

## شبیه‌سازی عددی توپوگرافی بستر و میدان جریان در اطراف موانع شمع‌های دو ردیفه متوالی

### و زیگزایی در کانال مستقیم با بستر متحرک با نرم‌افزار SSIM

عماد کهریزی<sup>۱\*</sup>، مجید فضلی<sup>۲</sup> و سحر انصاری<sup>۳</sup>

(۱) دانشجوی دکتری آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه قم، ایران.

(۲) استادیار گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

(۳) کارشناس ارشد آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

\* نویسنده مسئول: e.kahrizi94@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸

#### چکیده

آبشکن‌ها یکی از رایج‌ترین سازه‌ها جهت هدایت جریان در امتداد مسیر اصلی آبراهه و حفاظت سواحل در برابر فرسایش می‌باشند. برآورد دقیق عمق آبشستگی در اطراف آبشکن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در سال‌های اخیر، بررسی‌های زیادی در زمینه آبشکن‌های باز به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته، اما بررسی آن به روش عددی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این تحقیق با استفاده از مدل عددی SSIM1.1 و مدل آشفتگی  $k - \epsilon$ ، پدیده آبشستگی و الگوی جریان سه‌بعدی اطراف آبشکن‌های باز دو ردیفه با آرایش‌های در امتداد هم و زیگزایی شبیه‌سازی شد. در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده با شرایط دبی ثابت ۲۸ لیتر بر ثانیه و رسوبات دانه‌ای، در کانالی به طول ۱۵ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. در این تحقیق تأثیر تغییر درصد بازشدگی و فاصله محور تا محور آبشکن‌ها بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی و توزیع سرعت مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سرعت جریان طولی در کناره‌های کانال، به دلیل وجود آبشکن‌ها نسبت به وسط کانال بسیار کم می‌باشد، به طوری که در کناره‌های کانال و در فضای بین آبشکن‌ها سرعت جریان تقریباً صفر است. بنابراین مدل عددی SSIM به خوبی توزیع سرعت اطراف آبشکن را به لحاظ کمی و کیفی شبیه‌سازی کرده است. با توجه به نتایج حاصله مدل عددی با کمتر از ۱۰ درصد خطا، ماکزیم عمق آبشستگی را محاسبه نمود. همچنین نتایج نشان داد که کاهش فاصله محور به محور آبشکن‌های باز دو ردیفه، توانایی و دقت مدل عددی SSIM در برآورد مقدار حداکثر عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، آبشکن، SSIM،  $k - \epsilon$  و آبشکن باز دو ردیفه.

## مقدمه

در بحث آبشکن مانند هر سازه دیگر دو بحث اصلی تامین پایداری سازه از یک طرف و بالا بردن کارایی آن‌ها وجود دارد (جعفرقلی، ۱۳۹۱). در پایداری این سازه‌ها، فرسایش و آبشستگی اطراف آبشکن‌ها یکی از مهمترین پارامترهای طراحی آن‌ها است، به طوری که بدون مبالغه، عدم توجه کافی به این مساله را می‌توان به‌عنوان یکی از مهمترین دلایل تخریب و یا پایین بودن کارایی آن‌ها دانست. از طرف دیگر، فراهم آوردن زمینه‌های مناسب برای تامین کارایی و بهره‌وری مناسب این سازه‌ها در بحث‌های رسوب‌گذاری، مدیریت عمق کانال و حفاظت از سواحل، توجه طراحان را به شناسایی عوامل دخیل در این موضوع و به‌طور خاص تاثیر ابعاد و مشخصات هندسی آبشکن‌ها معطوف نموده است (عوض‌پور و منتصری، ۱۳۹۴). برای نیل به اهداف فوق استفاده از تجربیات صحرایی، آزمایشگاهی و نیز مدل‌سازی‌های عددی، ابزارهای اصلی محققین بوده است. آنالیز اطلاعات تجربی و صحرایی، یک ابزار مهم در مطالعه هر پدیده است که یک دید کلی از رفتار سیستم را تحت شرایط مورد بررسی به محقق ارائه می‌دهد. در برابر آن مدل‌های عددی ابزاری جهت فهم فیزیک هر مساله می‌باشند. از آن‌جا که مدل‌های فیزیکی به‌دلیل پیچیدگی الگوی جریان و تاثیرات ناشی از مقیاس، به تنهایی قادر به ارائه درک روشنی از فیزیک حاکم بر مسئله نمی‌باشند، بنابراین استفاده از مدل‌های عددی در کنار مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی امری حتمی می‌باشد (عوض‌پور و منتصری، ۱۳۹۴؛ Acharya and duan, 2011). در سال‌های اخیر به‌دلیل پیشرفت تجهیزات کامپیوتری، استفاده از مدل‌های عددی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی به‌دلیل صرف زمان و هزینه کمتر و دسترسی بیشتر، گسترش یافته است (Salaheldin et al., 2004)، به طوری که Hamidi و Siadatmousavi (۲۰۱۸)، شبیه‌سازی عددی میدان جریان و آبشستگی برای چیدمان‌های متفاوت آبشکن با استفاده از مدل SSIIM را ارائه دادند. در این تحقیق عملکرد دو مدل آشفنگی  $k - \varepsilon$  و  $k - w$  در مدل‌سازی آبشکن در زوایا و فواصل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد اگرچه مدل در شبیه‌سازی عمق آبشستگی در جلوی آبشکن برای موانع متوالی عملکرد مناسبی داشته است، اما عمق آبشستگی بین موانع را بیش از حد مجاز تخمین زده است. علاوه بر این در آرایش نامنظم آبشکن‌ها، مدل عددی میزان آبشستگی در جلوی موانع را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. Hammerling و همکاران (۲۰۱۸)، مدل‌سازی توزیع سرعت و تغییرات بستر رودخانه را با استفاده از مدل SSIIM انجام دادند. هدف از این مطالعه ارزیابی خطر مربوط به آبشستگی موضعی در آستانه رودخانه وار تا<sup>۱</sup> می‌باشد. بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی حفرات آبشستگی موضعی، توزیع سرعت و تراز آب در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰، با استفاده از مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پروفیل‌های سرعت آب محاسبه شده تفاوت چندانی با پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده ندارند. حمیدی و

همکاران (۱۳۹۵) به شبیه‌سازی آبشستگی و میدان جریان در اطراف تک شمع با استفاده از نرم‌افزار SSIIM پرداختند. آن‌ها معادلات سه‌بعدی ناویر - استوکس برای جریان به همراه مدل آبشستگی  $k - \epsilon$  را حل و از خروجی‌های محاسبات جریان برای معادلات انتقال رسوب استفاده کردند. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند با دقت مناسبی جریان روبه پایین و گردابه‌های نعل اسبی را که عامل اصلی فرسایش در جلوی تک شمع است، شبیه‌سازی و محاسبه نماید. همچنین مقایسه نتایج آبشستگی مدل SSIIM با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده مقدار خطای کمتر این مدل نسبت به برخی روابط تجربی موجود برای تخمین عمق آبشستگی حداکثر است و مقدار خطای جزئی مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی، می‌تواند ناشی از تبدیل محیط پیوسته جریان به محیط گسسته (مش‌بندی) باشد. Vaghefi و همکاران (۲۰۱۶) اثر فاصله بین آبشکن‌های T شکل بر روی جریان و الگوی آبشستگی در خم ۹۰ درجه با استفاده از مدل عددی SSIIM را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده این بود که بر اساس موقعیت آبشکن‌ها و غوطه‌وری، چاله‌های آبشستگی متفاوتی روی بستر کانال شکل گرفت. برای همه مدل‌ها، ماکزیمم جریان ثانویه، در بالادست اولین آبشکن و حداکثر رسوب‌گذاری در انتهای ناحیه داخلی رخ داد. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر فاصله بین آبشکن‌ها نباید بیشتر از ۵ برابر طول آبشکن باشد و در حالت غوطه‌وری، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به مدل غیر غوطه‌ور حدود ۲۲ درصد کاهش یافت. Avazpour و Montaseri (۲۰۱۵)، شبیه‌سازی عددی الگوی جریان اطراف آبشکن‌های مستقیم با استفاده از نرم‌افزار SSIIM را انجام دادند. در این تحقیق با استفاده از SSIIM الگوی جریان آشفته در اطراف سری آبشکن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی حاکی از توانایی مدل عددی در شبیه‌سازی الگوی جریان در محدوده یک‌سری آبشکن بود. آبشکن‌هایی که تاکنون مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند عمدتاً سازه‌هایی غیرقابل نفوذ هستند. بنابراین با توجه به تعداد کم تحقیقات انجام شده در زمینه برآورد حداکثر عمق آبشستگی و توزیع سرعت در اطراف آبشکن‌های باز به‌ویژه آبشکن‌های دو ردیفه ضرورت انجام پژوهش در این زمینه را مشخص می‌کند. بنابراین در این پژوهش، آبشستگی در اطراف آبشکن‌های باز دو ردیفه زیگزاگی و در امتداد هم با زاویه ۹۰ درجه نسبت به امتداد جریان و درصد بازشدگی ۳۰ درصد، با SSIIM و استفاده از مدل آبشستگی  $k - \epsilon$  شبیه‌سازی شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی کانال مستقیم مقایسه شده است.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

