

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌یابی موقعیت آبشکن نفوذناپذیر مستقیم در کرانه‌ی مخالف استقرار تکیه‌گاه

محمد ثقفی زنجانی<sup>۱\*</sup>، سعید عباسی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۹

چکیده

فرسایش کرانه‌ی رودخانه‌ها از مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسی علم هیدرولیک است. استفاده از آبشکن‌ها، از جمله روش‌هایی است که به کنترل و کاهش فرسایش کمک می‌کند. در این مطالعه به منظور یافتن موقعیت بهینه استقرار آبشکن در کرانه‌ی رودخانه، شرایط جانمایی مختلف آن به صورت عددی بررسی شد. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار FLOW-3D بهره گرفته شد. نتایج عددی و آزمایشگاهی باهم مقایسه شده و این مقایسه نشان داد که نتایج عددی از تطابق نسبی خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. در این مطالعه میزان حفاظت از کرانه مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی‌ها با شش موقعیت قرارگیری مختلف آبشکن انجام شد. نتایج نشان داد که با تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین دست، آبشکن در محل استقرار  $d/L=1/834$ ، (آبشکن مستقر در فاصله ۶۶ سانتی‌متری بعد از شروع تکیه‌گاه) سطح بیشتری از کرانه را در برابر فرسایش محافظت نموده است. آبشکن در این موقعیت مقدار سطح فرسایش کرانه را در مقطع عرضی تا ۲۱/۶۵ درصد و در مقطع طولی تا ۱۷/۱۲ درصد کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: آبشکن، حفاظت کرانه، موقعیت استقرار آبشکن، FLOW-3D

مقدمه

(LES) برای جریانی با مقدار نسبتاً کم عدد رینولدز استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که نوسانات تنش برشی موضعی بستر حول مقادیر میانگین آن می‌تواند بسیار زیاد باشد، به خصوص در ناحیه زیر لوله‌های گردابی افشاندن می‌شوند که در بعضی مواقع با سایر گردابه‌ها نیز تعامل دارند. همچنین امکان تخمین شروع فرسایش را بر اساس توزیع آبی و میانگین سرعت اصطکاکی بستر و تخمین شدت نوسانات فشاری در بستر فراهم کرده است. عباسی و همکاران (۱۳۹۸) تغییرات مورفولوژی بستر در کانال‌های دارای سری آبشکن‌های موزی با طول‌های نامساوی و جهت‌گیری‌های مختلف را به صورت عددی و با کمک نرم‌افزار FLOW-3D مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد 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 می‌یابد. خلج و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی عددی و آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های چوگانی و مستقیم پرداختند. بررسی عددی در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D صورت گرفته است. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی انتهای دماغه برای آبشکن چوگانی و مستقیم با افزایش دبی جریان افزایش یافته است. همچنین عرض گودال آبشستگی در آبشکن مستقیم ۲/۲۵ و در آبشکن چوگانی دو برابر طول مؤثر آبشکن بود.

رودخانه‌ها تحت تأثیر پدیده‌ی فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که امر بسیار مهمی بوده و تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است. یکی از روش‌های متداول ساماندهی رودخانه و کنترل فرسایش کرانه‌ی آن، استفاده از آبشکن‌ها می‌باشد. ساخت آبشکن‌ها الگوی جریان را تحت تأثیر قرار داده و موجب انحراف خطوط جریان از دیواره‌های فرسایش‌پذیر به وسط رودخانه می‌شود و یا با کاهش سرعت، از شدت برخورد جریان با دیواره‌ها کاسته و قابلیت رسوب‌گذاری جریان را افزایش می‌دهد. بررسی رفتار رودخانه در حضور آبشکن و همچنین شرایط جریان و میزان عمق آبشستگی موضعی پیرامون آبشکن‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین بوده است.

ثبات و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی فیزیک جریان و نقش ساختارهای منسجم جریان در فرآیند آبشستگی در اطراف یک آبشکن قائم واقع در کانالی مستقیم و در شرایط شروع آبشستگی (بستر مسطح) پرداختند. به این منظور از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان

\*- نویسنده مسئول: (Email: mohammad.saghafi@znu.ac.ir)

دهد (Karami et al., 2014). کوکن و گوگاس تأثیرات جریان‌های گردابی اطراف آبشکن‌ها را بر روی تنش برشی بستر مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی جریان‌های مغشوش در اعداد رینولدز مختلف تنش برشی بستر را برای سه طول مختلف آبشکن مورد مقایسه قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش طول آبشکن‌ها جریان‌های گردابی وسیع‌تری ایجاد شده و تنش برشی بستر نیز بیشتر می‌گردد (Koken and Gogus, 2015). لی و همکاران اثر فاصله بین آبشکن‌های سری بر روی آبشستگی بستر و الگوی جریان را مورد تحقیق قرار دادند و بیان داشتند که عمق آبشستگی در حالت تعادل دینامیکی ثابت است و عمق آبشستگی بی‌بعد با زیاد شدن فاصله، افزایش می‌یابد (Lee et al., 2016). پورشهباز و همکاران آبشکن‌های سری ساده را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل کردند، آنان نتایج این مدل عددی را با مدل عددی SSIM مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که عدد فرود و نسبت  $U/U_{cr}$  بر دقت مدل‌سازی تأثیرگذار هستند و همچنین با هر بار افزایش دبی، مدل عددی مجدد باید واسنجی شود. علت این واسنجی مجدد نیز می‌تواند تغییر در بازه‌های زمانی متفاوت و شرایط مرزی جدید باشد (Pourshahbaz et al., 2017). کومار و همکاران آبشستگی اطراف آبشکن‌های ساده و T شکل را بررسی کردند. ایشان در نتایج خود بیان داشتند که آبشکن T شکل در حفاظت از بستر و همچنین کاهش عمق آبشستگی و خرابی‌های سازه‌های آبی مؤثرتر است؛ بنابراین جاهایی که سازه‌های آبی باید حفاظت شود آبشکن T شکل پیشنهاد می‌شود و آبشکن ساده باید در مواقعی که انحراف و جابجایی جریان اهمیت دارد استفاده شود. علت این امر نیز هزینه بیشتر ساخت آبشکن T شکل بیان شده است (Kumar et al., 2018). گوناوان و پودپاراستیا در مطالعات میدانی خود بر روی ساحل سانور بالی، گسترش و تغییرات ساحل را تحت اثر وجود آبشکن ساده شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق تأثیر وجود آبشکن در کناره‌های ساحل در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد که نشان‌دهنده ترسیب خوب رسوب در بین آبشکن‌های ساده است که به‌خوبی توانسته از کناره‌ها محافظت کند (Gunawan and Pudjaprasetya, 2018). کومار و اوچا به مطالعه آبشستگی نزدیک بستر پیرامون یک آبشکن L شکل مستغرق پرداختند. در این تحقیق سرعت عرضی ناشی از گردابه‌ی نعل اسبی و سرعت قائم در حال افزایش، ناشی از شارش رو به پایین در ناحیه گردابی شکل مشاهده شد. طبق نتایج بدست آمده در محل اتصال آبشکن، تنش برشی بستر برابر  $4/78$  برابر افزایش یافته است (Kumar and Ojha, 2019). دوتا و کالیتا عملکرد آبشکن تیغه‌ای (مستقیم) و T شکل، به عنوان سازه‌های رودخانه‌ای را در یک کانال خم مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی عددی فرآیندهای جریان، از نرم‌افزار MIKE21C استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، در یک کانال خم مقدار رسوب‌گذاری در میدان آبشکن T شکل بیشتر از

