

## مقایسه آزمایشگاهی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس

### ۹۰ درجه با بستر صلب با نتایج نرم‌افزار Flow-3D

محمد واقفی<sup>۱\*</sup>، مریم اکبری<sup>۲</sup>، علیرضا فیوض<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۴

#### چکیده

نرم‌افزار Flow-3D یکی از ابزار پویایی سیالات محاسباتی می‌باشد که برای حل معادلات ناویراستوکس در حالات مختلف برای تعیین الگوی جریان طراحی شده است. یکی از انواع جریانهای پیچیده، که از گذشته تاکنون بسیار مورد توجه بوده، جریان پیرامون آبشکن می‌باشد. علاوه بر آن، اگر این سازه در قوس قرار گیرد، تعیین مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان به مراتب پیچیده تر می‌گردد. با توجه به سختی انجام آزمایشها در حالات مختلف، و با در نظر گرفتن فراسنجهای متفاوت موثر در تعیین الگوی جریان، نقش نرم‌افزارهای عددی، از جمله Flow-3D، بیشتر نمایان می‌شود. در این مقاله، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود در مورد آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب، به بررسی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت خروجی از نرم‌افزار Flow-3D، و مقایسه‌ی آنها با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در مقاطع مختلف طولی، عرضی و مسطحه مقایسه، و مقدار متوسط خطای داده‌های عددی در حالات مختلف محاسبه شدند. بیشترین مقدار متوسط خطای مشاهده شده بین شبیه عددی و آزمایشگاهی مربوط به داده‌های سرعت عمقی جریان در مقطع عرضی بوده، که این خطا برابر با ۱۷ درصد می‌باشد. همچنین، مقادیر متوسط خطای اندازه‌گیری شده مربوط به سرعتهای طولی و عرضی جریان نیز به ترتیب برابر با ۶ و ۱۰ درصد می‌باشد. بطور کلی، نتایج به دست آمده حاصل از مقایسه‌های صورت گرفته بیانگر تطابق مناسب بین شبیه عددی Flow-3D و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند و این به معنای توانایی بالای این نرم‌افزار در شبیه‌سازی الگوی جریان پیرامون سازه‌های آبی موجود در قوس رودخانه نظیر آبشکن است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه آزمایشگاهی، FLOW-3D، قوس ۹۰ درجه، آبشکن T شکل، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان

<sup>۱</sup> - استادیار سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

<sup>۳</sup> - استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

\* نویسنده مسوول مقاله: vaghefi@pgu.ac.ir

## مقدمه

در دنیای امروز، با توجه به سرعت روزافزون پیشرفت رایانه‌ها، و امکان حل معادلات ریاضی پیچیده با کاربرد روشهای عددی، اهمیت آنها در آموزش علوم و مهندسی روز به روز بیشتر احساس می‌شود. حل معادلات پیچیده و غیرخطی حاکم بر رفتار جریان سیالات مختلف در شرایط گوناگون با دانش پویا سیالات و استفاده از رایانه، امروزه تا مراحل بسیار پیشرفته‌ای عملی شده است. بویژه به علت محدودیتهای حاکم بر شبیه‌های فیزیکی، از جمله اندازه‌ی شبیه، و همچنین مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل با میدان جریان واقعی، نیاز به استفاده از شبیه‌های عددی بیشتر نمایان می‌شود. پویایی سیالات محاسباتی (CFD)، از سال ۱۹۸۰ تا کنون به عنوان یک ابزار قوی آبی پدیدار شده، و نرم افزارهای CFD همچون Flow-3D، Ansys، Fluent و به منظور تحلیل میدان جریان و بررسی تنشها و نیروهای موجود ارائه شده اند. به همین دلیل، می‌توان از شبیه‌های عددی همچون نرم افزار Flow-3D به صورت مکمل در کنار شبیه‌های فیزیکی، جهت شبیه‌سازی و بررسی الگوی جریان‌های پیچیده برای مسائل مختلف سیالاتی بهره گرفت. بدین منظور در این مقاله، با استفاده از نرم افزار Flow-3D به بررسی و مقایسه‌ی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان پیرامون آبشکن سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

از زمانهای گذشته تاکنون، رودها به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع تأمین آب برای شکل‌گیری تمدن بشری مطرح بوده‌اند؛ اما آن‌ها به‌رغم این نقش حیاتی، همواره به عنوان یکی از دشمنان طبیعی زندگی بشر نیز محسوب شده‌اند؛ زیرا رودها در مسیر تکاملی خود همواره دست خوش تغییر و تحول بوده، و فرسایش جداره‌های خارجی و بستر رود، و رسوب‌گذاری در جداره‌های داخلی از جمله این تغییرات می‌باشد که زیانهای جبران‌ناپذیری را به ساکنین کناره‌نشین و تأسیسات اطراف آن وارد می‌کند (شریفی منش، ۱۳۷۴).

آبشکنها در رودخانه‌های آبرفتی بطور عمود یا زاویه دار نسبت به جریان و از دیواره‌ی رودخانه، امتداد می‌یابند. این سازه‌ها با برگرداندن جریان از دیواره‌های

رودخانه به میانه نهر، به جلوگیری و کاهش فرسایش دیواره‌ها کمک می‌کنند. آبشکنها، منجر به تغییر میدان جریان و ایجاد یک جریان متلاطم قوی سه بعدی می‌گردند. همچنین، بر اثر فشار زیاد ایجادشده در پشت سازه و جریان‌های رو به پایین در بالادست آن، گردابه‌های نعل اسبی در پایین دست منطقه جدایی جریان، ایجاد می‌شود (آذین فر و کلس، ۲۰۰۸).

از آن که مسئله‌ی فرسایش دیواره و بستر رودها از زمانهای گذشته به عنوان یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب مطرح بوده اند، از دیرباز مطالعات فراوانی در زمینه‌ی الگوی جریان و آبشستگی در رودخانه‌ها انجام شده است. گیل (۱۹۷۲)، در یک تحقیق آزمایشگاهی نشان داد که فاصله بین آبشکنها وابستگی زیادی به شعاع انحناء دارد. در مسیرهای تقریباً مستقیم، فاصله بین آبشکنها در حدود ۵ برابر طول آبشکن می‌باشد درحالی‌که در قوسها حدود یک تا دو برابر طول آبشکن خواهد بود. کوپلند (۱۹۸۳)، با انجام مطالعات آزمایشگاهی با عنوان روشهای استفاده از آبشکنها برای محافظت از سواحل رودخانه‌ها در آمریکا در مورد آبشکنهای مستقر در قوس، به این نتیجه رسید که حداکثر عمق آبشستگی موضعی در آبشکن‌ها، در پایین دست رأس قوس اتفاق می‌افتد، درحالی‌که عمق حداکثر آبشستگی برای آبشکنهایی که در ورودی و خروجی قوس خارجی قرار دارند به میزان قابل توجهی کوچکتر است. تینگسانچالی و ماهسواران (۱۹۹۰) برای پیش‌بینی میدان جریان پیرامون تک آبشکن، معادلات دو بعدی متوسط‌گیری شده را در عمق که با کاربرد شبیه‌آشفنگی  $k-\epsilon$  بسط داده شده بود، حل کردند. آنها برای حل معادلات، تأثیر انحنای خطوط جریان را در نظر گرفته و مشاهده نمودند که نتایج شبیه‌سازی عددی به علت اصلاح ضریب زبری نزدیک به دماغه‌ی آبشکن، و اعمال اثرات ناشی از سه بعدی بودن جریان، بهبود یافته است. پرزوسسکی و همکاران (۱۹۹۵)، مطالعاتی را در مورد آبشکنهای موجود در قوسهای رود وارتا انجام داد که منجر به تأیید نتایج به دست آمده از تحقیقات کوپلند گردید. ایشان همچنین متوجه شدند که سرعت‌های جریان در داخل گردابه‌ها و عرض و عمق حفره‌های آبشستگی

