

## بررسی تغییرات مورفولوژی بستر در کانال‌های دارای سری آبشکن‌های موازی با طول‌های نامساوی و جهت‌گیری‌های مختلف

سعید عباسی<sup>۱</sup>، حنیف پورشهباز<sup>۲</sup>، پوریا تقوانی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳

### چکیده:

آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که به منظور کاهش سرعت و فرسایش کرانه به صورت عمود بر جریان یا مورب ساخته می‌شوند. آبشکن‌ها همانند سایر سازه‌های تنگ کننده‌ی مسیر جریان، کانال جریان را تنگ می‌کنند و در مجاورت خود ساختار جریان را تغییر می‌دهند و در اطراف ناحیه‌ی تنگ شده باعث شکل‌گیری گردابه‌هایی می‌شوند. در این مقاله، تغییر الگوی جریان و تغییرات بستر در اثر تغییر زوایای سری آبشکن‌های موازی غیرمتخلخل و غیر مستغرق با طول نامساوی، با استفاده از روش‌های عددی بررسی شده است. اعتبارسنجی مدل نرم‌افزاری توسط مقایسه‌ی نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر جهت‌گیری آبشکن‌های با طول نامساوی از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه (کاهش ۱۲ درصدی میزان تنگ‌شدگی)، بیشترین عمق آبستگي در پای آبشکن اول تا ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فرسایش، رسوب‌گذاری، سری آبشکن، طول نامساوی، مدل‌سازی عددی

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه زنجان، [Abbasi.saeed@znu.ac.ir](mailto:Abbasi.saeed@znu.ac.ir) (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، با شگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران،

[h.pourshahbaz@znu.ac.ir](mailto:h.pourshahbaz@znu.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه سمنان، [pooryataghvaei@yahoo.com](mailto:pooryataghvaei@yahoo.com)

## مقدمه

آبشکن‌ها به صورت کلی با هدف افزایش عمق جریان، محافظت از سواحل و بازسازی سیلاب‌دشت، از ساحل تا میانه‌ی جریان ساخته می‌شوند. میدان جریان در بالادست این آبشکن‌ها، جریان سه بعدی جدا شده از جریان اصلی بوده در حالی که در پایین دست، گردابه‌های دوره‌ای به وقوع خواهند پیوست (Ghodsian & Vaghefi, 2009). این جریان‌های پیچیده باعث برخاستن ذرات در نزدیکی آبشکن‌ها شده و پدیده‌ی آبشستگی در نزدیکی این سازه‌ها رخ می‌دهد. پیچیدگی جریان با افزایش عمق آبشستگی افزایش می‌یابد، تا جایی که در نزدیکی آبشکن انواع جریان‌های چرخشی و ثانویه قابل رؤیت خواهد بود.

اویجی توال (Uijtewaal, 2005) اثر اشکال مختلف سری آبشکن‌ها را بر روی جریان در اطراف آن‌ها در قسمتی از رودخانه که در مقیاس ۱:۴۰ ساخته شده بود به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. بر اساس تحقیقات وی جریان در اطراف سری آبشکن‌های مستغرق از پیچیدگی بیشتری نسبت به آبشکن‌های غیر مستغرق برخوردار است. ژانگ و ناکاگا (Zhang & Nakagawa, 2008) یک مقاله مروری در زمینه‌ی فرسایش در اطراف سری آبشکن‌ها ارائه دادند. ایشان در این مقاله به بررسی تحقیقات در زمینه‌ی جریان، فرمول‌های عمق فرسایش تعادل و گسترش فرسایش در زمان در اطراف سری آبشکن‌ها پرداختند و ایده‌های مهم و معادلات حاکم و حل روش‌های گوناگون مدل‌های عددی را نیز در این مقاله ارائه کردند. کرمی و همکاران (Karami et al., 2012) به بررسی تغییرات زمان بر فرسایش دماغه‌ی اولین آبشکن در سری آبشکن‌ها پرداختند. نتایج بررسی عددی آنان حاکی از این بود که ۷۰ تا ۹۰ درصد فرسایش در ۲۰ درصد ابتدایی زمان تعادل نهایی رخ می‌دهد. لی و همکاران (Li et al., 2013)، با بررسی تأثیرات زمان در مدل‌های آشفتگی برای مدل‌سازی عددی عمق آبشستگی در اطراف آبشکن بیان کردند که گسترش چاله‌ی آبشستگی در سه مرحله رخ می‌دهد که بیشترین آن در دو مرحله اول خواهد بود. باسر و همکاران (Baser et al., 2015) به بررسی

پارامترهای بهینه‌ی طراحی آبشکن محافظ در سری آبشکن‌ها جهت کاهش بیشینه‌ی عمق آبشستگی پرداختند. ایشان با روش ANFIS-PSO به بررسی طول، زاویه‌ی قرارگیری آبشکن محافظ نسبت به دیواره‌ی کانال و فاصله‌ی آن با اولین آبشکن از سری آب-شکن‌ها پرداختند. گیگلو و همکاران (Giglou et al., 2017)، به بررسی زاویه، طول‌ها و فاصله‌های متفاوت سری آبشکن‌های موازی با طول مساوی بر روی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط FLOW-3D پرداختند.

