشکن و در مقاطع عرضی پاییندست، حداکثر نوسانات طولی سرعت در امتداد لایهی برشی رخ میدهد. برخلاف مقدار متوسط مؤلفهی طولی سرعت، نوسانات مؤلفه طولی سرعت در ناحیه-ی چرخشی شدیدتر از سایر نواحی بوده و با حرکت به سمت پاییندست، ناحیه تشدید نوسانات سرعت به سمت دیـوارهی آبشكن منتقل مىشود. ناحيهى حداقل نوسانات مؤلفهي طولى سرعت در دیوارهی مقابل آبشکن شکل می گیرد که با حرکت از جلوى آبشكن به سمت پاييندست اين ناحيه ضعيفتر مي-شود.

توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در شکل (۱۱) ارائه شده است. با توجه به شکل، حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایهی برشی بوده و از مقطع L=3.5 تا L=3.5 ناحیه پر انرژی در کل عمق میدان گسترش یافته است، در حالی که با حرکت به سمت پایین دست، از شدت و وسعت این ناحیه کاسته می شود. با مقایسه چگونگی توزیع انرژی جنبشی کاسته می شود. با مقایسه چگونگی توزیع انرژی جنبشی آشفتگی با انرژی جنبشی جریان متوسط مشاهده می شود که در قسمتهایی از میدان که انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه مقدار را توجه به شکل توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط، بیشترین انرژی جنبشی در بخش مرکزی کانال و دور از لایه ی برشی شکل می گیرد، در حالیکه بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایهی برشی رخ می دهد. افزایش انرژی جنبشی آشفتگی در در امتداد لایه یبرشی نقش مهمی در انتقال رسوبات بستر به

سمت پاییندست دارد، انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تشکیل گردابه های آشفتگی است که در کل عمق جریان گسترش یافته اند. گردابه های آشفتگی به واسطه قدرت چرخشی لحظه ای زیاد، تنش های شدیدی بر ذرات رسوب بستر وارد کرده و باعث جابه جایی آن ها می شوند. در بالادست آبشکن توزیع انرژی جنبشی آشفتگی تقریباً یکنواخت است. (واحد توزیع انرژی جنبشی آشفتگی ۲(cm/s) است).



شکل (۱۰) توزیع مجذور مربع نوسانات مؤلفه طولی سرعت



Teruzzi و همکاران. با انجام پژوهش هایی به این نتیجه رسیدند که نوسانات سه مؤلفهی سرعت در میدان جریان سه بعدی مستقل از هم نبوده و همبستگی نوسانات مزبور منجر به ایجاد تنش های برشی موسوم به تنش های رینولدز می شود. همبستگی نوسانات سرعت و تشکیل تنش های رینولدز، در بحث انتقال رسوب و فرسایش مهم است [۱۵].

شکلهای ۱۲ تا ۱۶ توزیع مؤلفههای مماسی تنشهای رینولدز را نشان میدهد. با توجه به شکل ۱۱ میزان مثبت تـنش *موسور-*در امتداد لایهی برشی تشکیل می شود. حداکثر مقـدار مؤلفهی مورد نظر تنش رینولدز در امتداد لایهی برشی و در محلی کـه

مقدار جریان متوسط کوچک است، رخ میدهد. در بالادست آبشکن و تا x/L=0 تغییرات مؤلفههای طولی و عرضی سرعت در مقاطع عرضی در طول کانال تقریباً یکنواخت است. از جلوی آبشکن تا مقطع 1+=x/L این نوسانات افزایش مییابد و به سمت پاییندست کاهش، بعد افزایش دارد، که دوباره تا انتهای کانال کاهش مییابد. محدودهی مثبت تغییرات مؤلفهی طولی و عرضی با حرکت به سمت پاییندست به سمت دیوارهی سمت آبشکن کشیده میشود. با توجه به شکلها برخلاف  $\overline{v}$ - $\overline{v}$ - توزیع دو مؤلفه دیگر تنش مماسی رینولدز ناحیهی چرخشی دارد.