ساختار جریان‌های متوسط و آشفته پیرامون آبشکن مستقیم واقع در یک نهر آزمایشگاهی با بستر صلب پرداختند. ایشان مشاهده کردند که جریان متوسط در هر دو جهت جانبی و قائم جداشده و در داخل ناحیه‌ی چرخشی پشت آبشکن، ترکیبی از گردابه‌های افقی و قائم وجود دارد. هر سه مؤلفه تنشهای قائم رینولدز با عبور از مقطع آبشکن تشدید شده، و حداکثر تنش در عمق میانی نهر و در امتداد لایه‌ی تنش برشی اتفاق می‌افتد. ناجی ابهری و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان با استفاده از نرم افزار SSIIM در قوس ۹۰ درجه پرداخته و مشاهده نمودند که خطوط جریان در تراز نزدیک به بستر به سمت جداره‌ی داخلی، و در تراز نزدیک به سطح آب به سمت جداره‌ی خارجی متمایل می‌شوند. همچنین، محل وقوع حداکثر سرعت طولی در ابتدای قوس، در نیمه‌ی داخلی مقطع، سپس به سمت دیواره‌ی خارجی نهر جابه‌جا می‌شود. یزدی و همکاران (۲۰۱۰)، به شبیه‌سازی الگوی جریان پیرامون تک آبشکن در مسیر مستقیم با استفاده از شبیه  $k-\omega$  در نرم افزار Fluent پرداختند. آنها تأثیر فراسنجهای طول، زاویه آبشکن و بده جریان را بر توزیع تنش برشی بستر بررسی نمودند. مسجدی و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی تأثیر فراسنجهای اثر موقعیت آبشکن، عدد فرود و طول بال آبشکن  $L$  شکل در قوس ۱۸۰ درجه ملایم در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان دادند که حداقل مقدار عمق آبشستگی در زاویه‌ی ۳۰ درجه، و حداکثر آن در زاویه‌ی ۷۵ درجه اتفاق می‌افتد، آنها همچنین مشاهده نمودند که با افزایش عدد فرود، عمق بیشینه آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. واقفی و همکاران (۲۰۰۹-۲۰۱۲)، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن سرسپری غیرمستغرق در قوس ۹۰ درجه تحت تأثیر فراسنجهای مختلف، از جمله عدد فرود، شعاع انحنای هندسه بال آبشکن، طول بال و جان آبشکن، موقعیت آبشکن و ... پرداخته‌اند. آنها نتیجه گرفتند که محل حداکثر عمق آبشستگی در فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ درصدی طول آبشکن، و در بالادست می‌باشد. ایشان همچنین مشاهده نمودند که افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر

بستگی به انحنای قوس، و موقعیت قرارگیری آبشکنها دارد. سلیمان و همکاران (۱۹۹۷)، یک شبیه ریاضی دو بعدی را برای بررسی اثرات آبشکنها بر ریخت شناسی قوسهای رود نیل تبیین نمودند. آنها در این تحقیق از طولها و فواصل مختلف آبشکنها استفاده کردند تا تأثیر آنها را بر تراز سطح آب و مؤلفه های سرعت ارزیابی کنند. وو و همکاران (۲۰۰۰)، با استفاده از شبیه عددی سه بعدی به بررسی میدان جریان و انتقال رسوب در نهرهای قوسی پرداختند. نتایج آنها بیانگر این است که شبیه مورد استفاده در شبیه سازی الگوی جریان دارای دقت بسیار زیادی بوده، اما در شبیه‌سازی الگوی آبشستگی نتایج از صحت کمتری برخوردار می‌باشد. کاسن و چودری (۲۰۰۲)، برای بررسی تغییرات تراز بستر در قوس رودخانه‌ها از یک شبیه عددی دو بعدی استفاده کردند. آنها برای حل معادلات حاکم بر جریان، مختصات منحنی الخط، و همچنین برای شبیه سازی تنشها روش گرانیوی گردابه‌ای را به کار بردند، ضمن اینکه آنها در معادلات جریان اثر زمان را نیز در نظر گرفتند که باعث افزایش دقت در نتایج حاصل از شبیه‌سازی نهرهای طبیعی می‌شود. ناگاتا و همکاران (۲۰۰۵) به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سه بعدی پیرامون تک آبشکن با بستر متحرک پرداختند. ایشان ضمن تحلیل ساختار جریان متوسط، ارتباط آن را با نحوه‌ی وقوع و توسعه‌ی حفره آبشستگی مورد بررسی قرار دادند. فضلی و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون یک آبشکن تیغه‌ای مستقر در قوس ۹۰ درجه، که در موقعیت‌های مختلف در قوس قرار گرفته بود، پرداختند. ایشان نشان دادند که با افزایش موقعیت استقرار آبشکن در طول قوس، طول ناحیه‌ی جدایی افزایش یافته، درحالی‌که طول ناحیه بازگشتی کاهش می‌یابد. قدسیان و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات عدد فرود و طول بال و جان آبشکن T شکل مستقر در موقعیت ۷۵ درجه بر الگوی جریان واقع در قوس ۹۰ درجه پرداختند. ایشان در تحقیق نشان دادند که با افزایش طول آبشکن، طول ناحیه‌ی جدایی و گردابه‌ی شکل گرفته در این ناحیه افزایش می‌یابد. دوان و همکاران (۲۰۰۹)، به مطالعه‌ی

نرم افزار SSIM نیز به بررسی اثر شعاع انحنای قوس ۹۰ درجه توام با استقرار آبشکن سرسپری بر الگوی جریان و آبشستگی پرداختند. آنها خطوط جریان را در نیمرخ های طولی و عرضی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش شعاع انحنا، طول ناحیه‌ی جدایی ناشی از گردابه های افقی کاهش می‌یابد، که مقادیر آن بین ۰/۷ تا ۰/۳ برابر طول بال آبشکن می باشد.

همان طور که در بالا اشاره شد، تمامی مطالعات صورت گرفته در زمینه الگوی جریان پیرامون آبشکنهای مستقر در قوس تاکنون به صورت آزمایشگاهی یا عددی منفرد بوده است. نوآوری این مقاله مقایسه و بررسی مؤلفه های سه بعدی سرعت جریان پیرامون آبشکن سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم افزار Flow-3D با داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی دستگاه سرعت سنج سه بعدی Vectrino به وسیله‌ی واقفی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد.

## مواد و روشها

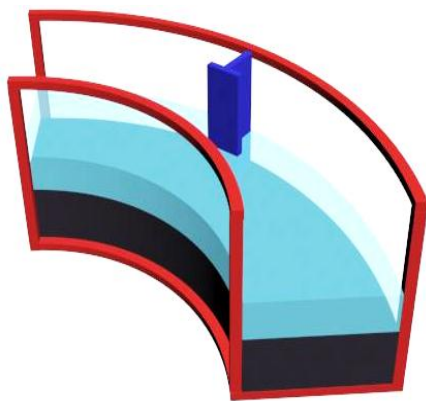
### معرفی شبیه آزمایشگاهی

#### نهر آزمایشگاهی

آزمایش مورد نظر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس به وسیله‌ی واقفی (۱۳۸۸) در یک نهر به عرض ۶۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و به صورت ترکیبی از مسیر مستقیم و قوسی انجام شده است. طول مسیر مستقیم بالادست ۷۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، که به وسیله یک قوس ۹۰ درجه به شعاع خارجی ۲۷۰ سانتی‌متر و شعاع داخلی ۲۱۰ سانتی‌متر به مسیر مستقیم پایین دست به طول ۵۲۰ سانتی‌متر متصل می‌شود. نسبت شعاع قوس به عرض نهر برابر با ۴ می‌باشد. کف نهر آزمایشگاهی مورد نظر صلب و با زبری ۰/۱۵ بوده و قطر مصالح بستر نیز ۱/۲۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بدهی جریان در طول انجام آزمایش ثابت و برابر با ۲۵ لیتر بر ثانیه، و عمق آب نیز در بالادست جریان قبل از ورود به قوس ۱۲ سانتی‌متر بوده است.