حداکثر عمق آبشستگی پیرامون دماغه در دو آبشکن مستقیم و چوگانی به ترتیب  $0/87$  و  $0/79$  برابر طول مؤثر آبشکن مشاهده شد. به‌طور کلی ابعاد گودال آبشستگی پیرامون آبشکن چوگانی کمتر از آبشکن مستقیم بود. اقبال زاده و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر طول آبشکن مستغرق بر الگوی جریان در کانال باز مستقیم با استفاده از مدل عددی FLOW-3D را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش طول آبشکن سرعت بیشینه طولی در دماغه آبشکن افزایش یافت. در حالت آبشکن با طول  $0/1$  متر این سرعت  $24$  درصد و در حالت آبشکن با طول  $0/4$  متر این سرعت  $59$  درصد نسبت به سرعت متوسط، افزایش را نشان داد. همچنین با افزایش طول آبشکن سطح آب در بالادست افزایش می‌یابد. اسدی و همکاران (۱۳۹۵) الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف آبشکن قائم و زاویه‌دار را با مدل FLOW-3D بررسی کردند. نتایج نشان داد هر چه زاویه آبشکن در جهت جریان (از حالت  $90$  درجه به  $30$  درجه) کمتر گردد عمق آبشستگی نیز در نوک آبشکن کمتر شده و همچنین محدوده آبشستگی اطراف آبشکن نیز کوچک‌تر می‌گردد؛ بنابراین نتایج نشان داد که به‌کار بردن آبشکن با زاویه  $30$  درجه نسبت به حالت  $90$  درجه بهترین نتیجه و همچنین کمترین عمق آبشستگی را دارد. واقفی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی عددی اثر دبی بر الگوی جریان حول آبشکن ساده مستغرق در کانال رو باز با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش دبی، سرعت حداکثر طولی در جلو دماغه و عمق جریان بالادست آبشکن افزایش یافت. در دبی‌های کمتر آهنگ تغییرات بیشتر و در دبی‌های بالاتر آهنگ تغییرات ملایم‌تر شد. همچنین نسبت عمق آب در بالادست به عمق آب در پایین‌دست نیز با افزایش دبی، افزایش یافت. ژانگ و همکاران الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی در اطراف آبشکن تخت نفوذناپذیر با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش عددی را در شرایط آب زلال بررسی نمودند (Zhang et al., 2009). ترگاچی و همکاران بر اساس مشاهدات خود در اطراف سری آبشکن‌ها به این نتیجه رسیدند که در شرایط هیدرولیکی یکسان، میزان فرسایش در اطراف آبشکن بالادست در حالت نفوذناپذیر نسبت به حالت نفوذپذیر بسیار قابل توجه‌تر است (Teraguchi et al., 2010). کرمی و همکاران برای کاهش عمق آبشستگی آبشکن‌های سری از یک آبشکن محافظ در بالادست استفاده کردند، نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد آبشکن محافظ اگر به درستی طراحی شود، قادر خواهد بود تا متوسط حداکثر عمق آبشستگی را در آبشکن‌های سری کاهش دهد. این محققان همچنین پارامترهای ابعادی را برای طراحی بهینه آبشکن محافظ ارائه کردند (Karami et al., 2011). در تحقیق دیگر کرمی و همکاران آبشستگی اطراف آبشکن‌های سری ساده را بررسی کردند که نتیجه این مطالعه آن است که  $80$  درصد آبشستگی در  $20$  درصد اول زمان آزمایش رخ می

دیرانسیل حاکم در حرکت سیال (معادلات ۳ تا ۵) را حل می‌کند.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (1)$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + G_y + G_z$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_x u v}{x V_F} = - \frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_x + G_y + G_z$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_x + G_y + G_z$$

که در این معادلات  $V_F$ : مقدار نسبت حجم باز به جریان،  $\rho$ :

دانسیتة سیال،  $(u, v, w)$ : سرعت در راستای  $(x, y, z)$  و  $R_{SOR}$  تابع

چشمه می‌باشند.  $(A_x, A_y, A_z)$ : مقادیر نسبت مساحت،  $(G_x, G_y, G_z)$ :

شتاب ثقل و  $(f_x, f_y, f_z)$ : شتاب‌های لزجت،  $(b_x, b_y, b_z)$ : افت‌های

جریان در محیط متخلخل، به ترتیب در جهات  $(x, y, z)$  می‌باشند. در

رابطه (۲)،  $A$ : متوسط مساحت جریان،  $U$ : متوسط سرعت جریان در

جهت  $(x, y, z)$  و  $F$  تابع حجم سیال می‌باشد. بخش آخر از معادلات

(۳) تا (۵) مقدار پاشش جرم در سرعت صفر را نشان می‌دهد. در

نرم‌افزار FLOW-3D از دو روش عددی برای شبیه‌سازی استفاده

می‌شود که عبارت‌اند 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

مدل‌سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزهای هندسی استفاده

می‌کند. برای محاسبات بخش رسوبی، بار معلق و بار بستر به‌طور

جداگانه محاسبه می‌شود. بار رسوبی معلق توسط حل معادله انتقال-

انتشار مطابق رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + W \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

که در آن  $U_i$  میانگین سرعت رینولدز جریان،  $W$  سرعت سقوط

ذرات رسوبی،  $X$  بعد فضای عمومی،  $Z$  اندازه در جهت عمودی و  $\Gamma$

ضریب اغتشاش می‌باشد. ضریب اغتشاش برابر با ویسکوزیته‌ی

جریان گردابی است که از مدل آشفستگی  $K-\epsilon$  محاسبه می‌گردد.