Nelson و همکاران به تجمع رسوبات در نواحیی از میدان جریان کـه در آن دو مؤلفـهی تـنش  $-\rho \overline{u'w'} = -\rho \overline{v'w'}$  دارای مقدار منفی باشند، اشاره کردهانـد [۱٦]. پس می توان نتیجـه گرفت که تجمع رسوبات در ناحیهی چرخشی شکل میگیرد. مقدار مثبت تنش رينولدز  $ho\overline{u'v'}$  در پاييندست آبشكن در ناحیهی میانی کانـال و در نـواحی نزدیـک بسـتر مثبـت بـوده، بنابراین در این نواحی بواسطه نوسانات مؤلفههای طولی و قائم سرعت، ذرات رسوب حرکت کرده و منتقل خواهند شد. با توجه به تغییرات توپوگرافی بستر برای آبشکن با شیب کناره ۷۵ درجه برای حالت Fr=0.29 (شکل ۱۵)، شامل الگوی جریان برای این حالت برداشت شده است، ناحیه مقدار منفی دو مؤلفهی تنش  $p\overline{v'w'} - p\overline{u'w'}$  با ناحیه تجمع رسوبات در پاییندست آبشکن هماهنگ است. بیشینه مقدار -*pu'v* در جلوی آبشکن و نزدیک بستر رخ میدهد و کمینه مقدار آن در مقطع x/L=+2 و نزدیک بستر رخ داده و به سمت پاییندست ناحیهی کمینه نوسانات به سمت سطح بستر و دیـوارهی کانـال حرکت میکند. توزیع نوسانات مؤلفهی طولی و قائم سرعت در بالادست أبشكن يكنواخت است. ناحيهي حداكثر مقدار یابد. مقدار مثبت x/L=+3 ادامه می یابد. مقدار مثبت  $-\rho \overline{v' w'}$ تنش رینولدز -pu'v بزرگتر از دو مؤلفهی دیگر تـنش اسـت، به گونهای که حداکثر مقدار آن نسبت به حداکثر مقدار مثبت  $-\rho \overline{v'w'}$  تقریباً ۱/۷ برابر و نسبت به تـنش  $-\rho \overline{v'w'}$ تقريباً هشت برابر بزرگتر است. مقدار قدرمطلق حداقل تنش

-ρ<del>u'w'</del> بزرگتر از دو تنش دیگر میباشد و قـدر مطلـق منفـی تنش -ρ<del>u'w</del> بزرگتر از تنش -ρ<del>u'v</del> است.



شکل (۱۲) توزیع تنش رینولدز ناشی از نوسانات مؤلفه طولی و عرضی



**شکل (۱۳)** توزیع تنش رینولدز ناشی از نوسانات مؤلفه طولی و قائم





**شکل (۱**۵) تغییرات توپوگرافی بستر برای آبشکن با شیب کنارهی ۷۵ درجه

0- نتیجه گیری
- در پاییندست آبشکن و پشت آبشکن یک ناحیه چرخشی
شکل می گیرد که با افزایش ارتفاع تراز سطح آب، مرکز این
گردابه از بدنه آبشکن و دیوارهی کانال دور می شود. همچنین با

پیشروی از سطح بستر به سطح آب، ابعاد گردابه بزرگتر می-شود.

- حداکثر مقدار مؤلفهی عرضی سرعت در دماغهی بالادست آبشکن شکل می گیرد و شدت آن در لایههای نزدیک بستر، بیشتر از نواحی سطح آب می باشد، به گونهای که حداکثر مقدار مؤلفهی عرضی سرعت در نزدیکی بستر ۱/۵ برابر مقدار سرعت در لایهی نزدیک سطح آب می -باشد.

- در ناحیهی نزدیک بستر و در دماغه ی بالادست آبشکن، جریان قائم رو به بالا و در ناحیه ی مقابل آن جریان قائم رو به پایین تشکیل می شود که حاکی از وجود گردابه ی نعل اسبی است که در محل دماغه ی بالادست آبشکن حداکثر مقدار را دارد.