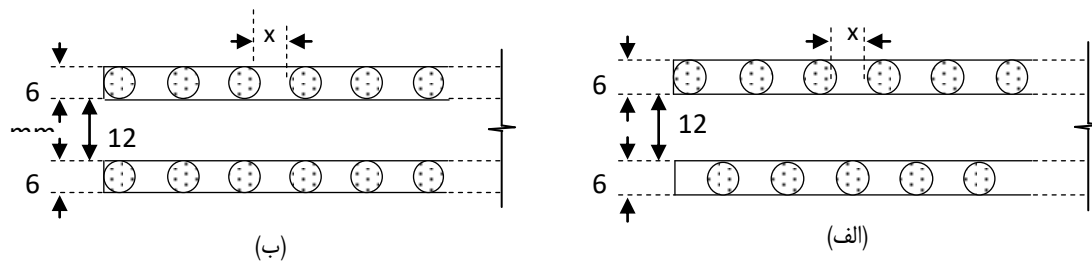
به‌منظور مطالعه و بررسی عملکرد آبشکن‌ها، از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط پزین (۱۳۹۵) که در فلوم موجود در دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا انجام شده، استفاده شده است. فلوم آزمایشگاهی مورد نظر، یک فلوم بتنی

غیرشیب‌پذیر به طول ۱۵ متر، ارتفاع و عرض  $0/6$  متر با دیواره‌های شفاف از جنس شیشه ۱۰ میلی‌متری و پمپ با ظرفیت آبدهی ۲۰-۶۰ لیتر بر ثانیه است، به طوری که الگوی جریان و نحوه شسته شدن مصالح بستر قابل رویت بود. در شکل ۱ پلان و مقطع فلوم آزمایشگاهی قابل مشاهده است. به منظور اندازه‌گیری دبی جریان یک سرریز مستطیلی لبه تیز از جنس شیشه ۱۰ میلی‌متری هم عرض کانال و به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری در انتهای کانال تعبیه شد.



شکل ۱: تصویر کانال تحقیقاتی

به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر در این تحقیق، بستر فلوم از ذرات رسوبی با اندازه  $1/55$  میلی‌متر پر شد. سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی جریان برای دبی مورد نظر با استفاده از سرعت سنج سه‌بعدی ADV و با فرکانس ۲۰ هرتز اندازه‌گیری شد. زمان نمونه‌برداری برای هر نقطه ۶۰ ثانیه بوده است. آزمایش‌ها در دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه، زمان تعادل ۹ ساعت و عمق ثابت  $14/6$  سانتی‌متر انجام شد که متناظر با عدد فرود  $0/26$  بود. برداشتها در ۴ سطح ارتفاعی در عمق-های  $0/5$  سانتی‌متر از کف،  $0/5$  سانتی‌متر از سطح آب و فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متری از بستر اولیه صورت گرفته است. پس از اتمام آزمایش، الگوی آبشستگی و رسوب‌گذاری ناشی از انتقال ذرات شسته شده در اطراف آبشکن اندازه‌گیری شده است. در تحقیق حاضر جهت انجام آزمایش‌ها از آبشکن‌های میله‌ای باز که از یک سری میله‌های آهنی به قطر ۶ میلی‌متر که در قطعات ۶۰ سانتی‌متری برش داده شده بودند، استفاده شد. آرایش میله‌ها به صورت دوردیفه زیگزگی و دو ردیفه در امتداد هم است. موانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم به این صورت بوده که میله‌ها و فواصل خالی بین آنها در دو ردیف آبشکن به نحوی قرار می‌گیرند که در یک امتداد باشند، اما در حالت زیگزگی میله‌های یک ردیف در مقابل فضای خالی ردیف دیگر قرار می‌گیرند. شکل ۲ به صورت شماتیک نحوه قرارگیری میله‌ها را در دو حالت آبشکن دو ردیفه زیگزگی و در امتداد هم نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمای شماتیک از آبشکن باز دوردیفه (الف) زیگزآگی و (ب) در امتداد هم

### مدل عددی

مدل عددی SSIIM به وسیله اولسن و همکاران (۲۰۰۲) نوشته شده است و در مهندسی رودخانه، هیدرولیک و محیط‌زیست کاربرد دارد (Olsen, 2011). مهم‌ترین عامل برتری این مدل نسبت به دیگر مدل‌های CFD موجود، قابلیت حل محاسبات انتقال رسوب در یک بستر متحرک در مدت گذشت زمان است. معادلات حاکم بر این مدل به دو بخش معادلات جریان و معادلات رسوب تقسیم می‌شود.

### معادلات مربوط به جریان

معادلات جریان در این نرم‌افزار، معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویراستوکس معروف به معادلات رینولدز است

(رابطه ۱) (Olsen, 2011):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - p \overline{U_i U_j}) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این معادلات،  $x_j$ : مکان در راستای  $z$  ام است.  $U_j$ : سرعت متوسط‌گیری شده جریان در جهت محور  $x_j$ ،  $P$ : فشار آب،  $\delta_{ij}$ : دلتای کرونکر<sup>۱</sup> و  $U_j$ : نوسانات سرعت در گام زمانی  $\delta_t$  در جهت  $x_j$  است. در معادله ناویراستوکس ترم اول سمت چپ ترم تغییرات زمانی سرعت و ترم بعدی، ترم‌های انتقالی هستند. ترم اول سمت راست، ترم فشار و ترم‌های بعدی نیز ترم‌های تنش‌های رینولدز است. رابطه تنش رینولدز برابر است با (رابطه ۲):

$$p \overline{U_i U_j} = \rho \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه  $\nu_T$ : لزجت گردابه‌ای است. در نرم‌افزار SSIIM برای محاسبه لزجت گردابه‌ای از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در این مطالعه از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استفاده شده است. در مدل SSIIM برای محاسبه سرعت در نزدیکی بستر و دیواره‌ها از قانون دیواره<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. این سرعت محاسبه شده به عنوان شرایط مرزی برای معادله

ناویراستوکس مورد استفاده قرار می‌گیرد (Olsen, 1999). رابطه سرعت در نزدیکی دیواره به صورت زیر بیان می‌شود (رابطه ۳) که در این رابطه،  $u_x$ : سرعت برشی،  $y$ : فاصله از دیواره و  $\kappa$ : ثابت ون کارمن است که برابر  $0.4$  فرض شده است:

$$\frac{u}{u_x} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{30y}{k_s} \right) \quad \text{رابطه ۳:}$$

### معادلات مربوط به رسوب

انتقال رسوب به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم‌بندی می‌شود. بار معلق با استفاده از معادله انتقال - انتشار برای غلظت رسوب  $C$  محاسبه می‌شود (رابطه ۴) (Olsen, 2011):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad \text{رابطه ۴:}$$

که  $w$ : سرعت سقوط ذرات،  $\Gamma_T$ : ضریب انتشار و  $c$ : غلظت حجمی ذرات است. در این نرم‌افزار، انتقال بار بستر به صورت پیش فرض با استفاده از فرمول ون راین تعیین می‌شود (رابطه ۵) که برابر است:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(p_s - p_w)g}{p_w}}} = \frac{0.053 \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left( \frac{(p_s - p_w)g}{p_w \theta^2} \right)^{0.1}} \quad \text{رابطه ۵:}$$

که  $q_b$ : مقدار شار انتقال رسوب بار بستر است.  $\tau$ : تنش برشی وارد بر ذرات،  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی ذرات،  $D_{50}$ : اندازه میانه دانه‌های رسوبی،  $\theta$ : ویسکوزیته سینماتیکی سیال و  $p_s$  و  $\rho$  نیز به ترتیب چگالی ذرات و چگالی آب است.

