

## مدل‌سازی عددی آب‌شستگی در محل تنگ‌شدگی آبراهه‌ها با استفاده از مدل SSIIM

سهیل عباسی<sup>۱\*</sup>، حسین صمدی بروجنی<sup>۲</sup>، جواد غفاری گوشه<sup>۳</sup> و مرجان پارس‌مهر<sup>۴</sup>

### چکیده

از جمله پدیده‌های مهم در رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی، آب‌شستگی در محل‌های تنگ‌شدگی است. در این پژوهش از مدل کامپیوتری SSIIM برای پیش‌بینی میزان آب‌شستگی در دو حالت تدریجی با زاویه تبدیل ۵۰ درجه و تبدیل ناگهانی در آبراهه‌ها و برای واسنجی مدل SSIIM از نتایج اندازه‌گیری در فلوم آزمایشگاهی واقع در دانشگاه شهرکرد استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل عددی به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی میزان آب‌شستگی، الگوی آب‌شستگی و جریان‌های چرخشی بوده است. خطای مدل بر مبنای ضریب نش-ساتکلیف و میانگین خطای نسبی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۳۶ و ۱۰/۱۸ درصد و حداکثر خطای مدل برابر ۲۰ درصد محاسبه شد. پس از واسنجی مدل، شبیه‌سازی برای حالت تنگ‌شدگی ناگهانی انجام و نتایج با حالت تنگ‌شدگی تدریجی مقایسه شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد آب‌شستگی در حالت تنگ‌شدگی ناگهانی نسبت به حالت تبدیل تدریجی، ۲۹/۵ درصد افزایش داشته است که این نتیجه، بیان‌کننده اثر مثبت تدریجی بودن تبدیل در محل تنگ‌شدگی بر میزان حداکثر عمق آب‌شستگی بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌شستگی، آبراهه، تنگ‌شدگی، مدل SSIIM.

**ارجاع:** عباسی س. صمدی بروجنی ح. غفاری گوشه ج. و پارس‌مهر م. ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی آب‌شستگی در محل تنگ‌شدگی آبراهه‌ها با استفاده از مدل SSIIM. مجله پژوهش آب ایران. ۳۰: ۸۱-۸۸.

۱- دانشجو کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشجو کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- دانش‌آموخته گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [soheil.abbasi91@yahoo.com](mailto:soheil.abbasi91@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

## مقدمه

آب‌شستگی، پدیده‌ای است که در اثر فرسایش بستر با جریان آب و حمل مواد بستر توسط نیرویی که این جریان به مواد بستر وارد می‌کند، به وجود می‌آید. سازوکار این پدیده، به گونه‌ای است که قبل از آنکه سازه در اثر نیروهای مخرب سیل منهدم شود، در معرض خطرهای ناشی از فرسایش اطراف پی خود قرار می‌گیرد. کاهش عرض بستر سیلابی رودخانه منجر به افزایش سرعت و تنش برشی جریان و در نتیجه، بالا رفتن انرژی فرسایشی و ظرفیت حمل مواد جامد و افزایش ضریب انتقال رسوب در سیال می‌شود. در چنین وضعیتی زمینه لازم برای پدیده آب‌شستگی انقباضی که اصطلاحاً به آب‌شستگی تنگ‌شدگی موسوم است، فراهم می‌شود. همچنین آب‌شستگی موضعی، در اطراف موانع و سازه‌های موجود در مسیر جریان نیز به وجود می‌آید (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). برای بررسی شناخت پدیده آب‌شستگی در نظر گرفتن همه وضعیت‌های پیچیده در مطالعات مدل فیزیکی بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه علوم کامپیوتر از شبیه‌سازی‌های عددی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی مطالعه جریان آشفته و انتقال رسوب استفاده شده است (اولسن و میلن، ۱۹۹۳؛ هانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ علی و کریم، ۲۰۰۲). در این زمینه، عزیزیان و کربلایی (۱۳۹۲) اثر تغییرات دبی را بر سرعت و الگوی جریان در مقاطع تنگ‌شده در طول کانال به کمک نرم‌افزار MIKE 21 در حالت دو بعدی شبیه‌سازی و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. اساس حل این مدل، روش حجم محدود غیرهم‌پوشان بود. شبکه‌بندی بی‌ساختار در مدل‌سازی هندسه کانال به کار رفته و در ناحیه تنگ‌شدگی از مش ریزتری بهره گرفته شد. نتایج گویای تأثیر سرعت جریان و تغییرات عمق بر مشخصات جریان در تنگ‌شدگی بود؛ به گونه‌ای که با افزایش سرعت جریان و تغییرات عمق جریان‌های ثانویه و چرخشی در اطراف تنگ‌شدگی افزایش یافت. ویس (۲۰۰۲)، مارک و دیتریچ (۲۰۰۴)، در نتایج خود بیان کردند که مدل‌های دو بعدی شبیه‌سازی آب‌شستگی انقباضی را دارند؛ اما با منبسط کردن قسمت تنگ‌شدگی نتایج آن‌ها از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی فاصله گرفت. آن‌ها دلایل این ضعف را به تأثیر جریان‌های سه‌بعدی و ضعف مدل‌های آشفته‌گی آن نسبت دادند. لی و جریمان