موقعیت آبشکن به سمت پایین دست قوس باعث افزایش ابعاد چاله‌ی آبشستگی می‌گردد. آچاریا و همکاران (۲۰۱۳)، به مطالعه‌ی عددی سه بعدی الگوی جریان آشفته پیرامون گروه آبشکنهای تیغه‌ای واقع در مسیر مستقیم با بستر ثابت و متحرک با استفاده از نرم افزار Flow-3D پرداختند. آنها از شبیه آشفستگی k-ε برای شبیه‌سازی استفاده کرده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. واقفی و همکاران (۲۰۱۴)، به صورت عددی اثر عدد فرود و درصد استغراق بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بررسی نموده و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد فرود در پایین دست آبشکن، فاصله‌ی جریانهای بازگشتی از جان آبشکن حدود ۱۰ درصد بیشتر شده، و همچنین در نزدیکی دیواره‌ی داخلی با افزایش استغراق آبشکن، سرعت طولی به نصف سرعت اولیه کاهش می‌یابد. ایشان همچنین با استفاده از نرم افزار SSIM به مطالعه تأثیر فراسنج طول بال به جان آبشکن سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه بر الگوی آبشستگی پرداخته و نشان دادند که چاله‌ی آبشستگی اصلی تا حدود ۰/۶۷ عرض نهر نسبت به ساحل خارجی پیشروی کرده است. واقفی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی الگوی جریان تحت تأثیر فراسنج هندسی طول جان آبشکن سرسپری مستقر در مسیر مستقیم با استفاده از نرم افزار Fluent پرداختند. نتایج آنها بیانگر این است که ناحیه‌ی جدایی جریان و اتصال مجدد آن با افزایش طول جان آبشکن تا طول جان معادل ۲۰ درصد عرض نهر، روندی صعودی داشته اما پس از آن روندی نزولی دارد. واقفی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از نرم افزار Flow-3D به مطالعه تأثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس به صورت مستغرق و غیرمستغرق پرداختند. بررسیهای آنها بیانگر این است که با افزایش شعاع انحنا در پایین دست آبشکن غیرمستغرق، ابعاد گردابه ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آنها مشاهده کردند که هر چه شعاع انحنا نسبی کمتر باشد، ناحیه‌ی وسیع تری در پایین دست آبشکن مستغرق دارای سکون نسبی جریان خواهد بود. واقفی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از

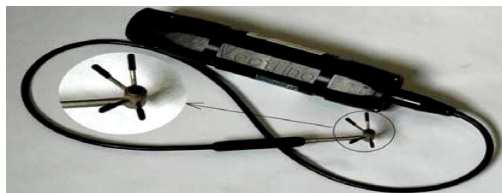
اندازه‌گیری سرعت جریان در نواحی نزدیک به دیواره‌های نهر و سطح آب از حسگر جانب‌نگر، و در بقیه حالات از حسگر پایین‌نگر استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش مورد نظر، بسامد ۵۰ هرتز و زمان ۱ دقیقه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، این دستگاه مزبور می‌تواند در هر دقیقه تا سقف ۳۰۰۰ داده سرعت جریان در سه جهت را برداشت کند. اطلاعات مربوط به داده‌های اندازه‌گیری شده در زمانهای مختلف، با استفاده از نرم‌افزار Vectrino<sup>+</sup> ثبت شده و به شکل adv ذخیره می‌شود. سپس این داده‌ها برای استفاده در نرم‌افزار Explorer V، به شکل vno تبدیل شده و پس از تجزیه و تحلیل و میانگین‌گیری سرعتها به شکل قابل استفاده در excel تبدیل می‌گردند. در شکل ۳، دو نوع حسگر مربوط به دستگاه سرعت‌سنج Vectrino مورد استفاده در این آزمایش، نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه استقرار آبشکن در قوس ۹۰ درجه.



(الف)

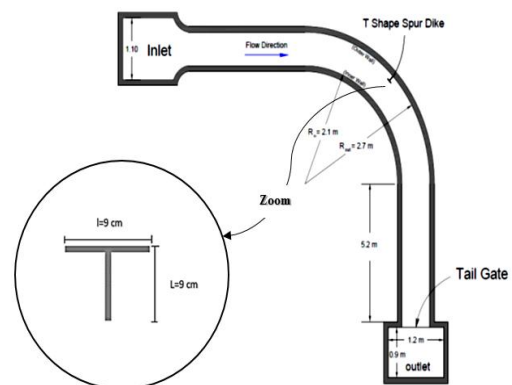


(ب)

شکل ۳- نمایی از حسگرهای متفاوت دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino، (الف) حسگر پایین‌نگر، (ب) حسگر جانب‌نگر (واقفی، ۱۳۸۸).

## آبشکن مورد استفاده

آبشکن مورد استفاده در این آزمایش، T شکل و از جنس پلکسی گلاس بود. طول بال (L) و جان (I) این آبشکن برابر با ۹ سانتی‌متر، ضخامت آن ۱ سانتی‌متر و ارتفاع آن نیز ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این آبشکن به صورت قائم و غیرمستغرق در موقعیت ۴۵ درجه و در قوس خارجی مستقر شد (واقفی و همکاران، ۱۳۸۸). مشخصات نهر آزمایشگاهی و نمای طرح واره ای از آبشکن T شکل مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، در شکل ۲، نحوه‌ی استقرار آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه به صورت سه بعدی مشاهده می‌شود.



شکل ۱- مشخصات نهر آزمایشگاهی و نمای طرح واره-ای از آبشکن.

## دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino و نرم‌افزارهای مربوط به آن

به منظور اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت و تعیین الگوی سه بعدی جریان از دستگاه سرعت سنج سه بعدی Vectrino، که یکی از پیشرفته‌ترین انواع سرعت سنجهای استفاده شده است. عملکرد دستگاه بر اساس ارسال یک موج صوتی با بسامد معلوم و دریافت بازتاب آن از جریان و تشخیص سرعت جریان از میزان تغییر در بسامد اولیه می‌باشد. این دستگاه، بر اساس نحوه‌ی استقرار حسگر آن در داخل سیال به دو نوع جانب‌نگر (side looking) و پایین‌نگر (down looking) تقسیم می‌شود، که برای اندازه‌گیری در قسمتهای مختلف میدان به کار می‌رود (راهنمای استفاده از سرعت سنج Vectrino، ۲۰۰۴). برای

### معرفی شبیه عددی

محیط جریان به شبکه‌ای با سلولهای مستطیلی ثابت تقسیم بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. در تحلیل شبیه، از روش Explicit و با شبیه آشفتگی RNG k-ε استفاده گردیده است. در این نرم‌افزار از دو روش عددی برای شبیه سازی سطوح استفاده می‌شود: ۱- روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۲- روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR): این روش برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزها کاربرد دارد (راهنمای استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، ۲۰۰۸).

### شرایط مرزی

اعمال شرایط مرزی مناسب، یکی از مهمترین موارد مطرح در شبیه سازی‌های عددی می‌باشد. در شبیه حاضر، شش شرط مرزی در نظر گرفته شده است. در مرز ورودی، شرط بدهی ثابت (Volume Flow Rate) برابر با 25lit/s در دیواره ها و بستر نهر، شرط مرزی دیواره (Wall) و در مرز فوقانی نهر نیز شرط تقارن (Symmetry) به کار رفته است. در سطح آزاد نیز با استفاده از روش حجم سیال شبیه سازی صورت گرفته و در مرز خروجی نیز با توجه به معلوم بودن ارتفاع آب، شرط مرزی فشار مشخص (Specified Pressure) اعمال شده است.

### شبکه بندی هندسه ی جریان

به منظور تهیه ی هندسه میدان جریان جهت شبیه سازی قوس ۹۰ درجه و آبشکن مورد استفاده، از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شده است. پس از تهیه STL‌های مورد نظر از نهر و آبشکن، شبیه سازی جریان در نرم افزار Flow-3D آغاز می‌شود. با توجه به هندسه ی پیچیده جریان، شبکه بندی این نهر قوسی و مسیره‌های مستقیم بالادست و پایین دست آن در دستگاه مختصات مختصات قائم، به روش چند قطعه‌ای و به صورت غیریکنواخت انجام شده است. شبکه بندی میدان حل در عمق غیریکنواخت بوده و در نزدیکی کف و سطح آب نیز از شبکه ی ریزتر استفاده شده است. به منظور تحلیل

نرم‌افزار Flow-3D یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه ی پویایی سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن به وسیله ی Flow Science, Inc صورت گرفته است. این نرم افزار، قابلیت تحلیل یک، دو و سه بعدی میدان جریان را داشته و دارای محدوده ی کاربرد بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات می‌باشد.