همچنین، چنگ و همکاران (Chang et al., 2013) و کرمی و همکاران (Karami et al., 2014) به بررسی عمق آبشستگی در گروه آبشکن‌ها پرداختند و نشان دادند که بیشترین فرسایش در سری آبشکن‌ها در دماغه‌ی آبشکن‌های اول و آخر رخ می‌دهد و فرسایش در دماغه‌ی آبشکن آخر با اندکی افزایش سرعت به شدت افزایش می‌یابد. در این گروه آبشکن‌ها به دلیل اندرکنش شدیدتر جریان و رسوب و پدیدار شدن جریان متلاطم، پیش‌بینی دقیق عمق آبشستگی نیاز به در نظر گرفتن جریان متلاطم در چاله‌ی آبشستگی دارد (Mendoza, 1993). آچاریا و دوان (Acharyal & Duan, 2011) به بررسی تأثیر زاویه‌ی این گروه آبشکن‌ها بر آبشستگی پرداخته‌اند و گروهی دیگر از محققین مانند کرمی و همکاران (Karami et al., 2008)، تأثیر طول این آبشکن‌ها بر فرسایش و رسوب‌گذاری را مورد بررسی قرار داده‌اند.

مدل‌سازی هیدرودینامیک جریان و روند انتقال رسوب پیرامون آبشکن‌ها، نیاز به حداقل یک مدل دوبعدی هیدرودینامیکی و رسوبی دارد (Duan & Nanda, 2006, Kuhnle et al., 2008). در تحقیق حاضر به بررسی توأمان اثرات تغییر طول و تغییر زاویه بر عمق آبشستگی پرداخته شده است. نرم‌افزارهای زیادی مانند FLOW-3D، SSIIM، Fluent، برای محاسبات این مدل، توسعه داده شده‌اند که در این تحقیق از مدل دینامیک سیالات محاسباتی FLOW-3D استفاده گردیده است. اعتبارسنجی مدل عددی توسط مقایسه‌ی نتایج با نتایج آزمایشگاهی صورت

### مدل عددی و اعتبارسنجی

کرمی و همکاران (Karami et al., 2014) در آزمایشگاه دانشگاه امیرکبیر، کانالی مستطیلی به طول ۱۴ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱ متر را از جنس پلکسی گلاس که به وسیله فریم فلزی پایدار شده ساختند و سه آبشکن غیر مستغرق و غیر قابل نفوذ، به طول ۲۵ سانتی متر عمود بر جریان در کانال نصب کردند. اولین آبشکن را در فاصله ۶/۱۶ متری از ابتدای کانال نصب کردند و فاصله‌ی بین آنها را دو برابر طول آبشکن انتخاب کردند. عمق جریان ورودی در ۱۵ سانتی متر ثابت نگه داشته شد. آن‌ها فلوم را به وسیله‌ی رسوبات یکسان ( $\sigma_g < 1.4$ ) با ضخامت ۰/۳۵ متر و با میانگین قطر دانه‌ی ( $d_{50}$ ) ، ۰/۹۱ میلی متر و با چگالی نسبی ( $S_s$ ) ۲/۶۵ و انحراف استاندارد هندسی ( $\sigma_g$ ) ۱/۳۸ پوشاندند. پروفیل سرعت و تغییرات پروفیل بستر در اطراف آبشکن‌ها، به ترتیب با دستگاه ADV و LBP اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ جزئیات و نتایج برخی آزمایشات آن‌ها، که برای صحت سنجی مدل عددی استفاده شده است، ارائه شده که در آن Q، دبی آزمایش بر حسب متر مکعب بر ثانیه، Y عمق جریان بر حسب متر، U، سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه،  $U/U_{cr}$ ، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی شیلدز، Fr، عدد فرود،  $ds_1$  و  $ds_2$  و  $ds_3$  به ترتیب عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های اول، دوم و سوم بر حسب متر و V حجم رسوبات فرسایش یافته بر حسب مترمکعب می‌باشد.

پذیرفته است. پس از آن، عمق آبشستگی برای سه آبشکن موازی با طول نابرابر، تحت ۷ زاویه‌ی مختلف، با یکدیگر و با عمق آبشستگی در حالت طول برابر و عمود بر جریان مورد مقایسه قرار گرفته است.

### معادلات حاکم

معادلات حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنتم است که نرم‌افزار FLOW-3D از حل آن‌ها برای محاسبات هیدرولیکی جریان استفاده می‌کند. مدل عددی FLOW-3D با حل عددی معادلات دیفرانسیل با روش حجم محدود این معادلات را حل می‌کند. در مدل FLOW-3D از دو روش عددی برای شبیه سازی استفاده می‌شود که عبارتند از روش حجم سیال VOF که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کسر مساحت-حجم مانع یا FAVOR که برنامه از این روش برای مدل سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزهای هندسی استفاده می‌کند. برای محاسبات بخش رسوبی، بار معلق و بار بستر به طور جداگانه برآورد می‌شود. بار رسوبی معلق توسط حل معادله انتقال-انتشار بدست می‌آید. همچنین باربستر نیز توسط معادله‌ی فن‌راین (Van Rijn, 1987) محاسبه خواهد شد (FLOW-3D, 2015).