(۲۰۱۰) نیز از جمله پژوهشگرانی بودند که آب‌شستگی انقباضی و الگوی آب‌شستگی را به وسیله مدل عددی بررسی کردند و توانستند نتایج آزمایشگاهی را به خوبی شبیه‌سازی کنند. نتایج آن‌ها نشان داد که شروع آب‌شستگی همواره در ابتدای تنگ‌شدگی از کناره دیواره شروع و بیشترین مقدار آن نیز در همین مکان حاصل می‌شود. به دلیل مسائل پیچیده‌ای همانند جریان در تنگ‌شدگی‌ها به دلیل تغییرات زیاد فشار، وجود جریان‌های ثانویه قوی در عمق و وجود سرعت‌های عمودی، لازم است از مدل‌های سه‌بعدی (3D) در پیش‌بینی میدان سرعت، سطح آب و انتقال رسوب استفاده شود. مدل عدد SSIIM از مدل‌های موجود در این زمینه است که اولین نسخه آن را اولسن در سال ۱۹۹۱ برای حل سه‌بعدی جریان و رسوب تهیه کرد. وافی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از این مدل به بررسی میزان آب‌شستگی و مؤلفه سه‌بعدی سرعت در کانال قوسی پرداختند. نتایج آن‌ها، نشان‌دهنده توانایی مدل SSIIM در تعیین محدوده، مقدار آب‌شستگی، رسوب‌گذاری بیشینه و همچنین مقدار سرعت‌های طولی و برآیند سرعت‌های افقی در کانال‌های قوسی دارای هندسه‌های پیچیده بود. میرموزن و پیرستانی (۱۳۸۸) به بررسی کارایی مدل SSIIM در وضعیت استفاده از کانال بتنی انتقال آب حاوی رسوب پرداختند. آن‌ها برای واسنجی مدل از یکی از شبکه‌های آبرسانی استان گیلان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده دقت مطلوب این مدل در وضعیت وجود آب و رسوب بوده است. شکیبایی‌نیا و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از مدل عددی SSIIM کاربرد مدل‌سازی سه‌بعدی را در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه بررسی کردند. سرانجام این مدل برای چندین مورد از جمله تغییرات بستر در محل اتصال رودخانه‌های طبیعی، جریان در محل اتصال آبراهه‌ها به کار برده شد. آنها در نهایت بیان کردند که مدل، توزیع سرعت جریان چرخشی و رسوب‌گذاری در کناره‌ها را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به پیشرفت روزافزون قدرت رایانه‌ها و توسعه مدل‌های عددی توانمند که قادر به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب به صورت سه‌بعدی در هندسه‌های پیچیده هستند، استفاده از این مدل‌های عددی برای مهندس‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است؛ اما باید توجه داشت که پیش از به‌کارگیری، دقت این مدل‌ها در وضعیت پیچیده با توجه

بار معلق:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_t \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (۳)$$

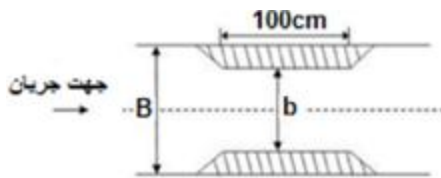
بار بستر:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(r_s - r)g}{r}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{t - t_c}{t_c} \right]^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left[ \frac{(r_s - r)}{r_w n^2} g \right]^{0.1}} \quad (۴)$$

در معادله (۴)،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوب،  $\rho_w$  چگالی آب،  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات و  $q_b$  دبی بار بستر است.