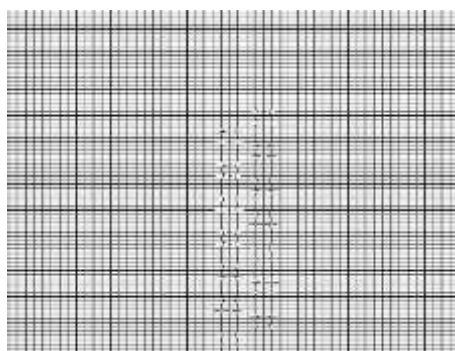
### تولید و تنظیم مش بندی میدان جریان

گام نخست در مدل‌سازی با استفاده از مدل عددی SSIIM تقسیم‌بندی ناحیه مورد نظر به شبکه یا سلول‌هایی است که معادلات دیفرانسیلی حاکم بر میدان جریان و رسوب باید برای آن‌ها حل گردد. از آنجایی که نرم‌افزار SSIIM توانایی تولید کردن شبکه‌های پیچیده را ندارد، بنابراین در این تحقیق جهت کاستن زمان و حجم محاسبات و در عین حال افزایش دقت آن، از نرم‌افزار Matlab برای ساختن هندسه کانال مورد مطالعه استفاده شد. به دلیل این که الگوی جریان در نزدیکی دیواره‌ها و محدوده آبشکن دچار تغییرات بیشتری می‌شود، بنابراین شبکه‌بندی در این ناحیه با ابعاد ریزتری صورت گرفته است. در شبکه‌بندی قائم جریان نیز سلول‌های نزدیک بستر ریزتر در نظر گرفته شده‌اند و هر چه فاصله از بستر

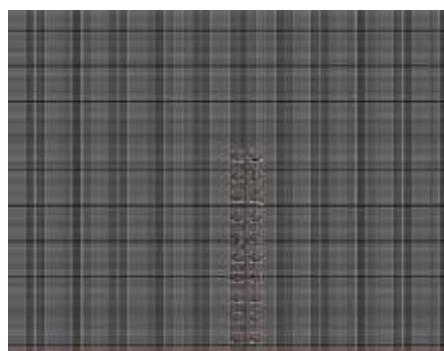
زیادتر می‌شود سلول‌های با ابعاد درشت‌تر قرار داده شده‌اند. در نهایت شبکه‌بندی با اندازه  $1000000$  سلول در جهت X و  $100000$  سلول در جهت Y و  $141$  سلول در جهت Z به‌عنوان شبکه‌بندی مناسب در نظر گرفته شد. در شکل ۳ مش‌بندی کانال و آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی و در امتداد هم ارائه شده است.



الف) مش‌بندی کانال



ج) آبشکن دو ردیفه زیگزاگی



ب) آبشکن دو ردیفه در امتداد هم

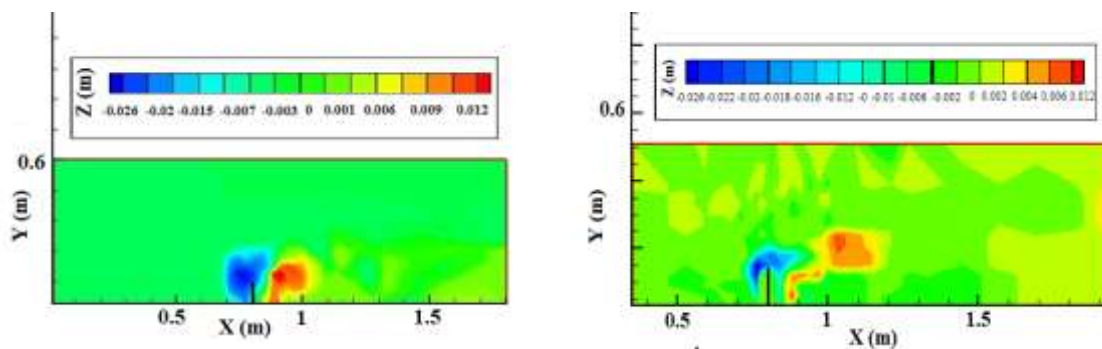
شکل ۳: مش‌بندی کانال و آبشکن در مدل عددی SSIIM

در این شبیه‌سازی، برای اعمال شرایط مرزی سرعت و آشفتگی در ورودی بالادست میدان، از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است. استفاده از شرط مرزی دیریکله به این معناست که مقادیر متغیرها در مرز معین باشد. اعمال این شرایط در مدل SSIIM، با تعیین دبی و تراز سطح آب در پایین‌دست و همچنین مشخص کردن عدد استریکلر اعمال می‌شود. همچنین در این مرز لازم است تا مقادیر پارامترهای آشفتگی نظیر انرژی جنبشی ( $k$ ) و استهلاك ( $\epsilon$ ) به مدل اعمال شود. در سطح آب نیز، شرط مرزی گرادیان صفر برای تمام متغیرها به‌جز انرژی جنبشی اعمال می‌گردد و برای پارامتر مزبور نیز در سطح آب مقدار صفر اعمال می‌شود. برای شرایط مرزی جداره، SSIIM از قانون جداره برای مرزهای زیر در سلول‌های مجاور جداره استفاده می‌شود. در مرز خروجی، برای تمام متغیرها شرط مرزی گرادیان صفر اعمال شد. با انجام مدل‌سازی لازم است برخی پارامترهای ورودی نرم‌افزار آنقدر تغییر یابند تا با نتایج آبشستگی و مولفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی کالیبره گردند. در این تحقیق مدل‌های آشفتگی  $k - \epsilon$  و  $k - \omega$  و RNG امتحان شده و در نهایت مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  به‌علت ارائه نتایج مناسب‌تر انتخاب شد. همچنین از آن جایی که مدل عددی SSIIM، خروجی نتایج

محاسبات جریان و رسوب را به صورت اعداد ارائه می‌دهد در نتیجه برای بررسی بهتر نتایج محاسبات مدل SSIIM، از TecPlot که یکی از قوی‌ترین ابزارهای رسم نمودار داده‌ها در زمینه CFD است، استفاده شده است.

### نتایج و بحث

برای رسیدن به حالت نهایی آبشستگی، محاسبات برای حدود ۱۰ ساعت انجام شد. اجرای این مدل در یک رایانه با پردازنده ۳ گیگاهرتزی در حدود ۹ تا ۱۲ روز برای هر شبیه‌سازی به طول انجامید. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب کانتورهای حداکثر عمق آبشستگی به دست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی در آبشکن‌های باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزگی با درصد بازشدگی ۳۰ درصد و فواصل محور تا محور ۲۴ میلی‌متر ارائه شده است. بر این اساس، حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده به وسیله مدل عددی در آبشکن دو ردیفه در امتداد هم برابر ۲/۶ سانتی‌متر به دست آمد که در مقایسه با نتایج به دست آمده از آزمایشگاه که برابر ۲/۹ سانتی‌متر بود، خطای ۹/۸ درصد را نشان می‌دهد. همچنین حداکثر عمق آبشستگی به دست آمده از نتایج عددی در آبشکن زیگزگی، ۳ سانتی‌متر و حداکثر عمق آبشستگی آزمایشگاهی ۳/۲۱ سانتی‌متر به دست آمده است. در جدول ۱ درصد خطای ناشی از نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ارائه گردیده است. از نتایج به دست آمده از نرم‌افزار SSIIM برداشت می‌شود که این مدل توانایی خوبی در برآورد حداکثر عمق آبشستگی در اطراف محدوده قرارگیری آبشکن را دارد و نتایج عددی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین با توجه به شکل‌های به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید که حداکثر عمق آبشستگی جریان آب در اطراف موانع به صورت موضعی در دماغه آبشکن‌ها رخ داده است و مواد فرسایش‌یافته به صورت لکه‌های آبی رنگ در پایین دست جداره کانال قرار گرفته‌اند. در حضور آبشکن قائم در مقطع نزدیک دماغه آبشکن، هم عمق حفره و هم بعد طول حفره آبشستگی بسیار زیاد است. این امر به دلیل برخورد جریان‌های قائم و عرضی گردابی در این ناحیه بوده و همچنین محل افزایش آنی سرعت طولی جریان در این ناحیه می‌باشد.