جدول (۱): مشخصات و نتایج مدل کرمی و همکاران (Karami et al., 2014)

Test NO.	Q (m <sup>3</sup> /s)	Y (m)	U (m/s)	U/U <sub>cr</sub>	Fr	d <sub>s1</sub>	d <sub>s2</sub>	d <sub>s3</sub>	V (m <sup>3</sup> )
E1	0.035	0.15	0.233	0.65	0.19	0.156	0	0.026	0.0165

چگالی رسوبات برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای ذرات بستر و همچنین ویسکوزیته‌ی سینماتیکی  $\nu = 10^{-6}$ ، با در نظر گرفتن روابط ارائه شده توسط شیلدز (Shields, 1936)  $0.33/k - \epsilon$  محاسبه و منظور شد. در این مدل سازی از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  با توسعه‌ی Renormalized group (RNG) model استفاده شده است. مدل RNG

مدل آزمایشگاهی مذکور، در FLOW-3D به صورتی که در ادامه شرح داده خواهد شد، مدل سازی شد. واحدها به صورت SI، دما بر حسب درجه سلسیوس و آب به عنوان سیال غیر قابل تراکم در نظر گرفته شد. عدد شیلدز بحرانی با توجه قطر ۰/۹۱ میلی متری منظور شد، شتاب گرانش برابر ۹/۸۰۷ متر بر مجذور ثانیه،

از بسط و توسعه‌ی مدل استاندارد مبتنی بر روش تجدید نرمال سازی گروهی (RNG) بدست آمده است. به صورتی که معادلاتی که در روش استاندارد به صورت تجربی محاسبه می‌شوند، در روش RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند. برای حل معادلات ناویر استوکس، نیاز به شرایط اولیه و مرزی خواهد بود. در مرز ورودی فلوم از شرط مرزی دبی ثابت استفاده شده است. در اینجا با توجه به شرایط آزمایشگاهی، از شرط دبی ثابت  $0.35$  متر مکعب بر ثانیه و تراز آب در ورودی برابر  $0.5$  متر استفاده شد که این تراز از کف فلوم محاسبه می‌شود. با توجه به این که تراز رسوبات برابر  $35$  سانتی‌متر است، عمق جریان آب برابر  $15$  سانتی‌متر خواهد بود. در طرفین (دیواره‌ها) و کف کانال از شرایط مرزی دیوار استفاده گردید. در مرز فوقانی و مرزهای داخلی فلوم شرط تفران و در مرز خروجی شرایط تداوم در نظر گرفته شده است. مدل‌ها با چند طول مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. طول کانال مورد بررسی برابر  $5$  متر انتخاب و فاصله‌ی  $3$  تا  $8$  متری فلوم آزمایشگاهی به صورت عددی مدل‌سازی شد. از فاصله‌ی  $3$  تا  $6/16$  متری که اولین آبشکن قرار دارد، جریان توسعه یافته و پروفیل سرعت آب شکل می‌گیرد و از فاصله‌ی  $7/18$  تا  $8$  متری نیز گرادبه‌های آبشکن آخر کامل تشکیل می‌شود. بر این اساس می‌توان پروفیل رسوب گذاری و فرسایش در آبشکن آخر را نیز ترسیم کرد.

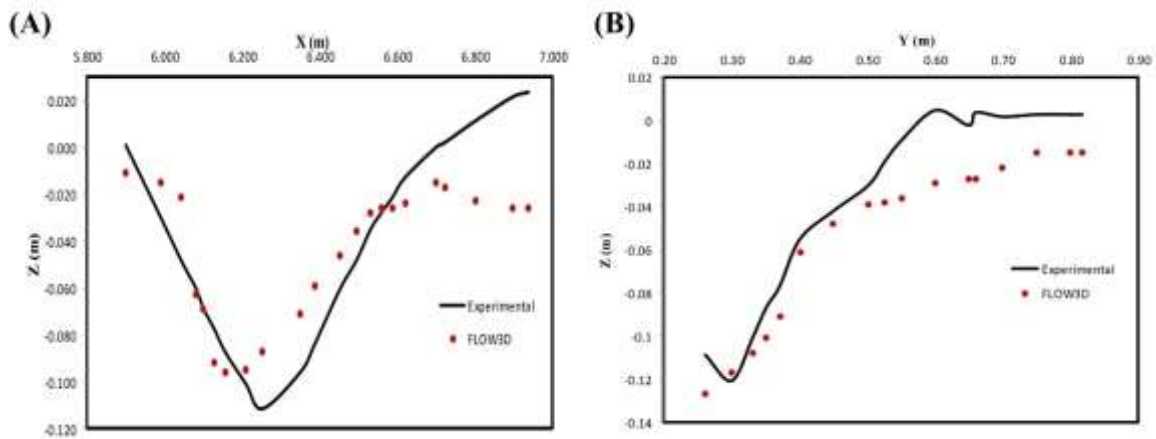
با توجه آنالیز حساسیت مش انجام شده و مقایسه‌ی نتایج آبشستگی پای آبشکن اول با نتایج آزمایشگاهی، از دو مش با ابعاد مختلف استفاده شد به صورتی که در فاصله‌های نزدیکتر به آبشکن‌ها، مش‌ها ریزتر بوده و با دور شدن از آبشکن‌ها مش‌ها درشت‌تر می‌شوند. این مش‌ها به روش تو در تو در هم قرار داده شده‌اند و پس از تست‌های مکرر به عنوان مناسب ترین مدل مش برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. مش بزرگتر کل کانال را در بر گرفته است، ابعاد این مش در همه‌ی جهات  $2/5$  سانتی متر و تعداد این مش‌ها  $192000$  می‌باشد. نسبت ابعاد مش در جهات گوناگون (X,Y,Z) در بیشترین حالت تغییرات بستر مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در مقاطع عرضی و طولی مقایسه شد. چهار مقطع عرضی و چهار مقطع طولی در قسمت‌های پس از تنگ‌شدگی انتخاب و در مجموع، عمق آبشستگی در  $160$  نقطه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱ میزان آبشستگی در یک مقطع عرضی و یک مقطع طولی به ترتیب در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در جدول ۲ عمق آبشستگی در این  $160$  نقطه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های اول تا سوم نیز در این جدول بیان گردیده است. نتایج نشان می‌دهد دقت مدل عددی با ضریب تشخیص ( $R^2$ ) برابر  $0/91$  و قابل قبول می‌باشد.