### مدل آزمایشگاهی

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SSIIM از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط پارس مهر (۱۳۹۰) در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی در جدول ۳ قابل مشاهده است. مشخصات کلی آزمایش‌ها و پلان کلی تنگ‌شدگی در جدول ۱ و شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- پلان تنگ‌شدگی کانال

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایش‌های انجام‌گرفته

شماره آزمایش	میزان تنگ‌شدگی (سانتی‌متر)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	نسبت تنگ‌شدگی (درصد)
۱	۲۰	۲۰	۶۶/۶۷
۲	۲۰	۳۰	۶۶/۶۷
۳	۳۰	۲۰	۵۰
۴	۳۰	۳۰	۵۰
۵	۳۰	۴۰	۵۰
۶	۴۰	۲۰	۳۳/۳
۷	۴۰	۳۰	۳۳/۳
۸	۴۰	۴۰	۳۳/۳

به فرضیات موجود در آن‌ها به‌وسیله صحت‌سنجی شناخته شود. هدف این مقاله بررسی آب‌شستگی انقباضی به‌صورت تنگ‌شدگی تدریجی و ناگهانی است. واسنجی و صحت‌سنجی نتایج به کمک نتایج مدل فیزیکی با تنگ‌شدگی تدریجی انجام شد. در ادامه برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه شبیه‌سازی‌هایی به کمک مدل SSIIM برای به دست آوردن نتایج آب‌شستگی در تنگ‌شدگی ناگهانی در وضعیت هیدرولیکی ثابت انجام پذیرفت.

### مدل عددی SSIIM

این مدل قادر به حل معادلات جریان روی یک شبکه سه‌بعدی با مدل آشفتگی مختلف است و از روش حجم کنترل به‌همراه روش قانون توان یا مرتبه دوم بالادست برای گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌کند. این نرم‌افزار همچنین از روش SIMPL (روش نیمه ضمنی در حل معادلات مرتبط با فشار) به حل میدان فشار مجهول با استفاده از روش تکرار می‌پردازد. در نرم‌افزار SSIIM معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات ناویر-استوکس هستند که برای حل آن‌ها از مدل آشفتگی k-ε استفاده می‌شود (اولسن، ۲۰۰۳). معادلات ناویر استوکس برای سیال تراکم‌ناپذیر با چگالی ثابت در حالت برداری به شکل معادله (۱) است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x_j} (-Pd_{ij} - \overline{ru_i u_j}) \quad (۱)$$

معادله (۲) را فان راین (۱۹۸۷) برای تعیین غلظت رسوب در نزدیکی بستر ارائه کرده است که در مدل عددی SSIIM از آن استفاده می‌شود.

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[ \frac{t - t_c}{t} \right]^{1.5}}{a \left[ \frac{(r_s - r)}{r_w n^2} g \right]^{0.1}} \quad (۲)$$

در معادله (۲)،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوب،  $\rho_w$  چگالی آب،  $d$  قطر ذرات و  $C_{be}$  غلظت رسوب است.

اساس محاسبات دبی رسوب در این برنامه حل معادله انتقال - پخش رسوب است (روابط (۳) و (۴)).

دانه‌های رسوبی در نظر گرفته و سپس اندازه زبری تا حدی افزایش داده شد؛ که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، طبق معیارهای ارزیابی همخوانی قابل قبولی را با نتایج آزمایشگاهی داشته باشند.

### صحت‌سنجی و درصد خطای مدل

برای صحت‌سنجی مدل تعدادی از آزمایش‌ها در واسنجی شرکت داده نشد تا پس از واسنجی و اجرای مدل بتوان قابلیت مدل را برای سایر آزمایش‌ها ارزیابی کرد. در این پژوهش آزمایش‌های شماره ۳ تا ۸ برای صحت‌سنجی انتخاب شد. برای تشخیص میزان تقارب نتایج محاسبه‌ای و مشاهده‌ای از معیار نش- ساتکلیف (معادله (۶)) استفاده شد. این شاخص در بازه منفی بی‌نهایت و یک تغییرپذیر است و هر چه مقدار آن به عدد ۱ نزدیک باشد، بیان‌کننده تقارب بیشتر است و مقادیر کمتر از نیم برای این شاخص نشانه عدم تطابق و تقارب دو دسته داده خواهد بود. میانگین ضریب نش برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی ۰/۹۳۶ برآورد شد با توجه به این مقدار، می‌توان به عملکرد صحیح مدل پی برد. جدول ۳ نتایج داده‌های آزمایشگاهی و عددی و همچنین مقادیر ضریب نش- ساتکلیف را نشان می‌دهد، مقدار این ضریب برای همه آزمایش‌ها به خوبی نشان‌دهنده دقت مدل است.