### معادلات حاکم بر جریان

معادله‌های حاکم بر جریان سیال شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه‌ی حرکت می‌باشد. معادله‌ی پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله‌ی تعادل جرم برای یک بنپار سیال به دست می‌آید. معادلات حاکم بر تحلیل سه بعدی غیرقابل تراکم در دستگاه مختصات مختصات قائم (X,Y,Z) به صورت زیر می‌باشند (راهنمای استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، ۲۰۰۸):

$$V_F \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

که در آن، (u,v,w): مؤلفه‌های سرعت جریان در جهت‌های (x,y,z)، (A<sub>x</sub> A<sub>y</sub>,A<sub>z</sub>): بخشی از مساحتی را به وجگود می آورند که مرتبط با سیال است؛ ρ چگالی سیال و R<sub>SOR</sub> چگالی Source Term می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z$   
 $V_F$ : درصد حجم آب ورودی، P فشار، (G<sub>x</sub>G<sub>y</sub>,G<sub>z</sub>) شتاب جرمی در مختصات مختصات قائم، (f<sub>x</sub> f<sub>y</sub>,f<sub>z</sub>) شتاب مربوط به گرانشی در جهت‌های (x,y,z) می‌باشند.

### حل عددی معادلات

نرم افزار Flow-3D، معادله‌های حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های احجام محدود حل می‌کند.

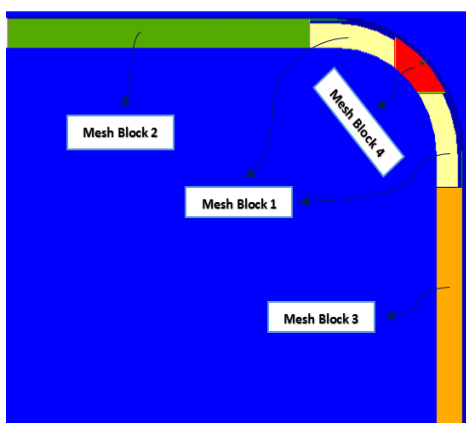
۳۰	۲۵۰	۲۵۰	۱	
۳۰	۳۳	۱۱۰	۲	۳
۳۰	۷۵	۳۰	۳	
۳۰	۱۴۰	۱۴۰	۴	
۳۰	۲۸۰	۲۸۰	۱	
۳۰	۳۵	۱۲۰	۲	۴
۳۰	۸۰	۳۵	۳	
۳۰	۱۵۰	۱۵۰	۴	
۳۵	۳۰۰	۳۰۰	۱	
۳۵	۳۷	۱۲۵	۲	۵
۳۵	۸۵	۳۷	۳	
۳۵	۱۶۰	۱۶۰	۴	
۳۵	۳۱۰	۳۱۰	۱	
۳۵	۴۰	۱۳۰	۲	۶
۳۵	۹۰	۴۰	۳	
۳۵	۱۷۰	۱۷۰	۴	
۴۰	۳۲۰	۳۲۰	۱	
۴۰	۴۵	۱۴۰	۲	۷
۴۰	۹۵	۵۰	۳	
۴۰	۱۸۰	۱۸۰	۴	
۴۵	۳۴۰	۳۴۰	۱	
۴۵	۵۰	۱۵۰	۲	۸
۴۵	۱۰۰	۶۰	۳	
۴۵	۱۸۵	۱۸۵	۴	
۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱	
۵۰	۶۰	۱۶۰	۲	۹
۵۰	۱۱۰	۶۵	۳	
۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۴	

دقیق جریان، از ۴ قطعه در مسیر مستقیم بالادست نهر، قوس ۹۰ درجه، مسیر مستقیم پایین‌دست و محوطه قرارگیری آبشکن استفاده شده است. در شکل ۴، نحوه‌ی قطعه‌بندی کل مسیرهای مستقیم و قوسی و در شکل ۵، طرح واره ای از شبکه‌بندی تولیدشده پیرامون آبشکن سرسپری در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، برای بالا بردن دقت محاسبات شبیه عددی از قطعه شماره ۴ برای ریز کردن سلول‌های میدان محاسباتی اطراف آبشکن T شکل استفاده شده است. در جدول ۱، تحلیل حساسیت بر روی اندازه شبکه بندی انجام شده و تعداد کل شبکه‌های بررسی شده در راستاهای سه گانه مختصات مختصات قائم برای قطعه‌های مختلف، ارائه شده است. با توجه به بررسیهای صورت گرفته مشاهده شد که از شبکه‌ی شماره ۶ به بعد با ریزتر کردن شبکه بندی، تغییرات داده‌های سرعت جریان نسبت به شبکه‌ی شماره ۶ بسیار ناچیز بوده، و فقط به دلیل افزایش نقاط شبکه بندی در شبیه، زمان شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، شبکه بندی شماره ۶ از میان سایر شبکه بندی‌های ارائه شده به عنوان شبکه بهینه (هم از نظر دقت بالا در تطابق داده‌های عددی و آزمایشگاهی و هم از نظر کاهش زمان شبیه‌سازی) انتخاب شده است، بنابراین، انجام شبیه‌سازی‌ها در این مقاله با این نوع شبکه بندی انجام شده است.

جدول ۱- تحلیل حساسیت شبکه‌بندی شبیه برای شبیه‌سازی جریان در نهر قوسی ۹۰ درجه توأم با استقرار آبشکن T شکل با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D.

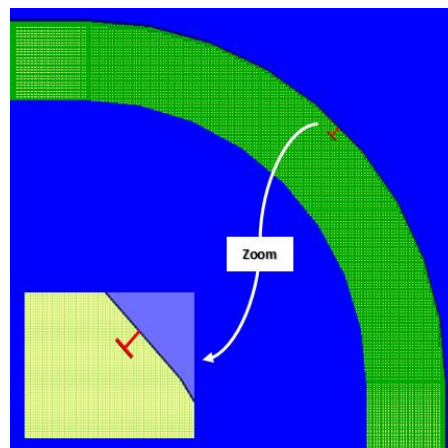
## 3D

شماره شبکه بندی	شماره قطعه	تعداد شبکه در راستای X	تعداد شبکه در راستای Y	تعداد شبکه در راستای Z
۱	۱	۱۵۰	۱۵۰	۱۵
۱	۲	۶۵	۲۰	۱۵
۱	۳	۲۰	۴۰	۱۵
۱	۴	۸۰	۸۰	۱۵
۲	۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۵
۲	۲	۸۰	۳۰	۲۵
۲	۳	۲۵	۶۰	۲۵
۲	۴	۱۲۰	۱۲۰	۲۵



شکل ۴- نمایش نحوه‌ی قطعه‌بندی نهر قوسی و مسیرهای مستقیم بالادست و پایین‌دست آن در نرم‌افزار Flow-3D.

عدد فرود  $0.34$  در شکل ۶، نشان داده شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سرعت‌های طولی جریان در مقاطع مختلف عرضی دور و نزدیک به آبشکن در شبیه عددی و آزمایشگاهی به هم نزدیک بوده، و از تطابق بسیار مناسبی برخوردار می‌باشند، به گونه ای که متوسط خطای اندازه گیری شده برای سرعت‌های طولی در مقاطع مختلف عرضی حدوداً برابر با ۶ درصد است، که این مقدار خطا قابل قبول بوده و دلیل این مقدار خطای کم را می‌توان با متفاوت بودن موقعیت دقیق برداشت داده‌های آزمایشگاهی نسبت به داده‌های عددی توجیه نمود. در شکل ۶-الف، مشاهده می‌شود که سرعت طولی بیشینه در فاصله‌ی  $1/6$  عرض نهر از ساحل داخلی و در عمقی معادل با ۵ درصد عمق جریان از سطح آب می‌باشد؛ زیرا در مقطع عرضی  $30^\circ$  درجه تأثیر شیب طولی فشار بیشتر از قدرت جریان ثانویه بوده و بیشینه سرعت جریان در نزدیکی دیواره داخلی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۶-ب، با نزدیک شدن به بال آبشکن کم کم به سرعت در میانه عمق جریان نسبت به نزدیکی بستر افزوده شده، که این تغییر موقعیت سرعت طولی بیشینه را می‌توان به غالب بودن جریان ثانویه بر شیب فشار طولی، و همچنین تأثیر استقرار آبشکن در وسط قوس مربوط دانست. علاوه بر آن، تأثیر استقرار آبشکن بر کاهش سرعت جریان در محدوده‌ی دیواره خارجی و بال آبشکن در این شکل کاملاً مشخص می‌باشد؛ اما در خروجی قوس (زاویه  $90^\circ$  درجه)، مطابق شکل ۶-ج، سرعت طولی بیشینه دوباره به موقعیت اولیه خود و به عمقی معادل ۵ درصد ژرفای جریان از سطح آب بازمی‌گردد، و دیگر اثری از نواحی کم سرعت جریان تحت تأثیر استقرار آبشکن در رأس قوس مشاهده نمی‌شود.