تغییرات بستر مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در مقاطع عرضی و طولی مقایسه شد. چهار مقطع عرضی و چهار مقطع طولی در قسمت‌های پس از تنگ‌شدگی انتخاب و در مجموع، عمق آبشستگی در  $160$  نقطه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱ میزان آبشستگی در یک مقطع عرضی و یک مقطع طولی به ترتیب در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در جدول ۲ عمق آبشستگی در این  $160$  نقطه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های اول تا سوم نیز در این جدول بیان گردیده است. نتایج نشان می‌دهد دقت مدل عددی با ضریب تشخیص ( $R^2$ ) برابر  $0/91$  و قابل قبول می‌باشد.

با توجه آنالیز حساسیت مش انجام شده و مقایسه‌ی نتایج آبشستگی پای آبشکن اول با نتایج آزمایشگاهی، از دو مش با ابعاد مختلف استفاده شد به صورتی که در فاصله‌های نزدیکتر به آبشکن‌ها، مش‌ها ریزتر بوده و با دور شدن از آبشکن‌ها مش‌ها درشت‌تر می‌شوند. این مش‌ها به روش تو در تو در هم قرار داده شده‌اند و پس از تست‌های مکرر به عنوان مناسب ترین مدل مش برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. مش بزرگتر کل کانال را در بر گرفته است، ابعاد این مش در همه‌ی جهات  $2/5$  سانتی متر و تعداد این مش‌ها  $192000$  می‌باشد. نسبت ابعاد مش در جهات گوناگون (X,Y,Z) در بیشترین حالت

جدول (۲): مقایسه‌ی میزان آبشستگی مدل عددی در پای آبشکن‌ها با نتایج آزمایشگاهی

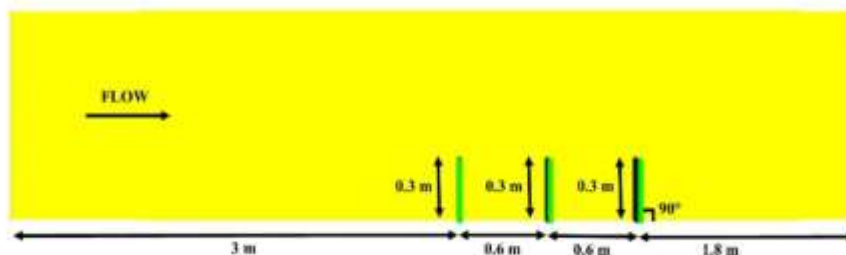
Test	$d_{s1}$	$d_{s2}$	$d_{s3}$	MAE	RMSE	$R^2$
Experimental	۰/۱۵۶	۰	۰/۰۲۶	-	-	-
$E_1$ FLOW-3D	۰/۱۲۳	۰/۰۰۵	۰/۰۲۳	۰/۰۱۶۲	۰/۰۲۱۴	۰/۹۱۲



شکل (۱): مقایسه‌ی نتایج فرسایش مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی  
(A) پروفیل عرضی در  $X=6.16m$  (B) پروفیل طولی در  $Y=0.35m$

اول و مبنا در نظر گرفته شد. در ادامه به گونه‌ای که حجم مصالح مورد استفاده در ساخت مجموع آبشکن‌ها نسبت به مدل شماره ۱ تغییر نکند، مدل‌های شماره ۲ تا ۸ مانند جدول ۳ در نظر گرفته شد. در این مدل‌ها آبشکن اول تا سوم به ترتیب، ۴۰، ۳۰ و ۲۰ سانتی‌متر و به ضخامت ۳ سانتی‌متر و فاصله بین آن‌ها مانند مدل شماره ۱، ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. زوایای آبشکن‌ها نسبت به پایین‌دست جریان می‌باشد.

در ادامه برای بررسی تأثیر تغییر طول و تغییر زوایای آبشکن‌ها بر میزان آبشستگی از مدل عددی استفاده شد. شرایط بستر و مش‌بندی، شرایط مرزی و اولیه و همچنین مدل آشفتگی مانند مدل اعتبارسنجی شده در نظر گرفته شد. کانالی به طول ۶ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، در نظر گرفته شد. ابتدا آبشکن‌ها با طول مساوی و برابر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر با فاصله‌ای به میزان دو برابر طول آبشکن‌ها و برابر ۶۰ سانتی‌متر (شکل ۲) به عنوان مدل



شکل (۲): پلان مدل شماره ۱ (مدل مبنا)

جدول (۳): معرفی مدل‌های آبشکن‌های مورد بررسی

شماره مدل	زاویه آبشکن‌ها	طول آبشکن اول (cm)	طول آبشکن دوم (cm)	طول آبشکن سوم (cm)	فاصله آبشکن‌ها (cm)	ضخامت آبشکن‌ها (cm)	میزان تنگ شدگی (%)
۱	۹۰	۳۰	۳۰	۳۰	۶۰	۳	۳۰
۲	۴۵	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۲۸
۳	۶۰	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۳۵
۴	۷۵	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۳۷
۵	۹۰	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۴۰
۶	۱۰۵	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۳۷
۷	۱۲۰	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۳۵
۸	۱۳۵	۴۰	۳۰	۲۰	۶۰	۳	۲۸