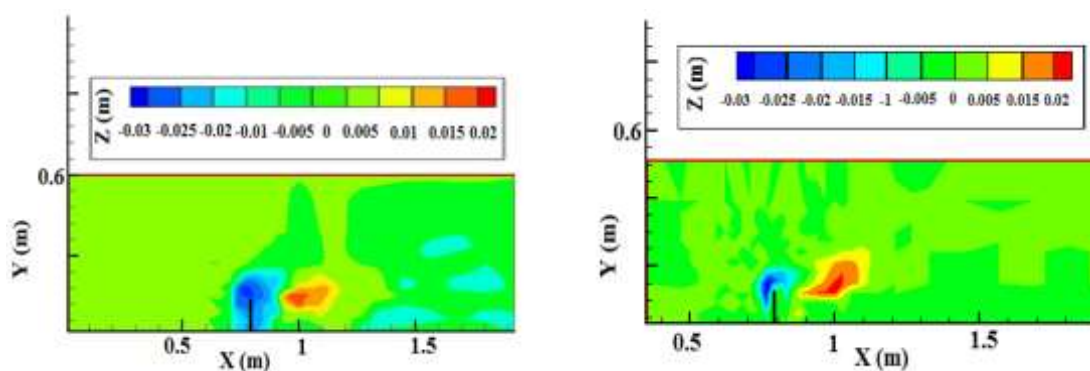


ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۴: آبشستگی بستر در آبشکن دو ردیفه در امتداد هم با بازشدگی ۳۰٪





ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

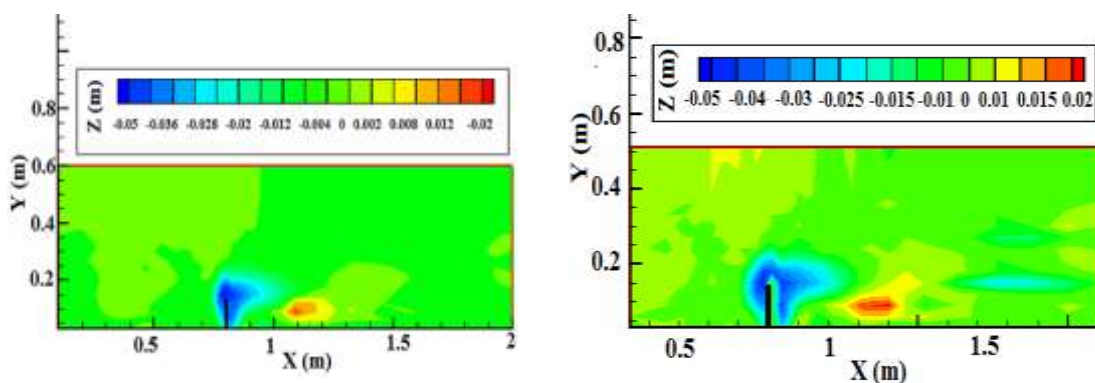
الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۵: آبستگی بستر در آبشکن دو ردیفه زیگزاگی با بازشدگی ۳۰٪

جدول ۱: مقایسه حداکثر عمق آبستگی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده توسط مدل آشفتگی  $k - \epsilon$ 

نوع آبشکن	حداکثر عمق آبستگی (cm)		
	آزمایشگاهی	شبیه‌سازی عددی	%RMSE
آبشکن میله‌ای دوردیفه در امتداد هم با ۳۰ درصد بازشدگی	۲/۹	۲/۶	۹/۸
آبشکن میله‌ای دو ردیفه زیگزاگی با ۳۰ درصد بازشدگی	۳/۲۱	۳	۶/۵

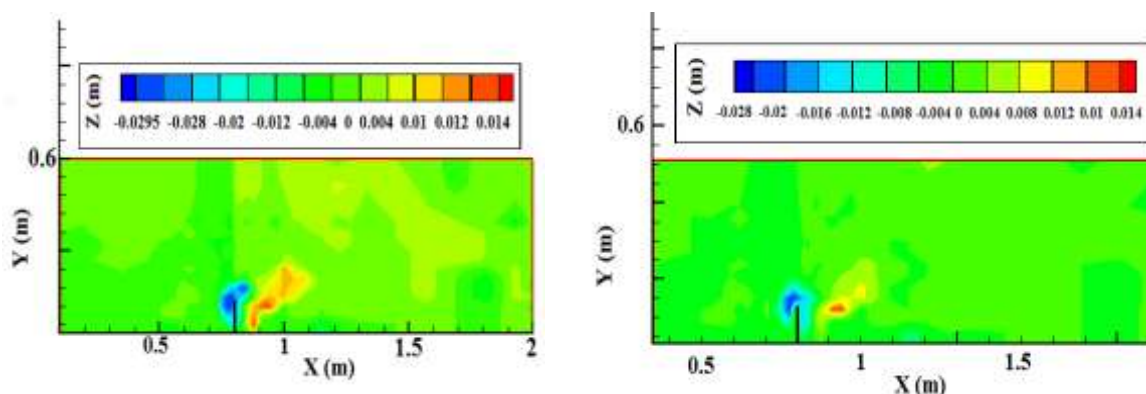
در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج آزمایشگاهی و عددی حداکثر عمق آبستگی در آبشکن‌های باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی با فاصله محور به محور ۶ میلی‌متر ارائه گردیده است. مطابق با شکل ۶ مشاهده می‌شود که حداکثر عمق آبستگی منتج از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۴ و ۵ سانتی‌متر می‌باشد که نشان دهنده این است که مدل عددی دارای خطای ۲۰ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که محدوده آبستگی اطراف آبشکن در مدل عددی به لحاظ کیفی مشابه مدل آزمایشگاهی است. در شکل ۷ نیز حداکثر عمق بستر شسته شده اطراف آبشکن زیگزاگی در شرایط آزمایشگاهی ۲/۴ سانتی‌متر و در مدل عددی ۲/۹۵ سانتی‌متر به دست آمده است که دارای ۱۸/۶ درصد خطا از مقدار آزمایشگاهی است. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در آبشکن‌های باز دو ردیفه با فواصل محور به محور ۲۴ میلی‌متری با آبشکن‌های باز دو ردیفه با فواصل ۶ میلی‌متری چنین برداشت می‌شود که مقادیر خطا در فواصل ۶ میلی‌متری حدود دو برابر مقادیر خطا در فواصل ۲۴ میلی‌متری است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار SSIM با کاهش فاصله محور به محور میله‌ها دقت کمتری در برآورد حداکثر عمق آبستگی دارد، اما در برآورد موقعیت آبستگی موضعی و رسوب‌گذاری در نواحی اطراف آبشکن به خوبی عمل کرده است و با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.



ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۶: آبشستگی بستر در آبشکن دو ردیفه در امتداد هم با بازشدگی ۳۰٪



ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۷: آبشستگی بستر در آبشکن دو ردیفه زیگزگی با بازشدگی ۳۰٪

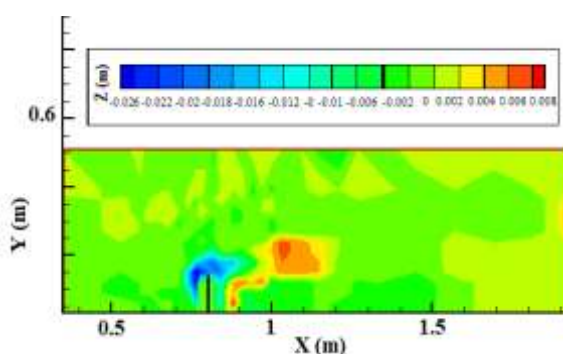
### واسنجی مدل عددی SSIM در درصد بازشدگی‌های متفاوت

به منظور واسنجی مدل عددی و نشان دادن این موضوع که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به واقعیت نزدیک هستند، آبشستگی در اطراف آبشکن‌های باز دو ردیفه با میزان بازشدگی ۴۰ درصد که فاقد نتایج آزمایشگاهی بود مطابق شکل ۸-ج شبیه‌سازی شد و سپس با نتایج آزمایشگاهی با درصد بازشدگی ۳۰ و ۵۰ درصد که در شکل ۸-الف و ب نشان داده شده مقایسه شدند تا بررسی شود که آیا نتایج عددی بازشدگی ۴۰ درصد، بین نتایج آزمایشگاهی با درصد باز شدگی ۳۰ و ۵۰ درصد قرار می‌گیرد یا خیر. مطابق با شکل‌ها، حداکثر عمق آبشستگی حاصله از نتایج آزمایشگاهی با ۳۰ درصد بازشدگی مقدار ۲/۹ سانتی‌متر و در درصد بازشدگی ۵۰ درصد، مقدار ۲/۲ سانتی‌متر به دست آمده است. هم‌چنین حداکثر عمق آبشستگی به دست آمده از مدل عددی در باز شدگی ۴۰ درصد، مقدار ۲/۵۳ سانتی‌متر ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود حداکثر عمق آبشستگی به دست آمده در درصد باز شدگی ۴۰ درصد، کمتر از باز شدگی ۳۰ درصد و بیشتر از باز شدگی ۵۰ درصد می‌باشد و به عبارت دیگر حداکثر عمق آبشستگی در درصد باز شدگی ۴۰ درصد

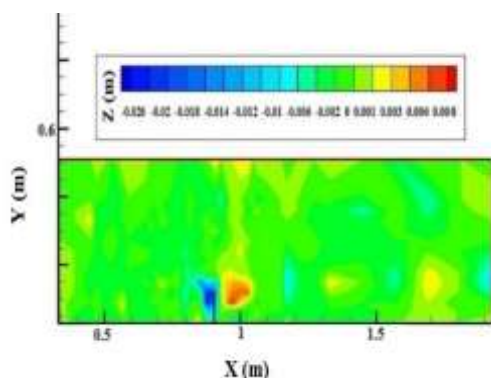
مدل عددی، بین درصد باز شدگی‌های ۳۰ و ۵۰ درصد نتایج آزمایشگاهی است. این موضوع در مورد آبشکن زیگزاگی نیز صدق می‌کند.

جدول ۲: مقادیر حداکثر عمق آبشستگی در آبشکن دو ردیفه در امتداد هم

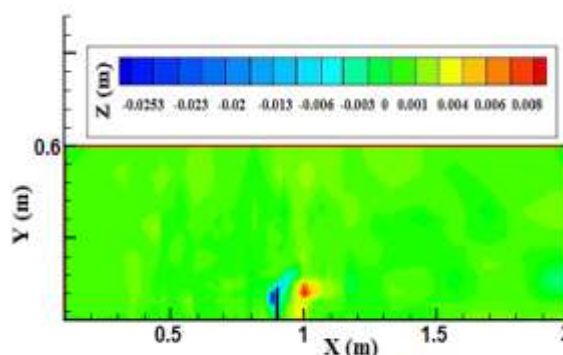
درصد باز شدگی	حداکثر عمق آبشستگی نتایج آزمایشگاهی (cm)	حداکثر عمق آبشستگی نتایج عددی (cm)
۳۰	۲/۶	۲/۹
۴۰	۲/۵۳	
۵۰		۲/۲



الف) نتایج آزمایشگاهی با درصد باز شدگی ۳۰ درصد



ج) نتایج آزمایشگاهی با درصد باز شدگی ۵۰ درصد

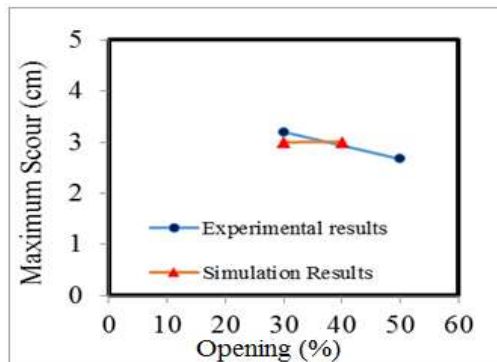


ب) نتایج عددی با درصد باز شدگی ۴۰ درصد

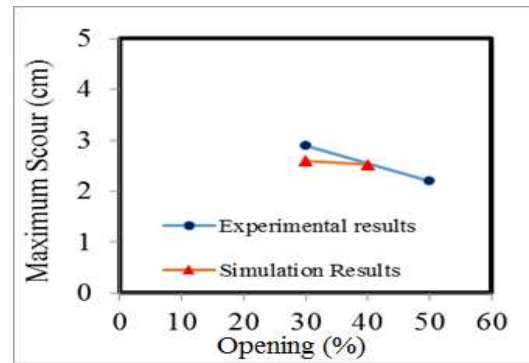
شکل ۸: مقایسه حداکثر عمق آبشستگی بستر آبشکن دو ردیفه در امتداد هم با فاصله ۲۴ میلی‌متر

در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب قرارگیری نتایج مدل عددی با درصد باز شدگی ۴۰ درصد در بین نتایج آزمایشگاهی ۳۰ و ۵۰ درصد برای هر دو آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده و صحت‌سنجی انجام شده، نتایج حاصله نشان می‌دهد که نرم‌افزار SSIIM توانایی خوبی در مدل کردن آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز میله‌ای دو ردیفه دارد، به طوری که این مدل عددی، تغییرات بستر کانال را در زمان تعادل آزمایش در حد

مطلوبی تخمین می‌زند و الگوی کلی شکل‌گیری نواحی رسوب‌گذاری و فرسایش را در بستر نشان می‌دهد و نتایج قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد.



ب) آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی



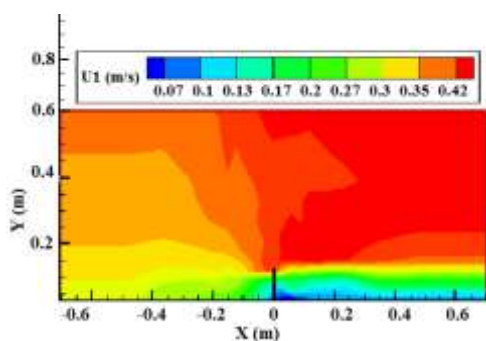
الف) آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم

شکل ۹: اعتبار سنجی مدل عددی SSIIM در درصد بازشدگی‌های فاقد نتایج آزمایشگاهی

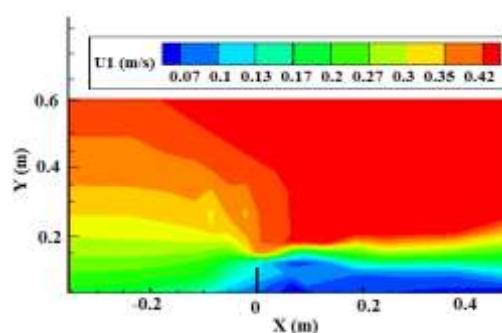
## مقایسه الگوی جریان

### بررسی تغییرات سرعت طولی در اطراف آبشکن

آبشکن‌ها با کاهش مقطع رودخانه، الگوی جریان را به‌طور محسوسی تحت تاثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک شدن به آبشکن آرایش خود را تغییر داده و به تبعیت از ساختار هندسی و نوع سازه، الگوهای متفاوتی از جریان پدیدار می‌شود. ایجاد فرسایش در دماغه آبشکن و همچنین رسوب‌گذاری در پایین‌دست آبشکن از نوع و الگوی جریان پیروی می‌کنند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای سرعت طولی شبیه‌سازی شده با مدل عددی SSIIM در آبشکن‌های باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی در مقطع ۱۰ سانتی‌متری از کف، با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است که در این شکل‌ها  $X_1$  بیانگر محور X یا طول کانال،  $X_2$  بیانگر محور Y یا عرض کانال و  $X_3$  بیانگر محور Z یا ارتفاع کانال است. مطابق با شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی، توزیع سرعت در اطراف آبشکن را به خوبی نشان داده‌اند، به طوری که در هر دو روش، سرعت در نزدیکی دیواره بسیار کم و با نزدیک شدن به انتهای آبشکن سرعت با افزایش جزیی همراه است و بعد از آن سرعت، به میزان قابل توجهی زیاد شده و این افزایش در امتداد عرض کانال هم به همان صورت ادامه می‌یابد. در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که قبل از آبشکن، سرعت طولی افزایش و در محل آبشکن، سرعت کاهش پیدا می‌کند. بنابراین مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتیجه‌گیری می‌شود که نتایج به‌دست آمده از روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انطباق کاملاً خوبی با یکدیگر دارند و مدل عددی SSIIM به خوبی توزیع سرعت طولی اطراف آبشکن را به لحاظ کمی و کیفی شبیه‌سازی کرده است.