### تحلیل ابعادی

پارامترهای متعددی در عملکرد آبشکن‌ها جهت حفاظت کرانه

مؤثر می‌باشند. به‌منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر آبشستگی

کرانه، تحلیل ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شده است. عوامل

مؤثر در این زمینه، طبق رابطه (۷) عبارت‌اند از:

$$f \left( V, V_C, \rho_w, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, B, L, d, L_g, \frac{\Delta A}{A_0} \right) = 0 \quad (7)$$

که در آن  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $V_C$ : سرعت بحرانی،  $\rho_w$ : جرم

آبشکن تیغه‌ای بوده و عملکرد بهتری دارد. همچنین به‌منظور مقایسه

عملکرد آبشکن T شکل و تیغه‌ای، سه پارامتر فاصله متوسط خط‌القدر

از آبشکن‌ها، حداکثر عمق آبشستگی در دماغه آبشکن‌ها و حداکثر

عمق رسوب‌گذاری در میدان آبشکن در نظر گرفته شده است که با

مقایسه این پارامترها برای هر دو آبشکن T شکل و مستقیم، مشخص

شد که آبشکن T شکل برای پایداری کرانه‌ی خارجی بهتر است (Dutta and Kalita, 2019).

پندی و همکاران به بررسی تجربی

تغییرات عمق آبشستگی زمانی پیرامون آبشکن تیغه‌ای و پارامترهای

که عمدتاً بر روی کارایی آبشکن تأثیر می‌گذارد، پرداختند و نشان

دادند که تغییرات عمق آبشستگی با افزایش سرعت آستانه، عدد فرود  $b_2$

و کم عمق شدن جریان، افزایش و با افزایش سایز ذرات رسوبی

کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات عمق آبشستگی

پیرامون دیواره آبشکن و نقطه اتصال آبشکن به کرانه همواره ۸

الی ۳۰ درصد کمتر از دماغه آبشکن است (Pandey et al., 2020).

مطالعات انجام‌شده در گذشته در زمینه‌ی الگوی جریان،

آبشستگی موضعی پیرامون آبشکن‌ها و بهره‌گیری از آبشکن‌ها برای

حفاظت کرانه‌ی رودخانه‌ها، راه را برای انجام تحقیقات بیشتر در

زمینه‌های گسترده‌تری هموار می‌سازد. تاکنون بیشتر محققین

مطالعات خود را بر روی موضوعات آبشستگی موضعی دماغه‌ی

آبشکن‌ها و آبشستگی موضعی پیرامون آبشکن‌های تیغه‌ای، L شکل

و T شکل در کانال‌های مستقیم و خم با مقطع مستطیل انجام

داده‌اند. همچنین مطالعات مفصلی بر روی محافظت کرانه‌ی

رودخانه‌ها در برابر فرسایش به‌واسطه سازه‌های حفاظتی مختلف

صورت گرفته است. علی‌رغم کارهای مفید انجام شده در این زمینه‌ها،

تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تأثیر موقیعت قرارگیری آبشکن تیغه‌ای بر

حفاظت کرانه‌ی رودخانه به‌صورت عددی صورت نگرفته است. انتخاب

موقیعت بهینه استقرار آبشکن، پیش‌زمینه حصول بازده بالای آبشکن

در حفاظت از کرانه می‌باشد. بدین منظور، در این تحقیق به بررسی

انتخاب موقیعت بهینه استقرار آبشکن در موقیعت‌های مختلف برای

حصول حفاظت بهتر کرانه‌ی یک رودخانه با مقطع دوزنقه‌ای، با

استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم

معادلات حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنتم است

که نرم‌افزار FLOW-3D نیز مانند دیگر برنامه‌ها از حل آن‌ها برای

محاسبات هیدرولیکی جریان استفاده می‌کند. رابطه (۱) معادله

پیوستگی، رابطه (۲) معادله حجم جریان و همچنین روابط (۳) تا (۵)

نیز معادلات مومنتم در مختصات کارتزین را نشان می‌دهند. نرم‌افزار

FLOW-3D با استفاده از روش عددی حجم محدود، معادلات

$$G = \frac{\Delta A}{A_0} = f\left(\frac{d}{L}\right) \quad (10)$$

درصد حفاظت کرانه  $\left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)$  به صورت تابعی از پارامتر بدون بعد  $\frac{d}{L}$  بررسی می‌شود. در این پژوهش درصد حفاظت در مقطع عرضی با پارامترهای  $A_1$  و  $A_3$  ارائه شده در جدول (۴) و در مقطع طولی با پارامتر  $B_1$  ارائه شده در جدول (۵)، نشان داده شده است.

### معرفی مدل آزمایشگاهی

آزمایش مورد نظر توسط کرمی و همکاران (Karami et al., 2014) در یک کانال مستطیلی به طول ۱۴ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱ متر واقع در آزمایشگاه دانشگاه امیرکبیر صورت پذیرفت. در این مدل آزمایشگاهی فلوم دارای سه آبشکن غیرمستغرق و نفوذناپذیر می‌باشد که هر یک از آبشکن‌ها به طول ۲۵ سانتی‌متر بوده و عمود بر جریان نصب شده است. موقعیت استقرار اولین آبشکن در فاصله ۶/۱۶ متری از ابتدای کانال بوده و فاصله بین آنها دو برابر طول آبشکن می‌باشد. در این آزمایش عمق جریان ورودی در ۱۵ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شده است. همچنین کف کانال به وسیله رسوبات یکسان ( $\sigma_g < 1.4$ ) با ضخامت ۰/۳۵ متر، میانگین قطر دانه‌ای  $(d_{50})$  ۰/۹۱ میلی‌متر، چگالی نسبی  $(S_s)$  ۲/۶۵ و انحراف استاندارد هندسی  $(S_g)$  ۱/۳۸ پوشانده شده است (شکل ۱).