### ارائیه نتایج

عمق فرسایش متعلق است به آبشکن مدل شماره ۲ که این میزان برابر با ۷/۷ سانتی متر است که نسبت به آبشکن عمود با طول مساوی مقدار ۵۵/۲۳ درصد و نسبت به آبشکن عمود با طول نامساوی مقدار ۴۹/۶۷ درصد کاهش یافته است. همچنین آبشکن‌های با زاویه ۱۳۵ درجه و با طول نامساوی، بعد از آبشکن با زاویه ۴۵ درجه با عمق آبشستگی ۹/۲ سانتی متر کمترین میزان آبشستگی را دارا هستند. این آبشکن‌ها نسبت به آبشکن عمود با طول مساوی بیشترین عمق فرسایش را ۴۶/۵۱ درصد و نسبت به آبشکن عمود با طول نامساوی بیشترین عمق فرسایش را ۳۹/۸۷ درصد کاهش داده اند.

نتایج نهایی مدل‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. بیشترین عمق فرسایش با افزایش زاویه، افزایش پیدا کرده بطوری که در زاویه ۹۰ درجه، عمق فرسایش به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۵/۳ سانتی متر رسیده و بعد از آن با افزایش زاویه این مقدار کاهش پیدا میکند. لیکن در زاویه ۱۳۵ درجه مقدار آن به اندازه ۱/۵ سانتی متر بیشتر از زاویه ۴۵ درجه است. از دیگر نکات قابل توجه می‌توان به عمق فرسایش حداکثری تقریباً برابر در زاویه‌های ۷۵ و ۱۰۵ درجه اشاره کرد، که به ترتیب ۱۲/۴ و ۱۲/۸ سانتی متر می‌باشند. ولی می‌توان گفت که در زاویه ۷۵ درجه فرسایش زودتر به پایداری می‌رسد که

معیار "تغییرات آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر در زمانی معادل ۵ درصد کل زمان" به عنوان معیاری برای توقف محاسبات در نظر گرفته شد. به طور تقریبی پس از ۶۰۰ ثانیه، تغییرات بستر و جریان در مدل‌ها به تعادل رسیدند. در آبشکن‌های با طول مساوی زمان به تعادل رسیدن جریان بسیار طولانی است. در حالی که در آبشکن‌های با طول نامساوی رفتارهای متفاوتی دیده می‌شود. در مدل شماره ۵ همانند همتای خود با طول مساوی، میزان فرسایش با افزایش زمان به میزان کمی ادامه پیدا می‌کند. در مدل‌های ۲ و ۸، رسیدن به تعادل زمان بسیار کمی نسبت به دیگر مدل‌ها نیاز دارد. همچنین می‌توان بیان داشت که بیشتر از ۸۵ درصد فرسایش آبشکن‌ها با طول نامساوی در ۳۰ درصد اول بازه زمانی رخ می‌دهد. در حالی که این عدد در آبشکن با طول مساوی حدود ۸۴٪ می‌باشد. این اعداد نشان می‌دهند که در آبشکن‌های با طول نامساوی فرسایش سریع‌تر رخ داده و به پایداری می‌رسد. آبشکن‌های عمود با طول مساوی و زاویه ۹۰ درجه دارای بیشترین فرسایش و به اندازه ۱۷/۲ سانتی متر می‌باشند. بعد از آن بیشترین عمق فرسایش متعلق است به آبشکن‌ها در مدل شماره ۵ با مقدار ۱۵/۳ سانتی متر است. کمترین میزان

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

سابق به آن رسیده و در نتیجه تغییر خاصی در فرسایش پای آبشکن سوم رخ نمی‌دهد.

هر چقدر این سری آبشکن‌ها به زاویه قائم نسبت به جریان نزدیک‌تر می‌شوند بیشتر در مقابل جریان قرار می‌گیرند و در نتیجه عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. به طوری که با افزایش ۱۵ درجه ای زاویه نسبت به مدل شماره ۲ عمق فرسایش از ۷/۷ سانتی متر با افزایش ۳۲/۵ درصدی به ۱۰/۲ سانتی متر می‌رسد. هم‌چنین چاله‌ی آبشستگی به سمت دیواره بالایی کانال پیشروی می‌کند. بیشترین میزان رسوب گذاری از ۲/۹ سانتی متر در مدل شماره ۲، به ۳/۷ سانتی متر در مدل شماره ۳ افزایش پیدا می‌کند که این حاکی از افزایش ۲۷/۵ درصدی رسوب‌گذاری می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش زاویه‌ها تا ۹۰ درجه، چاله‌ی فرسایش علاوه بر این که در جهت Y توسعه پیدا کرده، در جهت X هم توسعه پیدا می‌کند.

با توجه به فرسایش کمتر نشان از برتری این آبشکن‌ها دارد. یکی از دلایلی که می‌توان برای افزایش مقدار فرسایش در زوایای مجاور ۹۰ درجه ذکر کرد، افزایش مقدار تنگ شدگی می‌باشد که باعث افزایش سرعت و در نتیجه باعث افزایش میزان فرسایش می‌شود. با این حال به علت قرارگیری آبشکن‌ها در زاویه‌های مختلف نسبت به جریان، گردابه‌های تشکیل شده در اطراف این آبشکن‌ها متفاوت است که باعث تغییر در چرخه‌ی فرسایش و رسوب گذاری می‌شود و باعث می‌شود که میزان فرسایش در این سری از آبشکن‌ها متفاوت شود. با متمایل شدن آبشکن‌ها به زاویه قائم در جهت جریان، جریان به آبشکن اول برخورد کرده، باعث کاهش بیشتر سرعت و انرژی می‌شود که خود این امر باعث کاهش فرسایش در پای آبشکن دوم می‌شود. با کاسته شدن انرژی، به دلیل آرام‌تر بودن جریان گردابه ای، رسوب گذاری در بین آبشکن اول و دوم افزایش می‌یابد. اما به دلیل نسبتاً دور بودن آبشکن سوم، جریان همانند مدل