شکل ۵- طرح واره‌ای از شبکه‌بندی تولیدشده پیرامون آبشکن سرسپری در قوس  $90^\circ$  درجه در نرم‌افزار Flow-3D

### نتایج و بحث

رودخانه‌های قوسی توأم با آبشکن، به عنوان یکی از مواردی است که جریان آب بسیار پیچیده در آنها برقرار می‌باشد. خطوط جریان در چنین میدانی نه تنها منحنی موازی هم نیستند، بلکه این خطوط را می‌توان گفت که در هم تنیده‌اند. احداث آبشکنها باعث تنگ شدگی مسیر جریان می‌شوند، که این موضوع باعث افزایش سرعت جریان در نزدیکی آبشکن، و افزایش سرعت متوسط در مقطع تنگ شده‌ی آبراهه می‌گردد. به همین دلیل، داشتن دانش آب پویایی از این جریان‌های انحنا دار، از لحاظ کاربردی بسیار مهم است. در این قسمت به بررسی و مقایسه آزمایشگاهی و عددی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در مقاطع مختلف طولی، عرضی و مسطحه در قوس  $90^\circ$  درجه توأم با استقرار آبشکن T شکل غیرمستغرق پرداخته شده است.

### مقایسه توزیع سرعت طولی

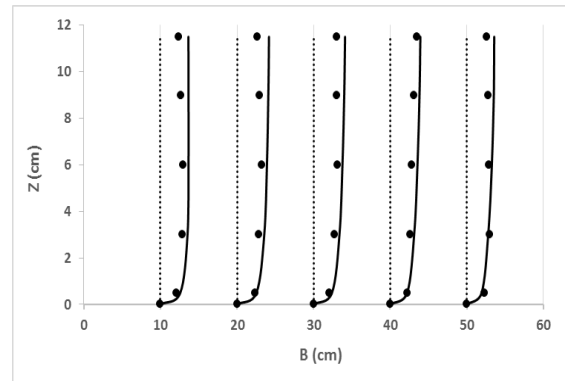
هنگامی که جریان وارد قوس می‌شود، به دلیل وجود جریان ثانویه، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت تغییر کرده و باعث می‌شوند که بیشترین سرعت در زیر سطح آب و تقریباً در میانه، عمق نهر مشاهده گردد. علاوه بر آن، توزیع مؤلفه طولی سرعت هم لگاریتمی نخواهد بود. نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به مؤلفه‌های سرعت طولی جریان در مقاطع مختلف عرضی در زوایای  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  درجه و در حالت آبشکن غیرمستغرق و



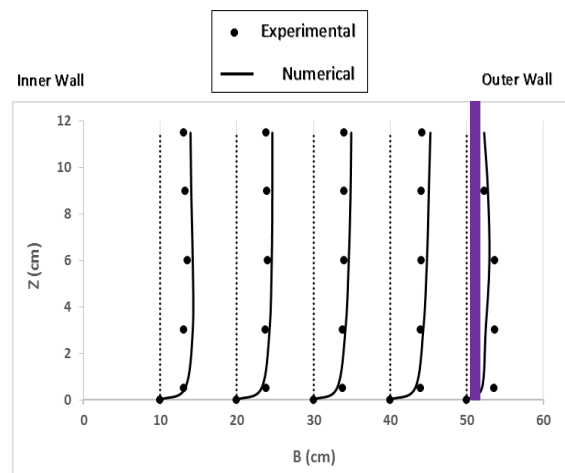
### مقایسه توزیع سرعت عرضی

نیروی گریز از مرکز در رودخانه‌های قوسی، سبب افزایش سطح آب در قوس خارجی و کاهش آن در قوس داخلی می‌شود. در نتیجه، به دلیل شیب فشار، در نزدیکی کف رودخانه، جریان به سمت قوس داخلی و در نزدیکی سطح آب، جریان به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود.

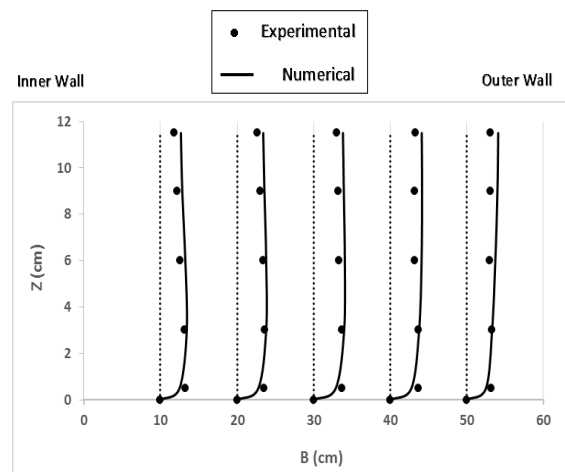
مؤلفه‌های سرعت عرضی جریان در مقاطع مختلف عرضی در زوایای ۳۰، ۴۵/۵ و ۹۰ درجه در قوس ۹۰ درجه به صورت عددی و آزمایشگاهی در شکل ۷، ارائه شده‌اند. نتایج بیانگر آنند که شبیه عددی و آزمایشگاهی از تطابق خوبی نسبت به هم برخوردار می‌باشند. میزان متوسط خطای اندازه‌گیری شده برای داده‌های عددی مربوط به سرعت عرضی جریان نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع عرضی مختلف حدود ۱۰ درصد است. بیشترین مقدار تفاوت در داده‌های عددی و آزمایشگاهی در ناحیه‌ی اطراف آبشکن، و همچنین نزدیکی سطح آب می‌باشد، که این تفاوت را می‌توان تا حد زیادی به متفاوت بودن هندسه‌ی بال آبشکن (گرد گوشه بودن آن در شبیه آزمایشگاهی و تیز گوشه بودن در شبیه عددی)، و همچنین دشواری شرایط آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری سرعت جریان در نزدیکی سطح آب با حسگر جانب نگر دستگاه سرعت‌سنج Vectrino مربوط دانست. با مقایسه‌ی سرعت‌های عرضی و سرعت‌های طولی جریان (شکل‌های ۶ و ۷) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار متوسط سرعت‌های عرضی جریان حدوداً ۴۰-۵۰ درصد سرعت‌های طولی آن می‌باشد. شکل‌های ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج که سرعت عرضی جریان در فاصله ۵ درصد عمق جریان از کف نسبت به ۵ درصد عمق جریان از سطح آب دچار تغییر جهت شده است. این تغییر جهت بیانگر وجود جریان‌های ثانویه در قوس بوده، و در شکل ۷-ب، که در فاصله‌ی کمی از محل استقرار آبشکن می‌باشد، جریان‌های ثانویه قویتری مشاهده می‌شوند. علاوه بر آن، سرعت عرضی بیشینه نیز، در مقطع عرضی ۴۵/۵ درجه، و به فاصله‌ی ۲/۳ عرض نهر از ساحل داخلی می‌باشد.