مخصوص آب،  $d_{50}$ : اندازه متوسط ذرات بستر،  $\sigma_g$ : انحراف معیار ذرات بستر،  $\rho_s$ : جرم مخصوص رسوبات،  $B$ : عرض مقطع،  $L$ : طول تکیه‌گاه،  $d$ : فاصله از نقطه مبدأ (ابتدای تکیه‌گاه که در فاصله ۱۰/۵ متری از ابتدای کانال هست)،  $L_g$ : طول آبشکن،  $\frac{\Delta A}{A_0}$ : درصد حفاظت کرانه می‌باشند.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_n - A_0}{A_0} \quad (8)$$

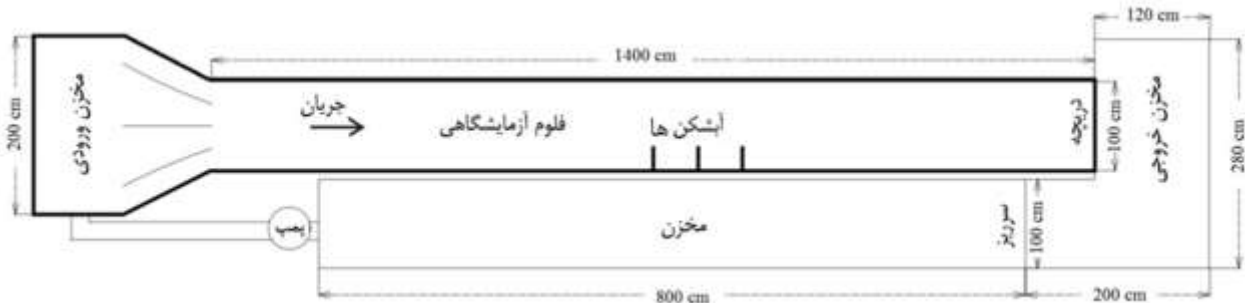
از رابطه (۸) بدست می‌آید:

که در رابطه بالا،  $A_n$  سطح فرسایش کرانه در هر مدل و  $A_0$  سطح فرسایش کرانه در مدل مینا می‌باشند. به عبارتی می‌توان گفت رابطه (۸) برای سنجش سطح فرسایش کرانه هر مدل نسبت به حالت مینا می‌باشد.

با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام می‌توان رابطه (۷) را به صورت بدون بعد، به شکل رابطه (۹) نمایش داد:

$$f\left(\frac{V_C}{V}, \frac{d_{50}}{L}, \sigma_g, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{B}{L}, \frac{d}{L}, \frac{L_g}{L}, \frac{\Delta A}{A_0}\right) = 0 \quad (9)$$

با حذف پارامترهایی که در این پژوهش ثابت فرض شده‌اند و همچنین پارامترهایی که از اهمیت کمتری برخوردارند، رابطه (۱۰) حاصل می‌شود.



شکل ۱- نمایش شماتیک کانال مورد مطالعه (Karami et al., 2014)

جریان برحسب متر بر ثانیه،  $U/U_{cr}$ : نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات،  $Fr$ : عدد فرود،  $d_{s1}$  و  $d_{s2}$  و  $d_{s3}$  به ترتیب عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های اول، دوم و سوم برحسب متر و  $V$ : حجم رسوبات فرسایش یافته برحسب متر مکعب می‌باشد.

### مدل عددی و اعتبارسنجی

در جدول (۱) جزئیات و نتایج آزمایش T1 که برای سنجش مدل عددی مورد استفاده واقع شده بیان گردیده است؛ که در آن  $Q$ : دبی آزمایش برحسب متر مکعب  $Y$ : عمق جریان برحسب متر،  $U$ : سرعت

جدول ۱- مشخصات و نتایج آزمایش‌های T1

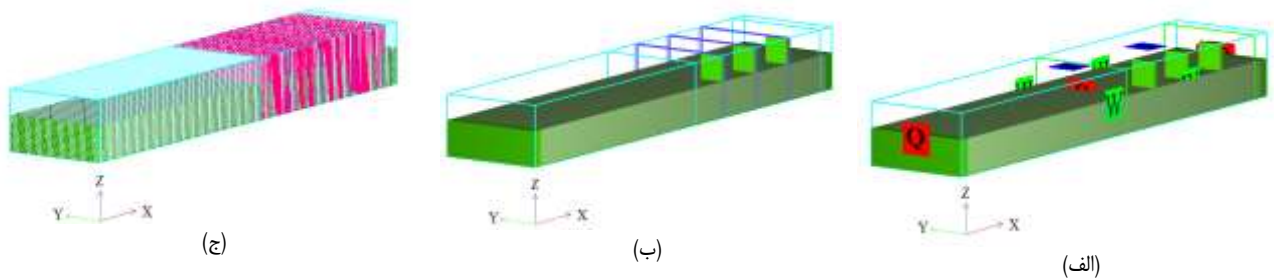
Test No.	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Y$ (m)	$U$ (m/s)	$U/U_{cr}$	$Fr$	$d_{s1}$ (m)	$d_{s2}$ (m)	$d_{s3}$ (m)	$V$ (m <sup>3</sup> )
T1	۰/۰۲۵	۰/۱۵	۰/۲۳۳	۰/۶۵	۰/۱۹	۰/۱۵۶	.	۰/۰۲۶	۰/۰۱۶۵

استفاده شده است. مدل RNG از بسط و توسعه مدل استاندارد مبتنی

در این مدل‌سازی از مدل آشفتگی  $\epsilon - k$  با توسعه (RNG)