جدول (۴): نتایج آبشستگی پای آبشکن‌ها در مدل‌ها

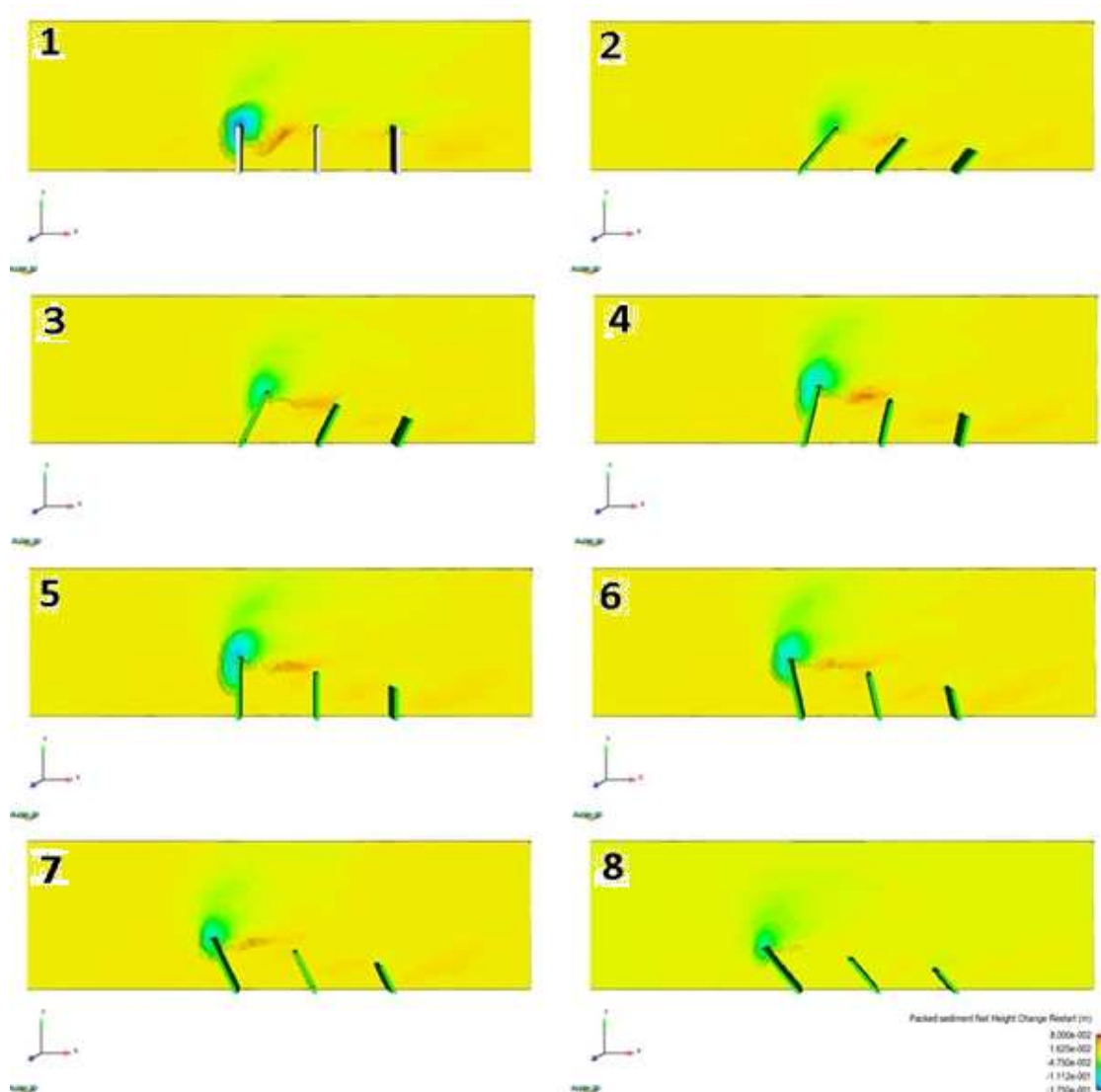
شماره مدل	آبشستگی پای آبشکن اول (cm)	آبشستگی پای آبشکن دوم (cm)	آبشستگی پای آبشکن سوم (cm)	بیشترین عمق آبشستگی (cm)
۱	۱۷/۲	۲/۷۸	۴/۶۱	۱۷/۲
۲	۷/۷	۲/۴۱	۲/۵	۷/۷
۳	۱۰/۲	۲/۱۲	۲/۵۱	۱۰/۲
۴	۱۲/۴	۰/۳۵	۲/۳۷	۱۲/۴
۵	۱۵/۳	۰/۱	۱/۹	۱۵/۳
۶	۱۲/۸	-۰/۱	۲/۵۶	۱۲/۸
۷	۱۱/۲	۰	۱/۷۲	۱۱/۲
۸	۹/۲	۰/۶۵	۱/۸	۹/۲