$$RE = 1 - \left( \frac{(x_i - x_0)^2}{(X_i - \bar{x})^2} \right) \quad (۶)$$

در معادله (۷)، RE، ضریب نش،  $x_i$  مقدار مشاهده‌ای،  $x_0$  مقدار محاسبه‌ای و  $\bar{x}$  میانگین مقدار مشاهده‌ای است. برای محاسبه درصد خطای مدل SSIIM و برای محاسبه عمق آبشستگی نهایی، نسبت به مدل آزمایشگاهی از معادله (۶) استفاده شد:

$$\Delta d = \left| \frac{d_m - d_l}{d_l} \right| \times 100 \quad (۷)$$

در معادله (۷)،  $\Delta d$  درصد خطا،  $d_m$  عمق آبشستگی در مدل و  $d_l$  عمق آبشستگی در آزمایشگاه است.

در جدول ۱ نسبت تنگ‌شدگی ( $R_c$ ) بر اساس معادله (۵) محاسبه شده است:

$$R_c = \left( 1 - \frac{b}{B} \right) * 100 \quad (۵)$$

که در آن،  $b$  عرض قسمت تنگ‌شده و  $B$  عرض کانال اصلی است.

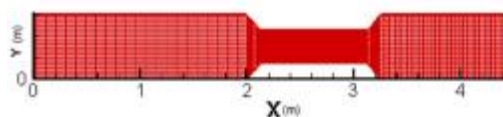
در فلوم مورد نظر از رسوباتی با قطر متوسط ۰/۷۸ میلی‌متر استفاده شد. دیگر ویژگی‌های رسوبات بستر را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. در جدول ۲،  $c_v$  انحراف معیار،  $c_u$  ضریب یکنواختی  $N$  تخلخل و  $\theta_m$  زاویه ایستای ذرات بستر است.

جدول ۲- ویژگی‌های رسوبات بستر

D50 (mm)	$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	$N$	$\theta_m$ (درجه)	$c_u$	$c_v$ (mm)
۰/۷۸	۲/۷	۵۱/۸۵	۳۰/۵	۱/۵	۰/۸

### تولید شبکه محاسباتی

برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه، طول کانال در مدل عددی ۴/۵ متر در نظر گرفته و مابقی شرایط همانند مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد. برای افزایش دقت محاسبات در نقاط حساس مش ریزتر در نظر گرفته شد. در شکل ۲ می‌توان نمونه مش‌بندی برای شبیه‌سازی تنگ‌شدگی ۳۰ سانتی‌متر را مشاهده کرد.



شکل ۲- پلان مش‌بندی برای تنگ‌شدگی ۳۰ سانتی‌متر (۲۰\*۳۰\*۱۱)

### واسنجی مدل

برای واسنجی از بین آزمایش‌هایی که انجام شده است بحرانی‌ترین حالت‌ها انتخاب شد؛ بحرانی‌ترین حالت‌ها، حالتی است که بیشترین میزان تنگ‌شدگی در عرض کانال وجود داشته باشد. آزمایش‌های شماره ۱ و ۲ با مشخصات موجود جدول ۱ برای این منظور انتخاب شد. برای واسنجی ابتدا ارتفاع زبری برابر با قطر متوسط

جدول ۳- نتایج عمق آبشستگی برای مدل عددی و آزمایشگاهی

شماره آزمایش	عرض تنگ‌شدگی (متر)	عمق آب (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	آبشستگی محاسبه شده (سانتی‌متر)	حداکثر عمق آبشستگی مشاهده شده (سانتی‌متر)	ضریب نش	درصد خطا
۱	۰/۲	۰/۳	۲۰	۴/۴	۴/۲	۰/۹۲	۴/۷۶
۲	۰/۲	۰/۳	۳۰	۱۲	۱۱	۰/۹۷	۹/۰۹
۳	۰/۳	۰/۳	۲۰	۳	۲/۶	۰/۹۷	۱۵/۳۸
۴	۰/۳	۰/۳	۳۰	۴/۶	۴/۳	۰/۷۶	۶/۹۷
۵	۰/۳	۰/۳	۴۰	۹/۳	۸/۸	۰/۹۸	۵/۶۸
۶	۰/۴	۰/۳	۲۰	۱/۸	۱/۵	۰/۹۹	۲۰
۷	۰/۴	۰/۳	۳۰	۳/۱	۲/۷	۰/۹۶	۱۴/۸۵
۸	۰/۴	۰/۳	۴۰	۴/۴	۴/۲	۰/۹۲	۴/۷۶