مناسب‌ترین مدل مش انتخاب شده است. در این روش مش‌بندی، در فاصله‌های نزدیک‌تر به آبشکن‌ها، مش‌ها ریزتر بوده و علاوه بر این از مش پلان‌ها استفاده شد که در شکل (۲-ب) قابل رؤیت می‌باشد و در فاصله‌های دورتر از آبشکن‌ها، ابعاد مش‌ها درشت در نظر گرفته شد. تعداد ابعاد مش بزرگتر ۲۱۰۱۲۵ می‌باشد و تعداد مش کوچکتر نیز ۷۷۱۶۳۰ می‌باشد. برای صرفه‌جویی در زمان مدل‌سازی، این مش بلوک فاصله ۵/۷ تا ۷/۸ متری کانال را که عملاً قسمت آبشکن و پیرامون آن‌را که آبشستگی در این ناحیه رخ می‌دهد، در برمی‌گیرد. به‌طور کلی از ۹۸۱۷۵۵ مش برای مدل‌سازی این کانال استفاده شده است که نمایی از آن در شکل (۲-ج) قابل مشاهده است.

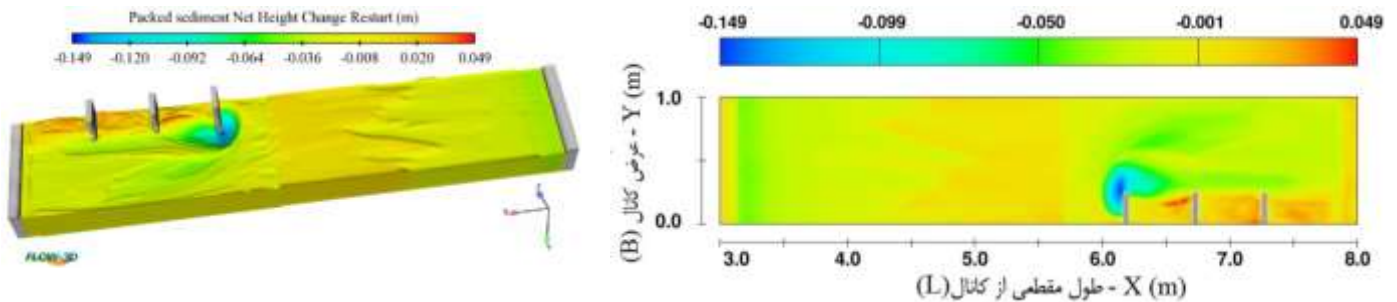
بر روش تجدید نرمال‌سازی گروهی (RNG) بدست آمده است. برای حل معادلات ناویر استوکس، نیاز به شرایط اولیه و مرزی خواهد بود. در مرز ورودی فوم از شرط مرزی دبی ثابت استفاده شده است. در اینجا با توجه به شرایط آزمایشگاهی، از شرط دبی ثابت ۰/۰۳۵ مترمکعب بر ثانیه و شرط ارتفاع آب در ورودی برابر ۰/۵ متر از کف فوم و تراز صفر استفاده شده است. در طرفین (دیوارها) و کف کانال از شرایط مرزی دیوار استفاده گردید. در مرز فوقانی و مرزهای داخلی فوم شرط تقارن و در مرز خروجی شرایط تداوم در نظر گرفته شده است (شکل ۲-الف). در این مدل‌سازی، با توجه به فرسایش در مرزها و یا عدم تشکیل مناسب گردابه‌ها در مش‌های لب به لب، مش‌های تو در تو متشکل از دو مش با ابعاد مختلف به‌عنوان



شکل ۲- اجزای مدل عددی (الف) شرایط مرزی (ب) مش پلان‌ها (پ) مش‌بندی مدل

آزمایشگاهی و عددی جهت ارزیابی هرچه دقیق‌تر به‌صورت کمی مقایسه گردیده‌اند.

نمای دوبعدی و سه‌بعدی از انتهای شبیه‌سازی این مدل در شکل‌های (۳) قابل مشاهده می‌باشند. همچنین در ادامه، نتایج



شکل ۳- نتیجه شبیه‌سازی عددی مدل T1، پلان و توپوگرافی بستر فرسایش یافته

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - N_i| \quad (12)$$

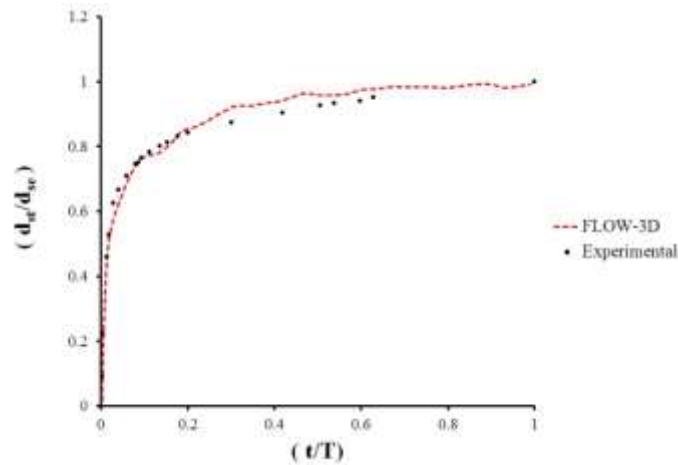
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (13)$$

که در آن‌ها  $E_i$  داده‌های آزمایشگاهی،  $N_i$  داده‌های حاصل از نتایج مدل‌های عددی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. از همگرایی توپوگرافی بستر و حصول تعادل بستر از حیث فرسایش و رسوب‌گذاری

با هدف مقایسه کمی نتایج بدست آمده از مدل FLOW-3D با نتایج آزمایشگاهی کرمی و همکاران از سه شاخص آماری  $MAE$ ،  $R^2$  و  $RMSE$  که به ترتیب در روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) بیان گشته‌اند، استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2} \quad (11)$$

شبهه‌سازی دارد و همچنین نسبتاً افقی بودن شکل نمودار در انتهای شبهه‌سازی، حاکی از تعادل فرسایش و رسوب‌گذاری در بستر است.