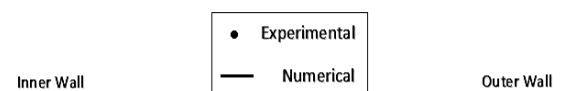
(الف)



(ب)

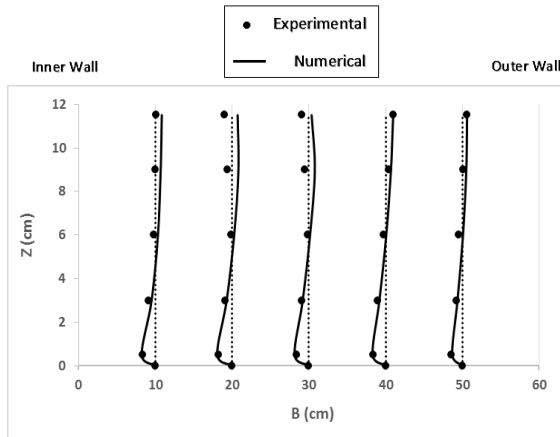


(ج)

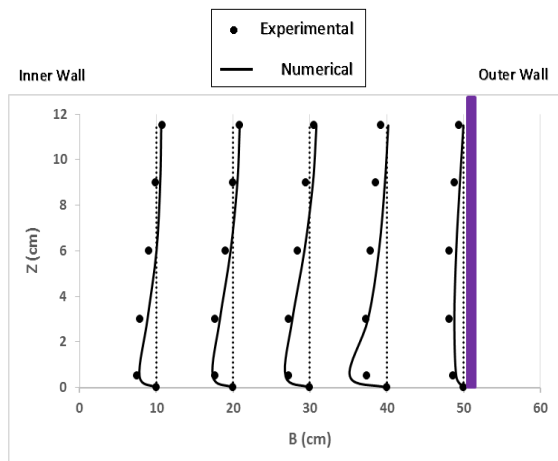


شکل ۶- مقایسه‌ی سرعت‌های طولی در مقاطع عرضی مختلف دور و نزدیک به آبشکن T شکل، الف) ۳۰ درجه، ب) ۴۵/۵ درجه و ج) ۹۰ درجه. 100 cm/s

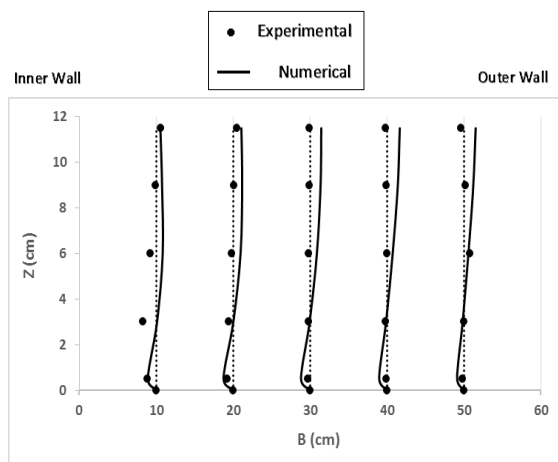
از سرعت‌های طولی و عرضی بوده و حدوداً برابر با ۵-۸ درصد سرعت‌های طولی جریان می‌باشند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- مقایسه‌ی سرعت‌های عرضی در مقاطع عرضی مختلف دور و نزدیک به آبشکن T شکل، (الف) ۳۰ درجه، (ب) ۴۵/۵ درجه و (ج) ۹۰ درجه. 50 cm/s

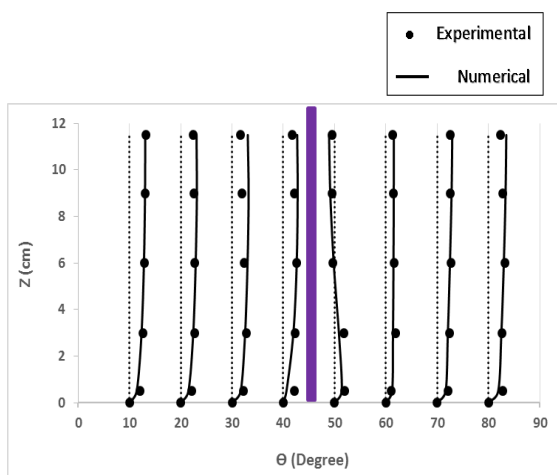
### مقایسه توزیع سرعت عمقی

در یک رودخانه‌ی قوسی، هر سه مؤلفه‌ی سرعت جریان به دلیل اندرکنش جریانهای ثانویه و جریان اصلی حاکم بر رود حائز اهمیت می‌باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت عمقی جریان در مقاطع مختلف عرضی در زوایای ۳۰، ۴۵/۵ و ۹۰ درجه برای آبشکن غیرمستغرق و مستقر در قوس ۹۰ درجه در شکل ۸، نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۸-الف و ۸-ج، مشاهده می‌شود که در نواحی ابتدایی و انتهایی قوس، داده‌های آزمایشگاهی و عددی بسیار به هم نزدیک می‌باشند، درحالی‌که در مقطع نزدیک به آبشکن (شکل ۸-ب) روند توزیع داده‌های آزمایشگاهی و عددی متفاوتند. با توجه به این شکل، در نزدیکی ساحل داخلی، و به فاصله‌ی ۱/۶ تا ۱/۳ عرض نهر، این داده‌ها تطابق بیشتری را نسبت به محدوده اطراف آبشکن دارند. در واقع، بیشترین میزان اختلاف داده‌های عددی و آزمایشگاهی در مجاورت آبشکن، و مربوط به مؤلفه‌های عمقی سرعت جریان می‌باشد، که میزان متوسط خطای اندازه‌گیری شده در این حالت برابر با ۱۷ درصد است. اختلاف موجود بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله: ساده‌سازی‌های موجود در معادلات عددی، اختلاف موجود در شبیه‌کردن هندسه‌ی بال آبشکن در حالت عددی و آزمایشگاهی، و همچنین به خطاهای انسانی در برداشتن داده‌های آزمایشگاهی در نزدیکی آبشکن، به دلیل هندسه‌ی خاص آبشکن T شکل و استفاده از حسگرهای مختلف دستگاه سرعت‌سنج برای برداشتن داده‌های سرعت پیرامون آبشکن، مربوط دانست. دو نکته در ارتباط با شکل ۸-ب حائز اهمیت می‌باشند: اولاً، در این شکل تغییر جهت سرعت جریان از کف به سمت سطح آب، و در نتیجه وجود جریانهای ثانویه کاملاً مشهود می‌باشد؛ ثانیاً، به جز در نواحی نزدیک به کف، در سایر نواحی جریانهای بالارونده به دلیل برخورد جریان به بال پایین‌دست آبشکن مشاهده می‌شود.

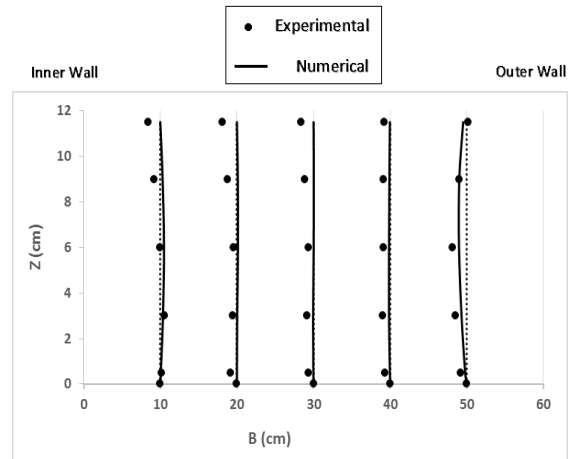
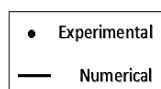
با توجه به شکل‌های ۸-الف، ۸-ب و ۸-ج و مقایسه‌ی سرعت‌های عمقی و طولی جریان در مقاطع مختلف عرضی، مشاهده می‌شود که سرعت‌های عمقی بسیار کمتر