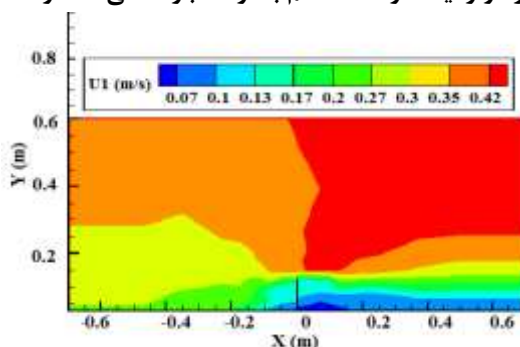


ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

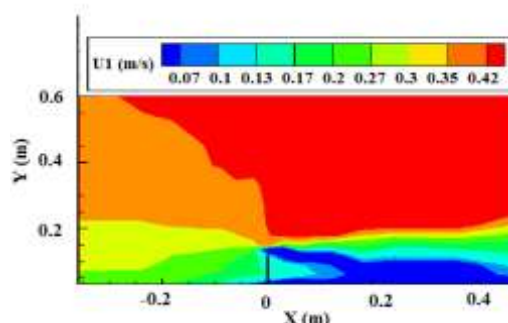


الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۱۰: بررسی تغییرات سرعت طولی در اطراف آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم با درصد بازشدگی ۳۰ درصد



ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

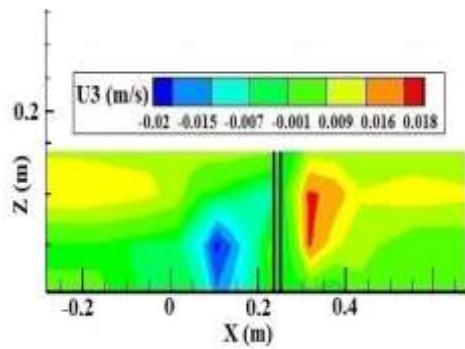


الف) نتایج آزمایشگاهی

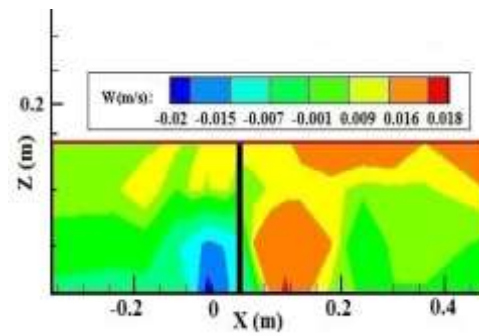
شکل ۱۱: بررسی تغییرات سرعت طولی در اطراف آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی هم با درصد بازشدگی ۳۰ درصد

### بررسی تغییرات سرعت قائم در اطراف آبشکن

در اثر احداث سازه‌هایی نظیر آبشکن در مقابل جریان، اختلافی در فشار هیدرواستاتیکی در بالادست و پایین‌دست سازه به وجود می‌آید که این مسئله باعث ایجاد جریان متلاطم چرخشی و گردابی در اطراف آن خواهد گردید. این جریان‌های گردابی عامل اصلی آبشستگی موضعی به حساب می‌آیند که در دراز مدت باعث ایجاد حفره‌های بزرگ در محل دماغه آبشکن و یا پایه پل شده و احتمال تخریب سازه را به دنبال خواهد داشت. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ سرعت قائم در دماغه آبشکن‌های باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است سرعت قائم جریان در نزدیکی آبشکن یعنی مقطع بعد از آبشکن به دلیل برخورد جریان با آبشکن و ایجاد جریان‌های ثانویه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که قبل از آبشکن، سرعت قائم بسیار کم و با نزدیک شدن به محل آبشکن، سرعت افزایش پیدا می‌کند و در مقطع بعد از آبشکن به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از اشکال چنین برداشت می‌شود که نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی هماهنگی معقولی دارد و مدل عددی SSIM به لحاظ کیفی، دقت خوبی در تخمین محل حداکثر سرعت قائم را دارد.

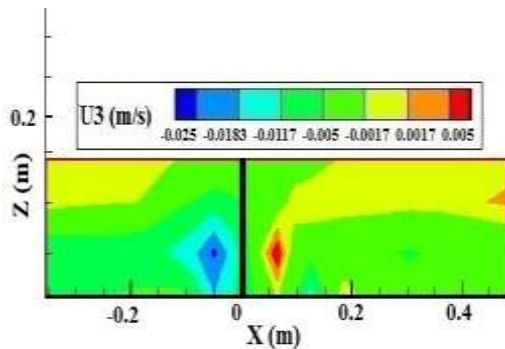


(ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

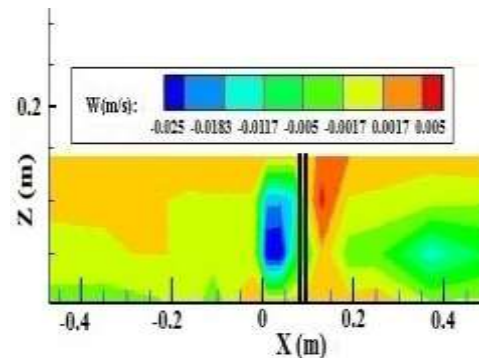


(الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۱۲: مقایسه سرعت قائم در اطراف آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم



(ب) نتایج شبیه‌سازی عددی



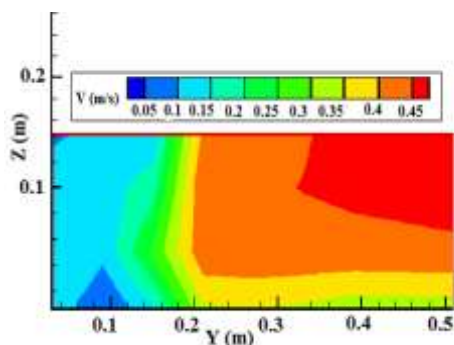
(الف) نتایج آزمایشگاهی

شکل ۱۳: مقایسه سرعت قائم در اطراف آبشکن باز دو ردیفه زیگزایی

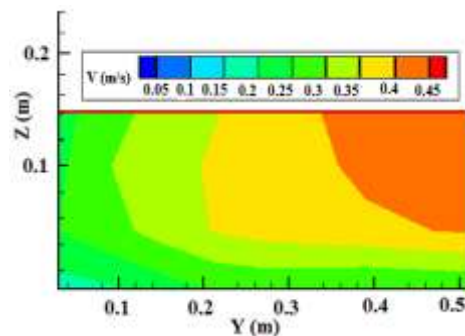
### بررسی تغییرات سرعت عرضی در مقاطع عرضی اطراف آبشکن

از آن‌جا که به دلیل حضور هر مانعی در مسیر جریان الگوی جریان دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌شود در نتیجه جریان‌های ثانویه‌ای شکل می‌گیرد که این جریان‌ها در مقاطع عرضی مشاهده می‌شوند. بنابراین در این قسمت، بررسی و مقایسه سرعت‌های عرضی در مقاطع ۲۰ سانتی‌متری قبل و بعد از آبشکن‌های با درصد باز شدگی ۳۰ درصد صورت گرفته است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب، توزیع سرعت عرضی منتج از کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به وسیله مدل عددی SSIIM در آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم را نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصاویر مشخص است سرعت عرضی جریان منتج از نتایج آزمایشگاهی قبل از آبشکن، کم و در مقطع ۲۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن افزایش یافته است. این موضوع در نتایج شبیه‌سازی عددی نیز مشابه است. مولفه عرضی سرعت در محدوده پشت آبشکن با تاثیرگذاری کمتری است. ناحیه قبل آبشکن دارای جریان انحرافی به سمت میانه کانال و جریان بعد از آبشکن به صورت جزئی به سمت دیواره مجاور منحرف شده است. همچنین در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی سرعت عرضی جریان در اطراف

آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی ارائه شده است. مطابق با شکل، سرعت در مقطع قبل از آبشکن در هر دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، بسیار کم و در مقطع بعد از آبشکن افزایش یافته و به سمت میانه کانال و دیواره مجاور گسترش یافته است.