شکل ۴- نمودار بی بعد فرسایش-زمان

است تا بتوان فرسایش ناشی از انحراف جریان (به واسطه تکیه‌گاه) به سمت کرانه را بررسی کرده و این فرسایش را توسط بهینه‌یابی موقعیت استقرار آبشکن، کنترل و کاهش داد. برای مدل‌سازی از داده‌های هیدرولیکی و رسوبی کار آزمایشگاهی کرمی و همکاران که پیش از این ذکر شد، استفاده گردید؛ با این تفاوت که مقطع کانال دیگر مستطیلی نبوده، بلکه به صورت دوزنقه‌ای شکل با شیب دو به یک (افقی به عمودی) در نظر گرفته شده است (شکل ۷- الف). در مدل اول، تنها یک تکیه‌گاه با رعایت میزان تنگ‌شدگی در مسیر حرکت جریان و در مخالف کرانه جانمایی شد تا اثر این تکیه‌گاه بر میزان انحراف جریان و فرسایش کرانه بررسی شود. این مدل بدون آبشکن به عنوان مبنای مقایسه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در مدل مبنای، عقب نشینی رسوب کرانه در تراز  $Z = 0.3775$  m (۲/۷۵ سانتی‌متری تراز بستر) نسبت به سایر نقاط تراز کرانه حداکثر بوده و مقطع طولی در این تراز، به عنوان مقطع طولی بحرانی از حیث فرسایش کرانه در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقطع عرضی A-A (۹/۲ سانتی‌متر بعد از تکیه‌گاه) به دلیل حداکثر بودن آبشستگی‌ها حول این مقطع به عنوان مقطع عرضی بحرانی انتخاب شده است (شکل ۷- ب).

با هدف بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری آبشکن بر حفاظت کرانه در برابر فرسایش، تک آبشکن‌های مورد استفاده با طول و حجم بتن‌ریزی برابر بوده و تا پنجه کرانه در تراز  $Z = 0.35$  m امتداد می‌یابد (شکل ۸- الف) و در موقعیت‌های مختلف قبل، مقابل و بعد تکیه‌گاه در کرانه‌ی مخالف تکیه‌گاه قرار می‌گیرند که شامل ۶ موقعیت بوده (شکل ۸- ب) و جزئیات آن مطابق جدول (۳) ارائه شده است.

در انتهای شبهه‌سازی، نمودار بی بعد فرسایش-زمان مدل عددی با مدل آزمایشگاهی کرمی و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۴). مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که نرم‌افزار دقت خوبی در

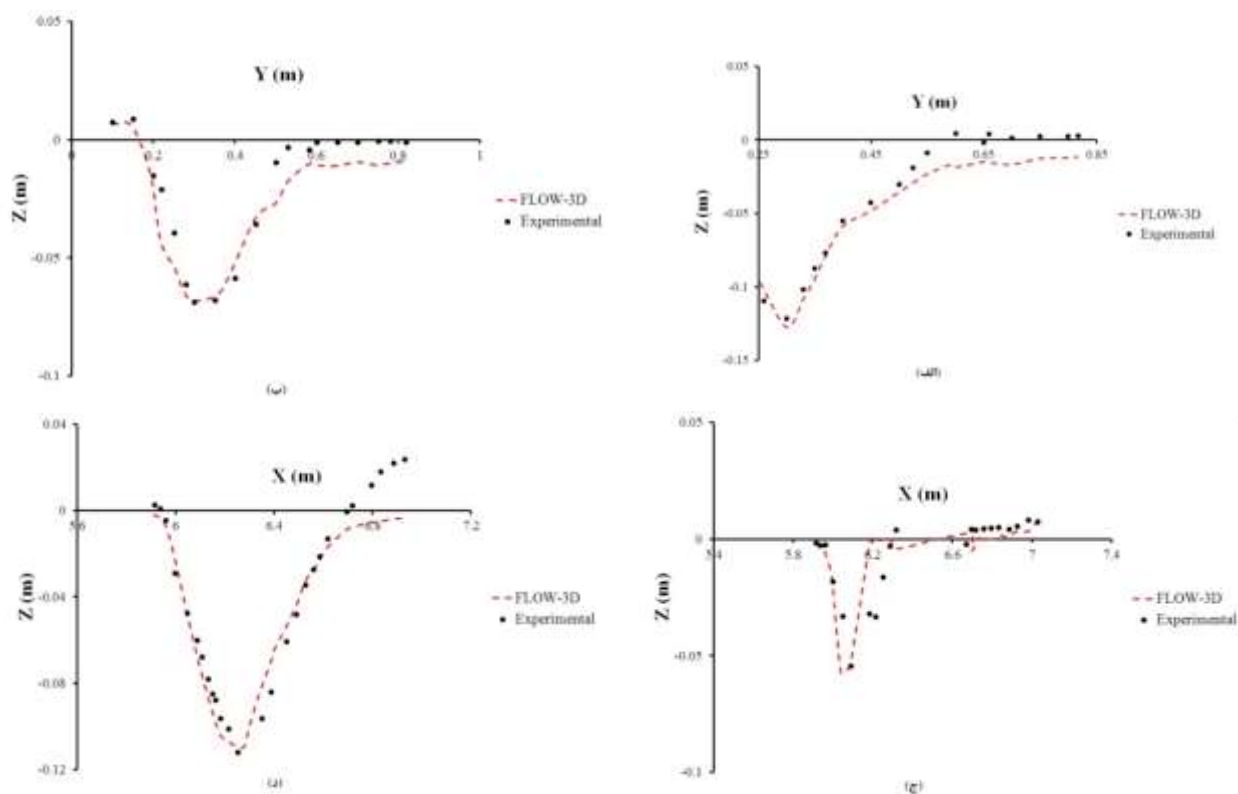
برای مقایسه تغییرات بستر، دو مقطع عرضی و دو مقطع طولی انتخاب و در مجموع عمق آبشستگی در ۸۴ نقطه، همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت. در این شکل میزان آبشستگی به ترتیب در مقاطع  $X = 6/41$ ،  $X = 6/16$ ،  $X = 0/15$  و  $Y = 0/35$  در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در مقایسه نتایج آبشستگی در کل ۸۴ نقطه مدل عددی با نتایج متناظر در مدل آزمایشگاهی، پارامترهای آماری  $R^2$ ، MAE و RMSE به ترتیب  $0/92$ ،  $0/153$  و  $0/186$  محاسبه شد که نشانگر دقت قابل قبول مدل عددی ساخته شده در FLOW-3D است.