### مقایسه‌ی توزیع مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در مقطع طولی

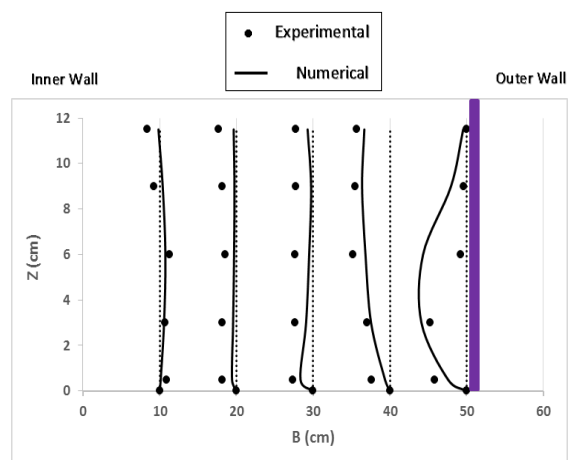
توزیع مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان به صورت عددی و آزمایشگاهی در مقطع طولی، و به فاصله‌ی ۶ درصد عرض نهر از ساحل خارجی، در شکل ۹، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹-الف، مقایسه‌ی سرعت‌های طولی جریان برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی بیانگر کاهش سرعت جریان در نواحی اطراف آبشکن در بالادست و پایین دست آن (در محدوده زوایای ۴۰ تا ۵۰ درجه) می‌باشد، درحالی‌که مطابق شکل‌های ۹-ب و ۹-ج، در محدوده‌ی اطراف آبشکن، به دلیل افزایش سرعت‌های عرضی و عمقی جریان، قدرت جریان ثانویه نیز افزایش یافته است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج عددی و آزمایشگاهی برای هر سه مؤلفه‌ی سرعت جریان از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند، فقط در محدوده‌ی قرارگیری آبشکن، به دلایلی که ذکر شد، از میزان تطابق داده‌های عددی و آزمایشگاهی کاسته شده، اما روند تغییرات سرعت‌های سه بعدی جریان کاملاً باهم تطابق دارند. میزان متوسط خطای اندازه‌گیری شده برای سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی در مقطع طولی به ترتیب برابر با ۷، ۱۱ و ۱۰ درصد می‌باشد که این مقادیر خطا قابل قبولند.



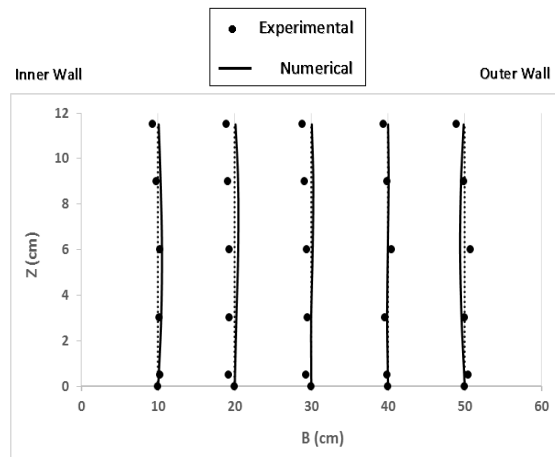
(الف)



(الف)



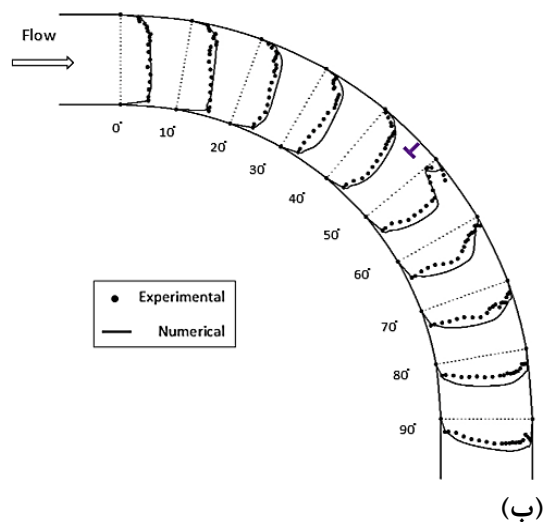
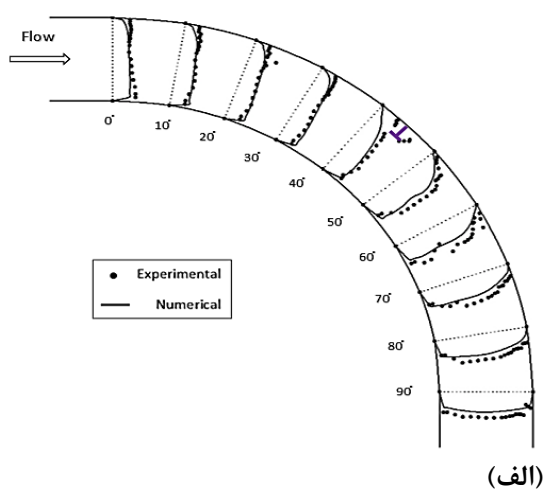
(ب)



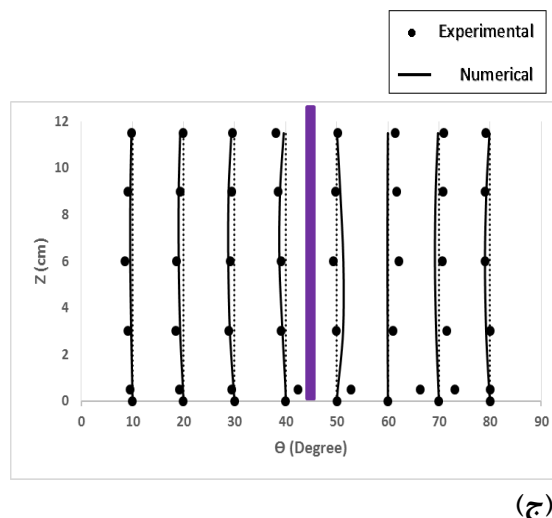
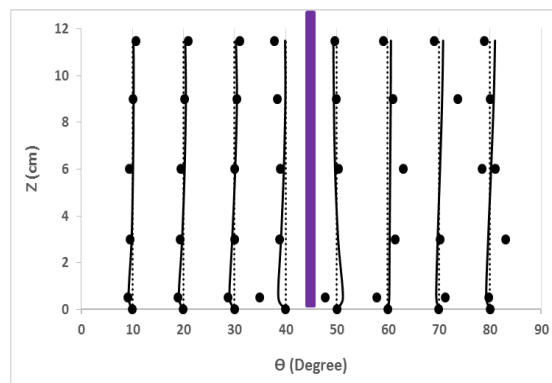
(ج)

شکل ۸- مقایسه‌ی سرعت‌های عمقی در مقاطع عرضی مختلف دور و نزدیک به آبشکن T شکل، الف) ۳۰ درجه، ب) ۴۵/۵ درجه و ج) ۹۰ درجه.  $10 \text{ cm/s}$

آبشکن و پایین دست آن، از میزان تطابق داده‌های عددی و آزمایشگاهی کاسته شده، که این امر را می‌توان به لحظه‌ای بودن اندازه‌گیری سرعت جریان در شرایط آزمایشگاهی در برابر ارائه‌ی سرعت‌های متوسط جریان در شبیه عددی، و همچنین عدم امکان تنظیم دقیق و میلی‌متری دستگاه سرعت‌سنج برای برداشتن داده‌ها در راستای عمقی در محدوده‌ی اطراف آبشکن در شرایط آزمایشگاهی نسبت داد. میزان متوسط خطای مربوط به سرعت برآیند جریان در شبیه عددی نسبت به شبیه آزمایشگاهی در مقطع ۵ درصد عمق جریان از کف و سطح آب به ترتیب برابر با ۶ و ۹ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه سرعت برآیند جریان در نزدیکی بستر و سطح آب، الف) در فاصله ۵ درصدی عمق جریان از بستر، ب) در فاصله ۵ درصدی عمق جریان از سطح آب.  $100 \text{ cm/s}$



شکل ۹- مقایسه‌ی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در مقطع طولی در فاصله ۶ درصدی عرض نهر از ساحل خارجی: الف) سرعت طولی ( $150 \text{ cm/s}$ )، ب) سرعت عرضی ( $60 \text{ cm/s}$ ) و ج) سرعت عمقی ( $15 \text{ cm/s}$ )

مقایسه‌ی توزیع سرعت برآیند جریان در وضعیت افقی

در شکل ۱۰، توزیع سرعت برآیند جریان در دو مسطحه‌ی مختلف در فواصل ۵ درصد عمق جریان از کف، و همچنین ۵ درصد عمق جریان از سطح آب به صورت عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب، ملاحظه می‌شود، در لایه‌ی نزدیک به کف نسبت به لایه بالایی، داده‌های عددی و آزمایشگاهی از نزدیکی بیشتر برخوردارند. بطور کلی، در هر دو لایه، در اکثر مقاطع، و به خصوص در مقاطع قبل از آبشکن، تطابق بسیار مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی وجود دارد، اما در محدوده‌ی اطراف

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌آزمایشگاهی (نهر قوسی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس) و شبیه‌عددی Flow-3D به بررسی و مقایسه‌ی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان پیرامون آبشکن T شکل غیرمستغرق و مستقر در قوس ۹۰ درجه با عدد فرود ۰/۳۴ در بستر صلب پرداخته شد. بدین منظور، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در مقاطع مختلف طولی، عرضی و مسطحه مقایسه، و مقدار خطای متوسط در حالات مختلف ارائه گردید.