- دو ناحیهی تشدید سرعت، یک ناحیه مربوط به تشدید سرعت در هستهی اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان و ناحیهی پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پاییندست آبشکن و در ناحیهی بیرونی لایهی برشی، تشکیل میشود. حداکثر سرعت متوسط جریان در پاییندست آبشکن ۱/۵۵ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده است.

- در مقاطع بالادست آبشکن و در امتداد جدارهی سمت راست کانال آثار آبشکن در شکل گیری جریان برگشتی و کاهش سرعت جریان نزدیک بستر، به وسیلهی منحنیهای هم تراز انرژی جنبشی قابل مشاهده است. حداکثر مقدار انرژی جنبشی جریان متوسط به اندازه ۲/۵ برابر انرژی جنبشی جریان نزدیک شونده تشدید می شود.

- مقدار بیشینه نوسانات طولی سرعت در مقابل دماغهی آبشکن اتفاق افتاده، که ناشی از شکل گیری گردابهی نعل اسبی و گسترش آن به سمت پایین دست می باشد. با گذر از مقطع آبشکن و در مقاطع عرضی پایین دست، بیشینه نوسانات طولی سرعت در امتداد لایهی برشی رخ می دهد.

در میدان جریان متوسط، بیشترین انرژی جنبشی در بخش
 مرکزی کانال و دور از لایهی برشی شکل می گیرد در حالیک
 بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایهی برشی رخ می

دهد. افزایش انرژی جنبشی در امتداد لایهی برشی نقش مهمی در انتقال رسوبات بستر به سمت پاییندست دارد، به گونهای که انرژی جنبشی مزبور ناشی از تشکیل گردابههای آشفتگی است که در کل عمق جریان گسترش یافتهاند.

- میزان مثبت تنش  $\overline{\nu u'v}$  در امتداد لایه یبرشی تشکیل می-شود. حداکثر مقدار مؤلفه ی مورد نظر تنش رینولدز در امتداد لایه یبرشی و در محلی که مقدار جریان متوسط کوچک است، رخ می دهد. با توجه به مقادیر منفی تنش های رینولدز  $\overline{\nu v} - e^{\overline{v}w} - e^{\overline{v}w}$  در ناحیه یچرخشی پشت آبشکن، تجمع رسوبات در ناحیه یچرخشی رخ خواهد داد.

- در ناحیهی بالادست آبشکن، یک جریان چرخشی در پای آبشکن شکل می گیرد. این جریان چرخشی ابعاد کوچکی دارد و در نزدیکی بدنهی آبشکن متمرکز بوده که از قدرت چرخشی بالایی برخوردار است. در بالادست دماغه، خطوط جریان ناشی از گردابهی نعل اسبی، ضمن چرخش حول دماغه، با حرکت به سمت پاییندست و در مجاورت لایهی برشی بصورت در هم تنیده در می آیند.

#### ٦- مراجع

[1]Ahmed, M. 1953. Experiments on design and behavior of spur-dikes, In proc. Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis.145-59.

[2]Chen, F. Y., and Ikeda, S. 1997. Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 15(2): 15-30.

[3]Ahmed, F., and Rajaratnam, N. 2000. Observations on flow around bridge abutments. J. Eng. Mech., ASCE, 126(1): 51-59.

[4] Ujitewaal W. 2005. Effect of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments. J. Hydraul. Eng., 131(9): 782-91.

[5]Nagata, N., Hosada T., and Nakato, T. 2005. Threedimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. J. Hydraul. Eng., 131(12): 1074-1087.

[6] Kadota, A., Suzuki, K. and Uijtewaal, W. S. J. 2006. The shallow flow around a single groyne under submerged and emerged conditions. RiverFlow 2006, Portugal, 673-682.

[7]Koken, M. and Constantinescu, G. 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel:1.

[12] Duan, J., 2009. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. J. Hydraul. Eng., 135(10): 803-811.

[13]Duan, J., He, L., Fu, X., and Wang, Q. 2009. Mean flow and turbulence around an experimental spur dike. Adv. Water Resour., 132(12): 1717-1725.

[۱٤] صفرزاده گندشمین، ا. ۱۳۸۹. "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان آشفته حول آبشکن با شکلهای مختلف دماغه". رساله دکتری. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس.