کرد. در حالت ۱ (سه آبشکن با طول مساوی) گسترش چاله‌ی فرسایش کمتر است در حالی که در حالت ۵ (سه آبشکن قائم با طول نامساوی) برخلاف حالت قبلی گسترش چاله تا ۲/۵ برابر بیشتر است. لیکن آرایش طول نامساوی برای آبشکن‌ها نه تنها باعث کاهش عمق آبشستگی در پای آبشکن اول شده، بلکه میزان

در شکل ۳ نتایج حاصل از آبشستگی و رسوب گذاری در پلان آبشکن‌ها، از آبشکن شماره‌ی ۱ تا ۸ نشان داده شده است. در مقایسه پلان کلی فرسایش و رسوب گذاری در آبشکن‌های با طول‌های نامساوی و آبشکن‌های با طول مساوی، که هر دو حالت عمود بر جریان می‌باشند (حالات ۱ و ۵)، می‌توان نکاتی را ذکر

بیشتر بوده ولی حداکثر ارتفاع رسوب گذاری در اغلب موارد بین ۶ تا ۴۸ درصد کمتر می‌باشد. این امر به دلیل پر شدن چاله‌ی فرسایش آب شکن دوم در این آبشکن‌ها است. مشخص است که بلند بودن آبشکن اول در طول نامساوی باعث انحراف جریان می‌شود. همچنین نامساوی بودن طول‌های آبشکن دوم و سوم باعث می‌شود این جریان بصورت منظم تری در عرض کانال پخش شود و خود این موضوع باعث کاهش فرسایش و افزایش رسوب گذاری می‌شود.

آبشستگی در پای آبشکن دوم و سوم را نیز کاهش داده است. این مقدار در پای آبشکن سوم ۵۸ درصد و در پای آبشکن دوم ۹۶ درصد می‌باشد. در عین حال مقایسه ی دو حالت ۱ و ۵ نشان می‌دهد که چاله‌ی آبشستگی در حالت آرایش طول نامساوی برای آبشکن‌ها دارای فاصله‌ی بیشتری از دیواره است. این امر به معنای حفاظت بهتر کرانه (وظیفه‌ی اصلی آبشکن) می‌باشد. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، در آبشکن‌های با طول نامساوی میزان رسوب گذاری کلی تا ۲ برابر



شکل (۳): پلان فرسایش و رسوبگذاری کف در مدل‌های ۱ تا ۸



می‌کند. هم‌چنین میزان رسوب‌گذاری در بین آبشکن‌ها در حالت آبشکن‌های با طول نامساوی حدود ۲ برابر بیشتر از حالت آبشکن‌های با طول مساوی است.

- در مقایسه‌ی آبشکن‌های با طول‌های نامساوی و آبشکن‌های با طول مساوی، که هر دو حالت عمود بر جریان می‌باشند (حالات ۱ و ۵)، مشاهده می‌شود که در حالت ۱ (سه آبشکن با طول مساوی) گسترش چاله‌ی فرسایش کمتر است در حالی که در حالت ۵ (سه آبشکن قائم با طول نامساوی) برخلاف حالت قبلی گسترش چاله تا ۲/۵ برابر بیشتر است.

- در ادامه‌ی مقایسه‌ی آبشکن‌های عمود بر ساحل با طول‌های مساوی و نامساوی، دیده می‌شود که انتخاب طول‌های نامساوی برای آب‌شکن‌ها نه تنها باعث کاهش عمق آبشستگی در پای آبشکن اول شده است، بلکه میزان آبشستگی در پای آبشکن دوم و سوم نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. در پای آبشکن سوم این مقدار ۵۸ درصد و در پای آبشکن دوم ۹۶ درصد می‌باشد که نشان از کارایی مؤثرتر این مدل چیدمان آبشکن دارد.

- در آبشکن‌های با طول نامساوی بیشترین ارتفاع رسوب‌گذاری در برخی موارد بین ۸ تا ۶۱ درصد کمتر از آبشکن‌های با طول مساوی می‌باشد. دلیل این امر فرسایش کمتر، پرشدن چاله‌ی فرسایش موضعی پای آبشکن دوم و پخش رسوبات در گستره‌ای با مساحت بیشتر می‌باشد.

دلیل رسوب‌گذاری بیشتر در آبشکن با طول نامساوی این است که جریان آرام‌تر در اطراف آبشکن‌های دوم و سوم می‌باشد.

در مدل شماره‌ی ۸، با اینکه میزان بیش‌ترین ارتفاع رسوب‌گذاری از سایر مدل‌ها تا ۵۷ درصد می‌تواند کمتر می‌باشد، اما میزان رسوب‌گذاری در نقاط مختلف تا ۴۰ درصد بیش‌تر است. در این حالت دیده می‌شود که چاله‌ی فرسایش نسبت به حالت‌های پیش‌تر در جهت X و Y پخش شدگی حدوداً ۶۰ درصد، کمتری دارد. با افزایش زاویه، میزان آبشستگی کاهش پیدا می‌کند به طوری که مشاهده می‌شود در برخی موارد با تغییر ۱۵ درجه زاویه، آبشستگی تا ۸۰ درصد کاهش پیدا می‌کند و تا جایی پیش می‌رود که در زاویه‌ی ۱۰۵ درجه این فرسایش به رسوب‌گذاری در آبشکن دوم تبدیل می‌شود ولی فرسایش در آبشکن سوم افزایش پیدا می‌کند و به بیشترین مقدار فرسایش در بین جمیع حالات می‌رسد. با افزایش این زاویه، مجدداً این مقدار کاهش پیدا می‌کند.