مقایسه عمق آبشستگی پای آبشکن اول تا سوم حاصل از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۳)، حداکثر عمق آبشستگی در مدل عددی برابر  $14/9$  سانتی‌متر بوده که در مقایسه با حداکثر عمق آبشستگی مدل آزمایشگاهی ( $15/6$  سانتی‌متر)، دارای  $4/48$  درصد خطا می‌باشد.

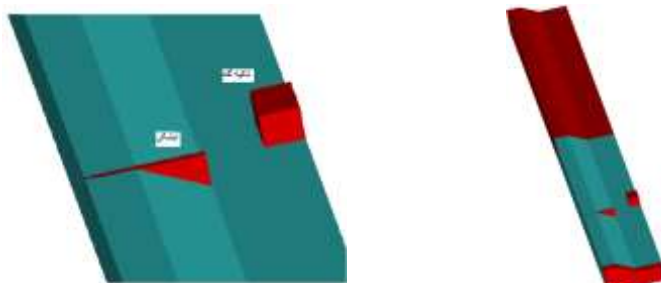
جدول ۲- مقایسه میزان آبشستگی پای سه آبشکن در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

Test	$d_{s1}$ (m)	$d_{s2}$ (m)	$d_{s3}$ (m)
آزمایشگاهی	0/156	0/00000	0/260
عددی	0/149	0/0405	0/241

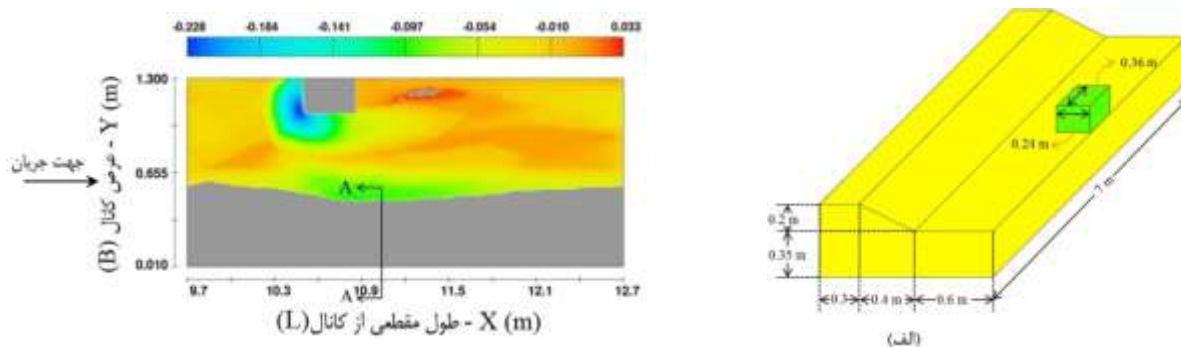
در این پژوهش به بررسی عددی انتخاب موقعیت بهینه استقرار آبشکن در کرانه‌ی رودخانه‌ای با مقطع دوزنقه‌ای، پرداخته شده است. در این مطالعه مطابق شکل (۶) و (۷- الف)، در روبروی کرانه‌ی رودخانه با رعایت میزان تنگ‌شدگی مقطع، یک تکیه‌گاه جانمایی شده



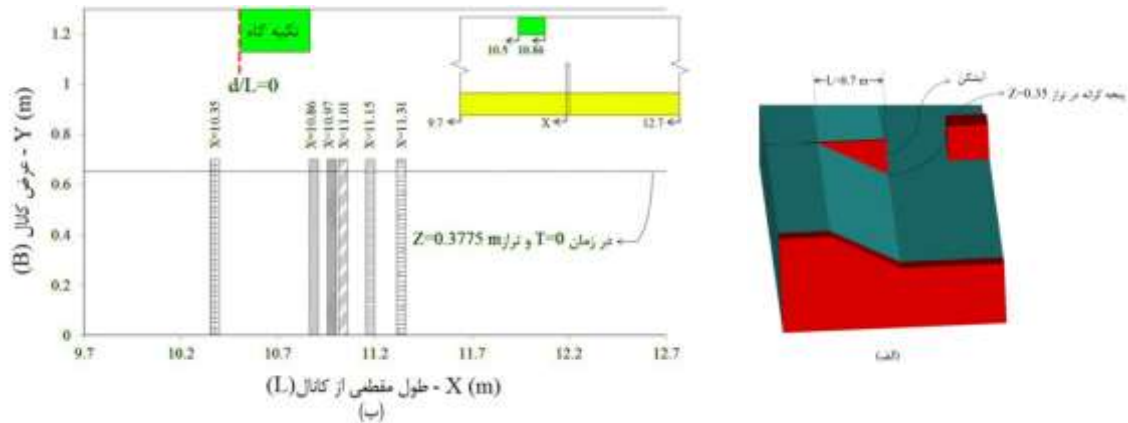
شکل ۵- مقایسه نتایج پروفیل آبشستگی موضعی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی الف)  $X=6/16$ ، ب)  $X=6/41$ ، ج)  $Y=0/15$  و د)  $Y=0/35$



شکل ۶- نمایی از کانال با آبشکن مستقر در کرانه‌ی روبروی تکیه‌گاه



شکل ۷- الف) ابعاد مقطع ذوزنقه‌ای مورد استفاده در مدل‌سازی ب) بخشی از کانال در تراز  $Z=0/3775$  m



شکل ۸- الف) نمایی از جزئیات طول آبشکن ب) موقعیت‌های مختلف قرارگیری تک آبشکن

شده در شکل (۸-ب) و  $L$  طول تکیه‌گاه که برابر مقدار ثابت ۳۶ سانتی‌متر است، می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار منفی  $d/L$  بیانگر قرارگیری آبشکن قبل از تکیه‌گاه می‌باشد.