### نتایج و بحث

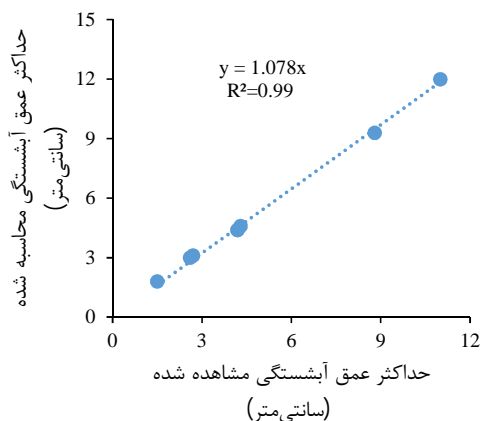
بعد از واسنجی و صحت‌سنجی نرم‌افزار SSIIM، نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و همچنین مدل برای تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر نیز اجرا شد که در این بخش به بررسی نتایج پرداخته می‌شود. به دلیل اینکه نمایش نتایج به دست آمده آبشستگی در نرم‌افزار SSIIM چندان واضح نیست؛ بنابراین برای نمایش بهتر نتایج از نرم‌افزار Tecplot استفاده شد. نرم‌افزار Tecplot از جمله نرم‌افزارهای ترسیمی قدرتمند است که از آن در بسیاری از رشته‌های مهندسی و علوم پایه استفاده می‌شود. از قابلیت‌های آن، راحتی کار، امکان ورود داده‌ها با فرمت‌های مختلف و قابلیت ترسیم دوبعدی، سه‌بعدی و ایجاد پویانمایی و انجام محاسبات مربوط به دینامیک سیالات است.

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی (جدول ۳ و شکل ۳) می‌توان دریافت نتایج مدل SSIIM با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی خیلی خوبی دارد و ضریب تعیین، ضریب نش-سانتکلایف و میزان خطای به دست آمده برای همه آزمایش‌ها، نشان‌دهنده تقارب نتایج مدل برای به دست آوردن میزان آبشستگی در تنگ‌شدگی است.

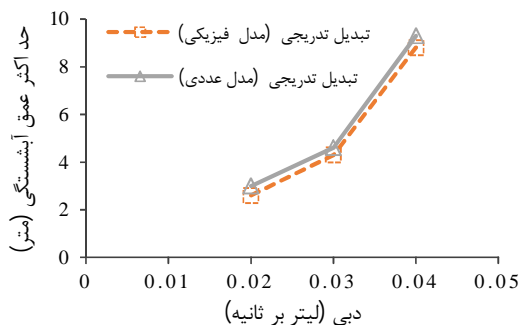
### مقایسه نتایج آبشستگی مدل عددی و مدل آزمایشگاهی

با مشاهده نتایج شبیه‌سازی در هر مدل با کاهش عرض کانال و افزایش دبی مقدار آبشستگی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت بیشترین آبشستگی در تنگ‌شدگی ۲۰ سانتی‌متر با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به میزان ۱۲ سانتی‌متر اتفاق افتاد. در شکل‌های ۶ تا ۸ الگوی

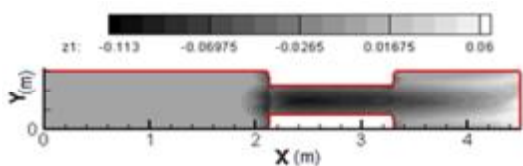
آبشستگی در تنگ‌شدگی‌ها و دبی‌های متفاوت دیده می‌شود. با توجه به خروجی مدل شروع آبشستگی همواره در کنار دیوارها و ابتدای تنگ‌شدگی است که در پی آن، با افزایش تنش وارد شده به بستر، روند کف کنی در سایر نقاط ادامه پیدا می‌کند. با توجه به شکل‌های ۴، ۵ و ۶ در قسمتی از کانال بعد از تنگ‌شدگی که سرعت جریان با افزایش عرض کانال کاهش می‌یابد، رسوبات ته‌نشین می‌شوند. در کلیه نتایج مدل با کاهش دبی، مقدار آبشستگی کاهش و با کم کردن عرض تنگ‌شدگی مقدار آبشستگی افزایش یافته است. با توجه به الگوی آبشستگی در مدل‌های شبیه‌سازی شده علی‌رغم تأثیر مقدار تنگ‌شدگی و میزان دبی بر میزان آبشستگی و کمیت آن، این دو پارامتر بر نقطه شروع آبشستگی که همواره ابتدای تنگ‌شدگی و در فاصله ۲/۲ متری از ابتدای کانال بوده، تأثیری نداشته و در همه آزمایش‌های این پژوهش فرسایش همواره از این نقطه آغاز شد.