نتایج بررسی‌های انجام‌شده بیانگر این است که بیشترین مقدار خطای مشاهده‌شده مربوط به داده‌های سرعت عمقی جریان در مقطع عرضی و پیرامون آبشکن و با متوسط خطای ۱۷ درصد می‌باشد. همچنین، مقادیر خطای متوسط اندازه‌گیری شده مربوط به سرعت‌های طولی و عرضی جریان نیز به ترتیب برابر با ۶ و ۱۰ درصد است، درحالی‌که خطای متوسط اندازه‌گیری شده برای مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی جریان در مقطع طولی (به فاصله‌ی ۶ درصد عرض نهر از ساحل خارجی) به ترتیب برابر با ۷، ۱۱ و ۱۰ درصد می‌باشند، که این مقادیر خطا قابل‌قبول می‌باشند. لحظه‌ای بودن اندازه‌گیری سرعت جریان در شرایط آزمایشگاهی در برابر ارائه سرعت‌های متوسط جریان در شبیه‌عددی، مشکلات اجرایی برداشت داده‌های سرعت در محدوده اطراف آبشکن در شرایط آزمایشگاهی، متفاوت بودن نحوه شبیه‌سازی نوک بال آبشکن در شبیه‌عددی و آزمایشگاهی، ساده‌سازیهای صورت گرفته در معادلات حاکم بر شبیه‌عددی و عدم امکان تنظیم دقیق و میلی‌متری دستگاه سرعت‌سنج برای برداشت داده‌ها در راستای عمقی را می‌توان از عوامل موثر در ایجاد تفاوت‌های به وجود آمده در شبیه‌آزمایشگاهی و عددی برشمرد.

بطور کلی، نتایج به دست آمده حاصل از مقایسه‌های عددی و آزمایشگاهی، بیانگر تطابق مناسب بین شبیه‌عددی و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد و این به معنای توانایی بالای نرم‌افزار Flow-3D در شبیه‌سازی الگوی

جریان پیرامون سازه‌های آبی مستقر در قوس رودخانه نظیر آبشکن است.

## منابع

۱. شریفی منش، ح. ۱۳۷۴. بررسی و مقایسه میزان آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز با استفاده از شبیه‌آبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.
۲. واقفی، م. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌های T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس.
۳. واقفی، م، ک. بیروتی، و م. اکبری. ۱۳۹۲. مطالعه عددی اثر طول جان آبشکن سرسپری مستقر در مسیر مستقیم با بستر صلب بر الگوی جریان. دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.
۴. واقفی، م، و پ. رادان. ۱۳۹۳. مطالعه عددی آبشستگی و الگوی جریان در نهر قوسی ۹۰ درجه با وجود آبشکن T شکل با تغییر در شعاع انحنای قوس. مجله علمی پژوهشی مهندسی منابع آب. ۷(۲۳): ۳۷-۵۱.
۵. واقفی، م، ه. زره پوش شیرازی، و م. اکبری. ۱۳۹۳. مطالعه عددی تأثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان پیرامون آبشکن سرسپری مستغرق. مجله علمی پژوهشی آبیاری و آب. ۵(۱۸): ۱۴۵-۱۵۶.
۶. واقفی، م، م. قدسیان، ب. سلیمانی، و م. اکبری. ۱۳۹۳. بررسی عددی تأثیر شعاع انحنای قوس بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب. مجله علمی پژوهشی مهندسی منابع آب. ۷(۲۲): ۵۱-۶۲.
۷. واقفی، م، م. قدسیان، و س.ع.ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه. مجله علمی پژوهشی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۶(۲): ۱۰۵-۱۲۹.

8. Acharya, A., A. Acharya and J. G. Duan. 2013. Three dimensional

- structures. *J. Hydraul. Eng.* 131: 1074-1087.
19. Naji Abhari, M. N., M. Ghodsian, M. Vaghefi and N. Panahpur. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90 bend. *Flow Measur and Instrument.* 21: 292-298.
  20. Nortek Vectrino Velocimeter User Guide. 2004. Nortek, USA.
  21. Perzedwojski, B., R. Blazejewski, and K.W. Pilarczyk. 1995. River training techniques: Fundamental, design and Application. A. A. Balkema. Rotterdam, the Netherlands.
  22. Soliman, M. M., K. M. Attia, T. A. M. Kotb and A. F. Ahmed. 1997. Spur dike effects on the River Nile morphology after High Aswan Dam. *Congr. Int. Associ Hydraul. Res.* 120: 125-146.
  23. Tingsanchali, T., and S. Maheswaran, 1990. 2-D depth averaged flow computation near groyne. *J Hydraul. Eng.* 116: 71-86.
  24. Vaghefi, M., M. Ghodsian, and A. Adib. 2012. Experimental study on the effect of Froude number on temporal variation of scour around a T-shaped spur dike in a 90 degree bend. *Appl. Mech. Mater.* 147: 75-79.
  25. Vaghefi, M., M. Ghodsian, and S. A. A. Salehi. 2009. Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90 degree channel bend. *Arab J. Sci Techn.* 34: 337-348.
  26. Vaghefi, M., M. Ghodsian and S. A. A. Salehi. 2012. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering.* 138(5): 471-474.
  27. Vaghefi, M., V. A. Mohsenimehr and M. Akbari. 2014. Numerical Investigation of Wing to Web Simulation of flow field around series of spur dikes. *Int. Refereed J. Eng. Sci.* 2: 36-57.
  9. Azinfar, H., and J.A. Kells. 2008. Backwater prediction due to the blockage caused by a single submerged spur dike in an open channel. *J. Hydraul. Eng.* 134: 1153-1157.
  10. Copeland, R.R. 1983. Bank protection techniques using spur dikes. Hydraulic Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiments Station Vicksburg, Mississippi.
  11. Duan, J. G., L. He, X. Fu, and Q. Wang. 2009. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. *Adv Water Resour.* 32(12): 1717-1725.
  12. Fazli, M., M. Ghodsian, and S. A. A. Salehi. 2008. Scour and flow field around a spur dike in 90 bend. *Int J. Sedim. Res.* 23: 56-68.
  13. Flow Science, Inc. 2008. FLOW-3D User's Manual. Flow Science, Inc., 9.3 editions.
  14. Ghodsian, M., and M. Vaghefi. 2009. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shaped spur dike in a 90° bend. *J. Sedim Res.* 24:145-158.
  15. Gill, M. A. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *J. Hydraul. Div.* 98: 91-98.
  16. Kassem, A., and M. H. Chaudhry. 2002. Numerical modeling of bed evolution in channel bends. *J Hydraul. Eng.* 128: 507-514.
  17. Masjedi, A., I. Akbari and H. Abyar. 2011. Evaluating scour at L-shape spur dike in a 180 degree bend. *World Appli Sci J.* 15: 1740-1745.
  18. Nagata, N., T. Hosda, and T. Nakato. 2005. Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic

- of Froude number on flow pattern around a single T-shaped spur dike in a bend channel. *Int J Eng. Res.* 3: 351-355.
30. Wu, W., W. Rodi and T. Wenka. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *J Hydraul Eng.* 126: 4-15.
31. Yazdi, J., H. Sarkardeh, H. M. Azamathulla, and A. A. Ghani. 2010. 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. *Int J River Basin Manage.* 8: 55-62.
- Length Ratios Parameter of T-shaped Spur Dike in a 90 Degree Bend on Scour Pattern. *Journal of river engineering.* 2(3): 24-32.
28. Vaghefi, M., M. Shakerdargah, and M. Akbari. 2014. Numerical study on the effect of ratio among various amounts of submersion on three dimensional velocity components around T-shaped spur dike located in a 90 degree bend. *Int J Sci Engi. Technol.* 3: 675-679.
29. Vaghefi, M., M. Shakerdargah, A. R. Fiouz, and M. Akbari. 2014. Numerical investigation of the effect