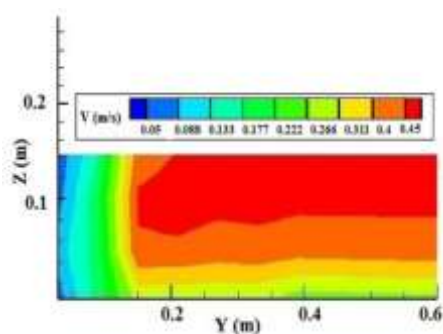


(ب) مقطع ۲۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن

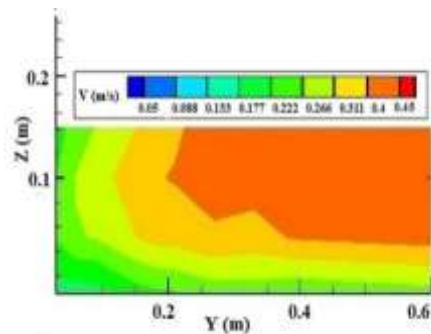


(الف) مقطع ۲۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

شکل ۱۴: نتایج آزمایشگاهی سرعت عرضی در آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم

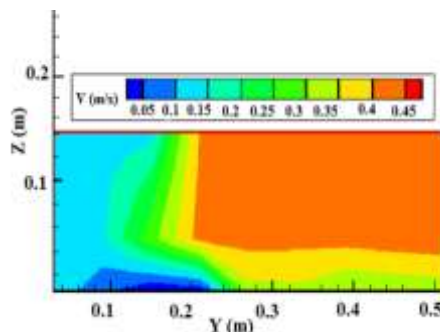


(ب) مقطع ۲۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن

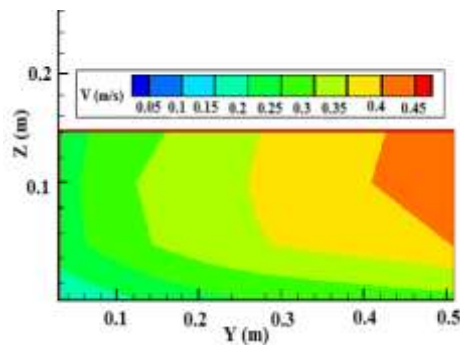


(الف) مقطع ۲۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

شکل ۱۵: نتایج شبیه‌سازی عددی سرعت عرضی در آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم

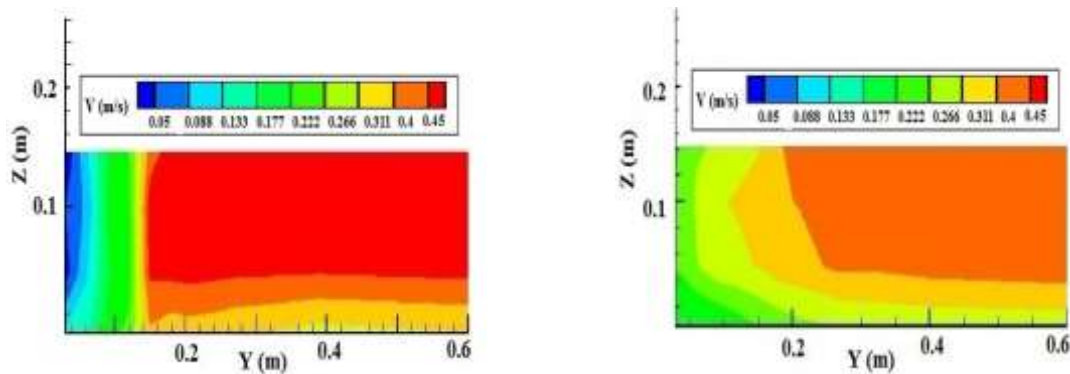


(ب) مقطع ۲۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن



(الف) مقطع ۲۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

شکل ۱۶: نتایج آزمایشگاهی سرعت عرضی در آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی



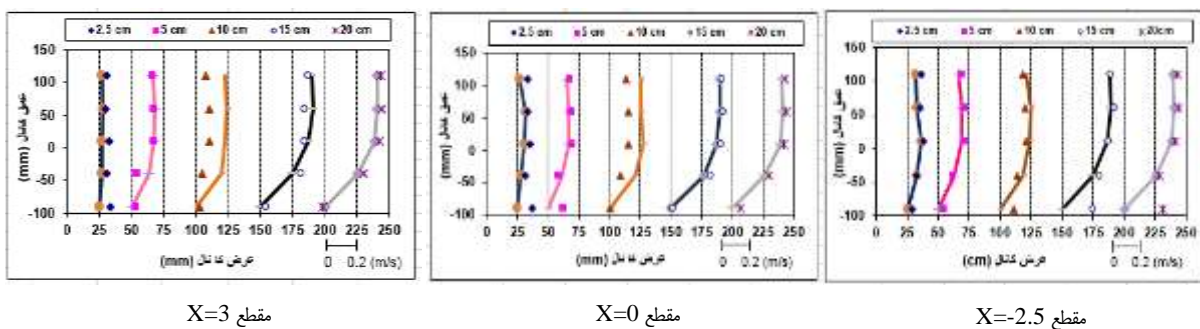
ب) مقطع ۲۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن

الف) مقطع ۲۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

شکل ۱۷: نتایج شبیه‌سازی عددی سرعت عرضی در آبشکن باز دو ردیفه زیگزگی

### پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف عرضی و قائم

در این قسمت، بررسی پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف عرضی و قائم نشان داده شده است. این اشکال در مقاطع قبل، در محل نصب آبشکن و بعد از آبشکن برای عرض‌های مختلف ترسیم شده است که نتایج آزمایشگاهی به صورت گسسته و نتایج عددی به صورت پیوسته در نمودار مشخص شده است. مطابق با شکل‌های ۱۸ و ۱۹ چنین برداشت می‌شود که در نزدیکی جداره از محلی که آبشکن وجود دارد سرعت کم است و با فاصله گرفتن از آبشکن سرعت زیاد می‌شود. در واقع سرعت در مقطع قبل از آبشکن بیشتر از مقطع بعد از آبشکن می‌باشد، پس می‌توان این‌گونه برداشت کرد که در مقطع قبل از آبشکن که هنوز حضور آبشکن احساس نشده سرعت بیشتر است اما در مقطع بعد از آبشکن به دلیل حضور مانع، سرعت کم می‌شود. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان‌گر این است که پروفیل‌های سرعت به خوبی شبیه‌سازی شده و نتایج به نتایج آزمایشگاهی مشابه است.