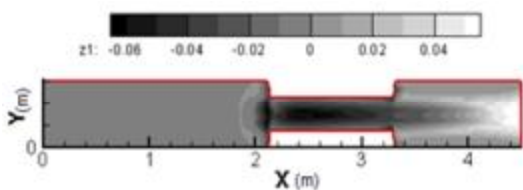
شکل ۳- مقایسه مقدار عمق آبشستگی آزمایشگاهی با مقدار عددی (در حالت تدریجی)



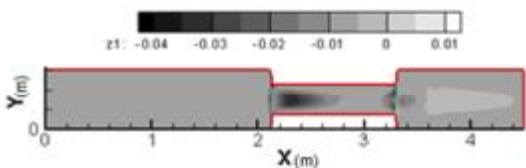
شکل ۷- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به دبی



شکل ۸- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

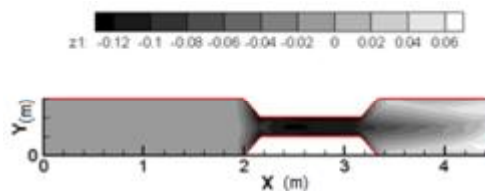


شکل ۹- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه

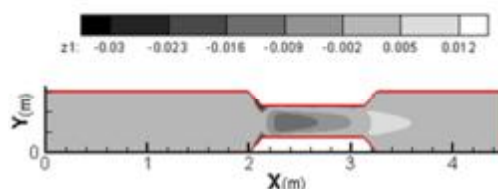


شکل ۱۰- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

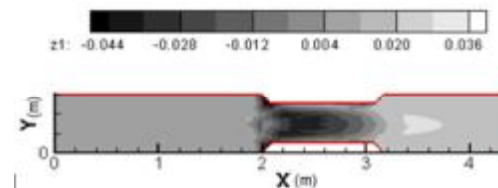
در شکل ۱۱ تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در نسبت تنگ‌شدگی‌های متفاوت نشان داده شده است. با ثابت بودن دبی و افزایش نسبت تنگ‌شدگی ( $R_c$ ) آبشستگی افزایش یافته است؛ زیرا با افزایش نسبت تنگ‌شدگی مقطع جریان کاهش و سرعت جریان و تنش وارده افزایش می‌یابد. در این شکل می‌توان تغییرات نسبت آبشستگی را به عمق جریان با افزایش دبی، برای نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد افزایش دبی در نسبت تنگ‌شدگی ثابت، افزایش نسبت



شکل ۴- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی تدریجی ۲۰ سانتی‌متر و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه

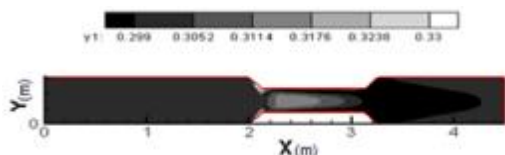


شکل ۵- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی تدریجی ۳۰ سانتی‌متر با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

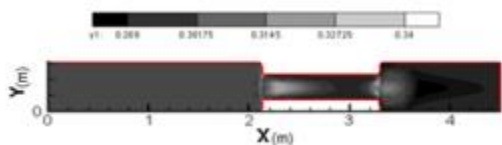


شکل ۶- الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی تدریجی ۴۰ سانتی‌متر با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه (متر)

از دیگر عوامل مؤثر بر آبشستگی انقباضی، نوع تبدیل در محل تنگ‌شدگی مقطع بوده که در این پژوهش، آزمایش‌ها در حالت تبدیل تدریجی انجام شده است. برای بررسی اثر نوع تبدیل بر میزان آبشستگی انقباضی، از مدل عددی SSIIM استفاده و مدل برای تنگ‌شدگی ناگهانی به عرض ۳۰ سانتی‌متر در سه دبی مختلف اجرا شد. نتایج نشان داد که میزان عمق آبشستگی در حالت تبدیل ناگهانی به طور میانگین  $29/4$  درصد نسبت به تبدیل تدریجی (با زاویه  $50$  درجه) افزایش داشته است. بر اساس کردار شکل ۷، این میزان افزایش برای دبی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب  $3/36$ ،  $4/30$  و  $5/21$  درصد به دست آمد. در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی ناگهانی نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود که در محل شروع تنگ‌شدگی مقطع، میزان آبشستگی بیشتر از حالت تنگ‌شدگی تدریجی است که این امر، به دلیل ناگهانی بودن تنگ‌شدگی است.