[15] Teruzzi, A., Ballio, F., and Armenio, V. 2009. Turbulent stresses at the bottom surface near an abutment: laboratory-scale numerical experiment. J. Hydraul. Eng., 135(2): 106-117.

[16]Nelson, J. M., Shreve, R. L., McLean, S. R., and Drake, T. G. 1995. Role of near-bed turbulence structure on bed load transport and bed form mechanics. Water Resour. Res., 31(8): 2071–2086.

Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process. Water resources research. 44, W08406, doi:10.1029/2007WR006489.

[8]Koken, M. and Constantinescu, G. 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stages of the erosion and deposition process. Water resources research. 44, W08407, doi:10.1029/2007WR006491.

[9] Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Jia, Y. J., 2008 "Measured and simulated flow near spur dikes, ". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.128, No. 12, 1087-1093

[10]Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Jia, Y. J., 2008 "Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case, ". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.128, No. 12, 1087-1093.

[11] Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Shields, F. D., Jr., 2002. "Local scour associated with angled spur dikes, ". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.128, No. 12, 1087-1093..

### Experimental study of flow around a spur dike with side slope

### F. Asadzadeh<sup>1</sup>, A. Safarzadeh<sup>2</sup> and S. A. A. Salehi Neyshabouri<sup>3\*</sup>

1- M. Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modres University

2- Associate Prof., Civil Eng. Dep., Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3- Prof., Hydraulic Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modres University

#### salehi@modares.ac.ir

#### Abstract:

Spur dikes are man-made transverse river structures. They divert the high velocity to the channel center and prevent undesirable bank erosion. In this paper, flow structure around a single spur dike with side slope is investigated experimentally. Three dimensional flow field around a single spurdike with  $75^{\circ}$  side slope located in a flat-bed rectangular laboratory flume has been measured using the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and mean flow and turbulence parameters are investigated. Downstream of the spur dike due to the decrease of the flow velocity, a recirculation zone forms, while the flow accelerates at the middle zone of the channel. Upstream of the tested spur dike, flow is divided into two parts. A part of the approaching flow is diverted to the channel bed and the remaining form a bow wave near the water surface. Downward deflected flow interacts with the near bed approach flow and results in the horseshoe vortex. The horseshoe vortex is the main responsible for scouring at the upstream of the spur dike. Dye visualizations showed that due to the upstream side slope of the spur dike, the down flow is weaker than the spur dike with vertical side slope. Along the main channel two distinctly velocity amplification zones form. A velocity amplification along the outer boundary of the shear layer, downstream of the spur dike forms due to the local effects of the spur dike. Due to the spur dike constriction imposed to the channel, another high velocity zone forms. The second velocity amplification zone forms along the right channel wall. Flow velocity in the first amplification zone is higher than the second zone. The horse shoe vortex is strong near the lower layers and consequently the velocity amplification along the shear layer at the near bed layers is higher than the near water surface layers. By going from near bed layers to the water surface layers the extent of the second amplification zone increases. Flow streamlines at the near bed plane shows development of some oblique streamlines, after the reattachment zone. This stream lines are attributed to the coherent flow structures reported in the literature. The near bed streamlines are more diverted to the opposite channel wall, compared to the near water surface layers. By going from the near bed layers to the water surface layer the center of the recirculating zone moves downstream. The mean flow kinetic energy is amplified 2.5 times of the approach flow. The maximum mean flow amplification occurs at the central zone of the channel, while the maximum turbulent kinetic energy is measured along the outer boundary of the separation zone. The higher turbulent kinetic energy along the shear layer is responsible for the pickup and movement of the sediment particles at low mean velocity zones. Distribution of the Reynolds shear stresses show that the maximum  $-\rho \overline{u'v'}$  stress occurs along the shear layer bounding the separation zone. Minus values of the  $-\rho \overline{v'w'}$  and  $-\rho \overline{u'w'}$  stresses shows that the sedimentation will occur at the downstream zone of the spur dike.

Keywords: Straight spur dike, side slope, flow field, turbulence parameters, Reynolds stresses.