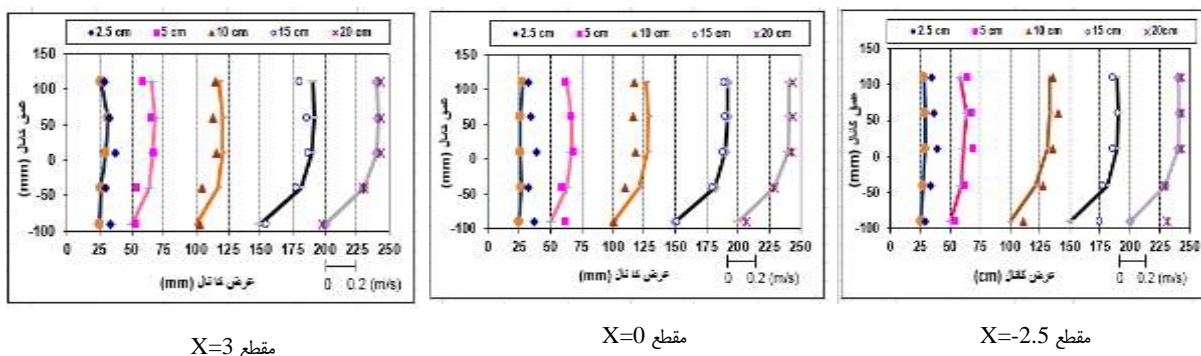
مقطع X=3

مقطع X=0

مقطع X=-2.5

شکل ۱۸: پروفیل‌های سرعت به دست آمده از نتایج در مقاطع مختلف آبشکن باز دو ردیفه در امتداد هم





شکل ۱۹: پروفیل‌های سرعت به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی در مقاطع مختلف آبشکن باز دو ردیفه زیگزاگی

### نتیجه‌گیری

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده از مدل برمی‌آید، مدل SSIIM توانایی شبیه‌سازی آبشستگی موضعی حول آبشکن و مدل کردن جریان را با تقریب خوبی به شرط انتخاب صحیح ابعاد شبکه دارد. حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده به وسیله مدل عددی در آبشکن دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی به ترتیب برابر  $2/6$  و  $3$  سانتی‌متر به دست آمد که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی که به ترتیب ذکر شده برابر  $2/9$  و  $3/21$  سانتی‌متر بود، خطای  $9/8$  و  $6/5$  درصد را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقادیر درصد خطا در برآورد حداکثر عمق آبشستگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی در مدل عددی SSIIM کمتر از  $10$  درصد است که نشان می‌دهد شبیه‌سازی عددی در برآورد موقعیت و مقدار آبشستگی یعنی به لحاظ کمی و کیفی به خوبی عمل نموده است. هم‌چنین چنین برداشت شد که حداکثر عمق آبشستگی در اطراف موانع به صورت موضعی در دماغه آبشکن‌ها رخ داده است و مواد فرسایش یافته در پایین دست جداره کانال قرار گرفته‌اند و در حضور آبشکن در مقطع نزدیک دماغه آبشکن، هم عمق حفره و هم بعد طول حفره آبشستگی بسیار زیاد است. این امر به دلیل برخورد جریان‌های قائم و عرضی گردابی در این ناحیه بوده و هم‌چنین محل افزایش آبی سرعت طولی جریان در این ناحیه می‌باشد. با کاهش فاصله محور به محور آبشکن‌های دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی از  $24$  به  $6$  میلی‌متر، مقادیر خطا در برآورد حداکثر عمق آبشستگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی به ترتیب  $20$  و  $18/6$  به دست آمد که دو برابر مقادیر خطا در آبشکن‌های با فاصله محور به محور  $24$  میلی‌متر بود. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار SSIIM با کاهش فاصله محور به محور میله‌ها دقت کمتری در برآورد حداکثر عمق آبشستگی دارد، اما در برآورد موقعیت آبشستگی موضعی و رسوب‌گذاری در نواحی اطراف آبشکن به خوبی عمل کرده است و با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. در نهایت مقایسه شکل‌های دو آبشکن در امتداد هم و زیگزاگی نشان داد که سرعت در هر دو آبشکن تا حد زیادی مشابه با هم می-

باشد و اندکی سرعت در مانع در امتداد هم به دلیل نحوه قرارگیری میله‌ها بیشتر است؛ زیرا در آبشکن زیگزاگی استهلاک انرژی جریان در اثر برخورد با آبشکن‌ها زیاد و گردابه‌ها و سرعت عرضی جریان کمتر می‌باشد.

### منابع

- پزین، ص، ۱۳۹۵. مقایسه آزمایشگاهی تاثیر شمع‌های دو ردیفه زیگزاگی و در امتداد هم بر الگوی جریان و توپوگرافی بستر در کانال مستقیم با بستر متحرک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.
- جعفرقلی، ل، ۱۳۹۱. شبیه‌سازی آبشستگی پای پل در حالت تجمع شاخ و برگ درختان به کمک مدل SSIIM. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- حمیدی، ا، نوری، ح، و هاشمی، ع، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی آبشستگی و میدان جریان در اطراف تک‌شمع با استفاده از مدل عددی SSIIM. مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۲(۴): ۳۳۳-۳۴۵.
- عوض پور، ف، و منتصری، ح، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان اطراف سری آبشکن‌های مستقیم با استفاده از مدل عددی SSIIM. چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین، یاسوج، ایران.

**Acharya, A. and Duan, J.G. 2011.** Three Dimensional Simulation of Flow Field around Series of Spure Dikes. ASCE. Conf. Proc., Word Environmental and Water Resources Congress.

**Avaz Pour, F. and Montaseri, H. 2015.** Numerical simulation of the flow pattern around the series of direct groins using the SSIIM numerical model. Fourth National Conference on Materials and Structures, Yasuj, Iran.

**Hamidi, A. and Siadatmousavi, M. 2018.** Numerical simulation of scour and flow field for different arrangements of two piers using SSIIM model. Ain Shams Engineering Journal, 9 (1): 2415–2426.

**Hammerling, M., Walczak, N. and Niec, J. 2018.** The Influence of the Selected Turbulence Model and Grid Density Degree on the Results of Velocity Distribution Obtained with the Use of the Simulation Program SSIIM. Journal of Ecological Engineering, 19 (3): 106–114.

**Olsen, N. 1999.** Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering (Book). class notes, Division of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.

**Olsen, N. 2011.** A Three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intaks with multiblock option (Book). Department of Hydraulic and environmental Engineering, The Norwegian university of science and technology.

---

**Salaheldin, T.M., Imran, J. and Chaudhry, M. H. 2004.** Numerical Modeling of Three Dimensional Flow Field Around Circular Piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 130 (2): 91-100.

**Vaghefi, M., Safarpour, Y. and Hashemi S. Sh. 2016.** Effects of distance between the T-shaped spur dikes on flow and scour patterns in 90 bend using the SSIIM model. *Ain Shams Engineering Journal*, 7 (1): 31-45.

## Numerical simulation of bed topography and flow pattern around barriers with two tandem and two alternate rows of bars in straight channel with movable bed using SSIIM

E. Kahrizi<sup>\*1</sup>, M. Fazli<sup>2</sup> and S. Ansary<sup>3</sup>

1) PhD student, Civil Engineer and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Qom University of Iran.

2) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

3) Master of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\*Correspondence author: e.kahrizi94@basu.ac.ir

Received Date: 2018.06.18

Accepted Date: 2020.02.07

### Abstract

Groins are one of the most common structures for conducting flow along the main route of the waterway and protecting the coast against erosion. The accurate estimation of the depth of scour around the groins is of great importance. In recent years, many studies have been carried out on open groins in laboratory, but less attention has been paid to numerical methods. Therefore, in this research, by using the SSIIM1.1 numerical model and the  $k-\epsilon$  disturbance model, the scouring phenomenon and the three-dimensional flow pattern around the open two-row spillways were simulated with zigzagging and zigzagging patterns. In this research, laboratory data was used with a discharge rate of 28 lit/s and sediment, in a channel of 15 meters in length and 60 cm wide. In this research, the effect of changing the opening percentage and distance on the maximum scour depth and velocity distribution has been investigated. Comparing the results of the numerical model with the experimental results shows that the longitudinal flow velocity at the channel edges is very low due to the presence of groins in the middle of the channel, so that the flow velocity is almost zero at the channel edges and in the space between the groin gaps. Therefore, the numerical model of SSIIM simulates quantitatively and qualitatively the velocity distribution around the groins. According to the results, a numerical model with less than 10% error has calculated the maximum scour depth. Also, the results showed that the reduction of the distance between the axis of the two-row open groin reduces the ability and accuracy of the SSIIM numerical model to estimate the maximum amount of scour depth.

**Keywords:** Scouring, Groin, SSIIM,  $k - \epsilon$  and Double row open groin.