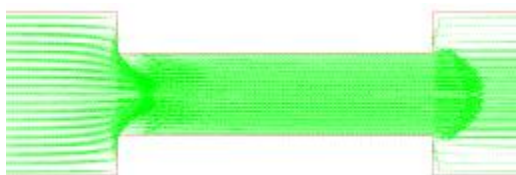


شکل ۱۲- الگوی تغییرات عمق آب برحسب متر در زمان ۳۷۵ دقیقه (تنگ‌شدگی تدریجی)



شکل ۱۳- الگوی تغییرات عمق آب برحسب متر در زمان ۳۷۵ دقیقه (تنگ‌شدگی ناگهانی)

در شکل ۱۴ و ۱۵ می‌توان توانایی این مدل عددی را در شبیه‌سازی نحوه خطوط جریان و جریان‌های انقباضی و چرخشی مشاهده کرد. شکل ۱۴ خطوط جریان را برای تنگ‌شدگی ناگهانی و شکل ۱۵ خطوط جریان را برای حالت تدریجی نشان می‌دهد. با توجه به هر دو شکل به‌خوبی واضح است که تدریجی بودن تبدیل برای کاهش عرض کانال تأثیر بسزایی در شیوه ورود جریان به مقطع تنگ‌شده دارد؛ به‌گونه‌ای که این خطوط در حالت تدریجی موازی بدنه تبدیل حرکت می‌کنند و با تلاطم کمتر وارد مقطعی با عرض کمتر می‌شوند که این روند خود دلیل اصلی کمتر بودن آب‌شستگی در تنگ‌شدگی با تبدیل تدریجی است.

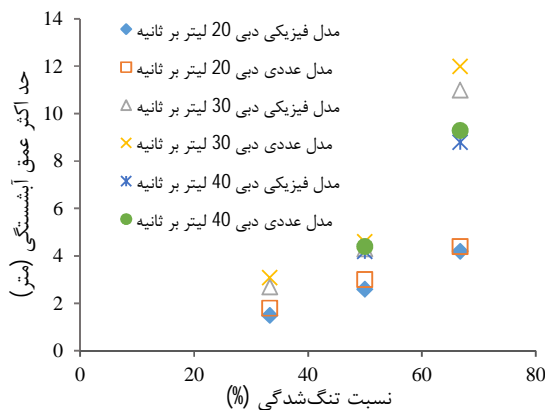


شکل ۱۴- شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی در مدل تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر



شکل ۱۵- شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی در مدل تنگ‌شدگی تدریجی ۳۰ سانتی‌متر

آب‌شستگی را به همراه داشته است؛ به‌گونه‌ای که در  $R_c=0.5$  با افزایش ۳۳ درصدی میزان دبی (از ۲۰ به ۳۰ لیتر بر ثانیه) میزان نسبت آب‌شستگی به عمق جریان  $(\frac{Y_S}{Y})$  ۳۹/۵ درصد و با افزایش ۵۰ درصدی دبی (از ۲۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه) میزان  $\frac{Y_S}{Y}$  ۷۰/۴ درصد افزایش داشت. با توجه به این کردار در یک دبی ثابت با کاهش نسبت تنگ‌شدگی ( $R_c$ ) نیز میزان آب‌شستگی افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که در دبی ثابت ۳۰ لیتر بر ثانیه با کاهش ۱۶/۷ درصدی نسبت تنگ‌شدگی، نسبت  $\frac{Y_S}{Y}$  ۶۱ درصد و با کاهش ۳۳/۴ درصدی آن این نسبت ۷۴/۲ درصد افزایش پیدا کردند.



شکل ۱۱- تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی به نسبت تنگ‌شدگی کانال

### بررسی الگوی تغییرات عمق آب و خطوط جریان در مدل عددی

مدل عددی SSIIM توانست تغییرات عمق آب را در مدل عددی به‌خوبی شبیه‌سازی کند؛ به‌گونه‌ای که در شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات عمق آب برحسب متر توسط مدل برای حالت تدریجی و ناگهانی به وضوح قابل مشاهده است. با مقایسه الگوهای تغییرات عمق آب با الگوی تغییرات آب‌شستگی مشاهده می‌شد بیشترین عمق آب، در مکان‌هایی محاسبه شد که بیشترین آب‌شستگی رخ می‌دهد. شبیه‌سازی الگوی آب‌شستگی با نتایج ویس (۲۰۰۴) و لی و جریماننا (۲۰۱۰) و مین دوک و روبی (۲۰۰۸) تطابق بسیار نزدیکی دارد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الگوی جریان، آبشستگی و تغییرات عمق جریان به‌وسیله مدل SSIIM در سه تنگ‌شدگی تدریجی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر و تنگ‌شدگی ناگهانی ۳۰ سانتی‌متر با دبی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل‌شده به شرح زیر است:

در این شبیه‌سازی میانگین ضریب نش-سانتکلیف  $0/936$  به دست آمد که نشان‌دهنده نزدیکی داده شبیه‌سازی به داده‌های آزمایشگاهی است همچنین بیشترین درصد خطای مدل ۲۰ درصد در آزمایش شماره ۶ و کمترین درصد خطا  $4/76$  درصد در آزمایش شماره ۱ محاسبه شد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌توان گفت مدل عددی SSIIM به‌خوبی می‌تواند مقدار و الگوی آبشستگی، الگوی جریان و تغییرات عمق آب را در تنگ‌شدگی کانال‌های رودخانه‌ها پیش‌بینی کند.

الگوی آبشستگی در تنگ‌شدگی‌های مختلف روند یکسانی دارند و شروع آبشستگی همواره در ابتدای تنگ‌شدگی و در کنار دیواره‌ها است؛ اما به‌دلیل اینکه در تبدیل تدریجی خطوط جریان موازی با بدنه و زاویه تبدیل به مقطع تنگ‌شدگی وارد می‌شوند، باعث کاهش تلاطم و جریان‌های چرخشی شده که باعث می‌شود آبشستگی در حالت تنگ‌شدگی تدریجی کمتر از حالت ناگهانی باشد؛ به گونه‌ای که در این پژوهش نشان داده شد آبشستگی در حالت تنگ‌شدگی ۳۰ سانتی‌متری با زاویه تبدیل ۵۰ درجه نسبت به حالت ناگهانی حدود  $29/4$  درصد کاهش دارد.

## منابع

۴. میرمؤمن. س و پیرستانی. م. ر. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی جریان آب و رسوب در کانال انتقال آب با استفاده از مدل SSIIM. دومین کنفرانس سراسری آب، دانشگاه آزاد واحد بهبهان. اسفند ماه.
۵. واقفی. م. هاشمی. س. ش. و صفرپور ی. ۱۳۹۴. تعیین میزان آبشستگی و مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت پیرامون آبشکن سرسپری در کانال قوسی با روش عددی و داده‌های آزمایشگاهی. فصلنامه پژوهشی آبیاری و آب ایران. ۱۹: ۱۰۹-۱۲۴.
۶. وزارت نیرو. ۱۳۹۱. راهنمای مهار روش‌های رسوب در رودخانه. نشریه شماره ۵۹۸. ۱۴۷ ص.
7. Ali. K. H. M. and Karim O. 2002. Simulation of flow around piers. Journal of Hydraulic Research. 40(2): 161-174
8. Huang. W. Yang. Q. and Xiao. H. 2009. CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers. J. Computers & Fluids. 38: 1050-1058.
9. Lai. Y. G and Greimann. B. P. 2010. Predicting contraction scour with a two-dimensional depth averaged model. Journal of Hydraulic Research. 48(3): 383-387.
10. Marek. M and Dittrich. A. 2004. 3D numerical calculations of the flow in an open-channel consisting of an expansion a contraction. 6th International Conference on Hydro-Science and Engineering. Brisbane. Australia. 402-404.
11. Minh Duc B. and Rodi. W. 2008. Numerical simulation of contraction scour in an open laboratory channel. Journal of Hydraulic Research. 134(4): 367-377.
12. Olsen. N. R. B. and Melaaen. M. C. 1993. Three-dimensional calculation of scour around cylinders. Journal of Hydraulic Research. 119(9): 1048-1054.
13. Olsend B. 2003. SSIIM Manual. [www.bygg.ntnu](http://www.bygg.ntnu).
14. Weise S. 2002. Verifikation eines weidimensionalen. Feststofftransportmodells anhand von hydraulischen Versuchen. Diplomarbeit. Fachhochschule fur Technik. Wirtschaft und Kultur. Leipzig. [German].
۱. پارس‌مهر. م. ۱۳۹۰. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد. ۱۱۵ ص.
۲. شکیبائی‌نیا. ا. زراتی. ا. ر و مجدزاده طباطبایی. م. ر. ۱۳۸۷. کاربرد مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه. نشریه دانشکده فنی. ۴۲(۴): ۴۴۳-۴۵۵.
۳. عزیزیان غ و کربلایی ح. ر. ۱۳۹۲. مطالعه تأثیر تنگ‌شدگی ناگهانی مقطع بر مشخصات جریان. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان. دانشگاه سیستان و بلوچستان. اردیبهشت ۱۳۹۲.