### خلاصه و نتیجه‌گیری:

در این مقاله اعتبارسنجی مدل نرم‌افزاری توسط مقایسه‌ی نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. نتایج نشان از دقت قابل قبول مدل عددی داشته است. پس از اعتبارسنجی مدل، با هدف تأثیر زاویه‌ی آبشکن‌ها بر روی آبشستگی بستر، سه آبشکن با طول نامساوی در مسیر جریان قرار داده شد و در ۷ زاویه‌ی مختلف آبشستگی بستر اندازه‌گیری شد که خلاصه نتایج آن به شرح زیر است:

- با تغییر زاویه‌ی چینش آبشکن‌های با طول نامساوی نسبت به جریان از ۹۰ درجه به ۱۳۵ درجه، میزان آبشستگی بستر نیز کاهش پیدا می‌کند. در این حالت میزان عمق آبشستگی موضعی در حدود ۳۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

- نتایج نشان می‌دهد که با تغییر جهت‌گیری آبشکن‌های با طول نامساوی از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه (کاهش ۱۲ درصدی میزان تنگ‌شدگی)، بیشترین عمق آبشستگی در پای آبشکن اول تا ۵۰ درصد کاهش پیدا

## منابع:

- Acharya, A. and Duan, J.G., 2011, Three dimensional simulation of flow field around series of spur dikes. In World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability (pp. 2085-2094).
- Basser, H., Karami, H., Shamshirband, S., Akib, S., Amirmojahedi, M., Ahmad, R., Jahangirzadeh, A. and Javidnia, H., 2015, Hybrid ANFIS-PSO approach for predicting optimum parameters of a protective spur dike. *Applied Soft Computing*, 30, pp.642-649.
- Chang et al. 2013, Two-Dimensional Numerical Investigation for Short- and Long-Term Effects of Spur Dikes on Weighted Usable Area of *Rhinogobius candidianus* (Goby)
- Duan, J.G. and Nanda, S.K. (2006) Two-Dimensional Depth-Averaged Model Simulation of Suspended Sediment Concentration Distribution in a Groyne Field. *Elsevier, J. Hydrol.*, 327,426-437.
- Flow Science Inc. 2015, FLOW-3D User's manual. Version 11.1
- Ghodsian, M. and Vaghefi, M. 2009 Experimental Study on Scour and Flow Field in a Scour Hole Around a T-Shape Spur Dike in a 90° Bend. *Intl. J. Sedim. Res.*, 24 (2), 145-158.
- Giglou, A.N., Mccorquodale, J.A. and Solari, L., 2017. Numerical study on the effect of the spur dikes on sedimentation pattern. *Ain Shams Engineering Journal*. (In Press) <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.02.007>
- Karami, H., Ardeshir, A., Saneie, M., Behzadian, K., Jalilsani F., 2008 Reduction of local scouring with protective spur dike
- Karami, H., Ardeshir, A., Saneie, M. and Salamatian, S.A., 2012, Prediction of time variation of scour depth around spur dikes using neural networks, *Journal of Hydroinformatics*, 14(1), pp.180-191
- Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A., & Hosseini, S. H. 2014, Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. *Water and Environment Journal*, 28(1), 124-134.
- Kuhnle, R.A., Jia, Y. and Alonso, C.V. (2008) Measured and Simulated Flow near a Submerged Spur Dike. *ASCE, J. Hydr. Eng.*, 137 (7), 916-924.
- Li, G., Lang, L. and Ning, J., 2013. 3D Numerical Simulation of Flow and Local Scour around a Spur Dike, In IAHR World Congress (pp. 1-9)
- Mendoza-Cabrales, C. (1993). "Computation of flow past a cylinder mounted on a flat plate." *Proc. Hydraulic Eng.*, ASCE Reston, Va., 899-904.
- Shields, A. (1936), Application of the theory of similarity and turbulence research to the bed load movement, *Mitt. Preuss. Vets., Wasset Schiff*, 26, 5-24.
- Uijttewaal, W.S., 2005. Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: Laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), pp.782-791
- Van Rijn, L. C. (1987). Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport (pp. Communication-No). Delft: Waterloo pkundig Laboratorium.
- ZHANG, H. and NAKAGAWA, H., 2008. Scour around spur dyke: recent advances and future researches, *Annuals of disaster prevention research institute, Kyoto University*, No. 51B

## Investigation of bed morphological variations in channels with a group of parallel unequal spur dikes at various orientations

Saeed Abbasi<sup>۱</sup>, Hanif Pourshahbaz<sup>۲</sup>, Pouria Taghvai<sup>۳</sup>

### Abstract:

Spur dikes are structures which are constructed at an angle or perpendicular to flow to reduce flow velocity and bank erosion. As constricting structures, spur dikes narrow the flow channel and alter the flow structure in their vicinity, and develop vortices around the constricted region. In this paper the flow pattern alteration and bed morphological variation due to the various orientations of a group of parallel impermeable, non-submerged spur dikes having unequal lengths are numerically investigated. Numerical model validation is carried out utilizing experimental data. The results show that changing the orientation of spur dikes from 90° to 45° (reduction of channel width constriction by 12%), the maximum depth of scouring beneath the first spur dike is reduced by 50%.

**Keywords:** erosion, sedimentation, group of spur dikes, un-equal length, numerical simulation

---

\*- Assistant professor, Department of Civil Engg., University of Zanjan, Iran, [abbasi.saeed@znu.ac.ir](mailto:abbasi.saeed@znu.ac.ir).

<sup>۲</sup> Master of civil engineering, Young Researchers and Elite Club, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

<sup>۳</sup>Ph.D. candidate, Department of Civil Engg., University of Semnan, Iran