مطابق شکل (۸-ب) و جدول (۳)، جزئیات موقعیت قرارگیری آبشکن با نسبت بی‌بعد  $d/L$  نشان داده شده است که مطابق تحلیل ابعادی ذکر شده،  $d$  فاصله از نقطه مبدأ (نقطه  $d/L = 0$  نشان داده

جدول ۳- جزئیات مدل‌های عددی و موقعیت‌های مختلف استقرار آبشکن در کرانه‌ی روبروی تکیه‌گاه

شماره مدل	نام مدل	زاویه آبشکن (درجه)	موقعیت قرارگیری آبشکن (cm)	جزئیات موقعیت قرارگیری آبشکن ( $d/L$ )
۱	بدون آبشکن (مدل مبنا)	-	-	-
۲	G-P10.35-90	۹۰	$X=10/35$	-۰/۴۱۷
۳	G-P10.86-90	۹۰	$X=10/86$	۱
۴	G-P10.97-90	۹۰	$X=10/97$	۱/۳۰۵
۵	G-P11.01-90	۹۰	$X=11/01$	۱/۴۱۷
۶	G-P11.16-90	۹۰	$X=11/16$	۱/۸۳۴
۷	G-P11.31-90	۹۰	$X=11/31$	۲/۲۵

$A_4$ ، برابر مقدار ۱۰۰ نمی‌شود. همان‌طور در جدول (۴) مشاهده می‌شود، آبشکن G-P11.16-90 با  $d/L=1/834$  بیشترین درصد و آبشکن G-P10.97-90 با  $d/L=1/305$  کمترین درصد از سطح رسوب کرانه و کل مقطع عرضی را محافظت نموده است.

الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه‌ها بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره‌ی آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف تکیه‌گاه به وجود می‌آید که عملکرد آنها باعث حفر گودالی در اطراف تکیه‌گاه می‌شود. توسعه این گودال باعث خالی شدن زیر پی‌ها و در نتیجه خرابی آنها و خرابی پل می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود. یکی برخورد جریان به تکیه‌گاه و دیگری جدا شدن جریان از آن می‌باشد. الگوی جریانی که در اطراف تکیه‌گاه شکل می‌گیرد به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط می‌باشد. برخورد جریان به تکیه‌گاه، گردابه نعل اسبی را شکل داده و جدایی جریان از آن باعث به وجود آمدن گردابه‌هایی که به گردابه

در تمام مدل‌ها، شرایط مدل‌سازی مانند شرایط بیان شده در اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. به‌طور تقریبی با توجه به شرایط بیان شده در بخش قبل، تعداد کلی مش در هرکدام از مدل‌ها برابر ۹۸۱۴۳۲ می‌باشد.

## نتایج

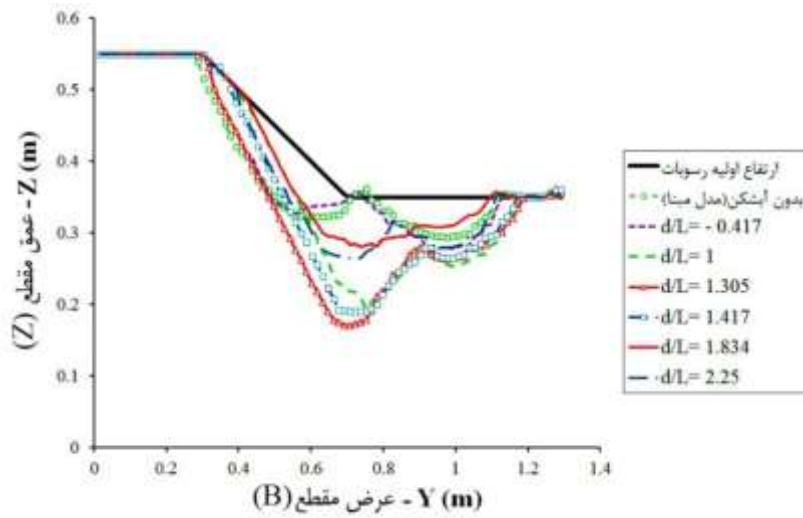
پروفیل عرضی کانال در مقطع بحرانی آبشستگی حداکثر کرانه (مقطع A-A) در شکل (۹) قابل مشاهده بوده و درصد رسوب برجای‌مانده کرانه ( $A_1$ )، درصد رسوب فرسایش یافته کرانه ( $A_2$ )، درصد رسوب برجای‌مانده در کل مقطع عرضی ( $A_3$ ) و درصد رسوب فرسایش یافته کل مقطع عرضی کانال ( $A_4$ ) مطابق شکل (۱۰)، در جدول (۴) ارائه شده است.

لازم به ذکر است درصد رسوب فرسایش یافته کل مقطع عرضی ( $A_4$ ) از رابطه (درصد رسوب‌گذاری + درصد رسوب برجای‌مانده) - ۱۰۰، حاصل می‌شود. به همین علت می‌باشد که حاصل جمع  $A_3$  و

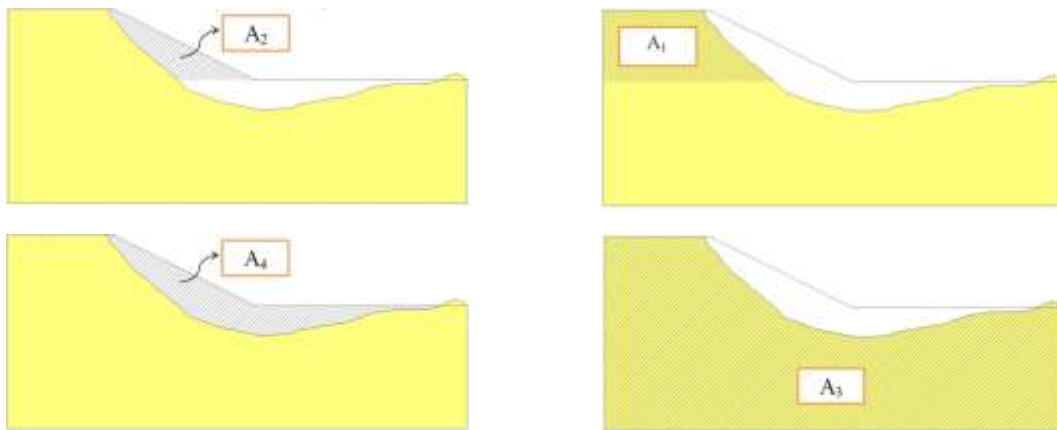


اینگونه بیان نمود که غالباً حفره آبشستگی پایین‌دست تکیه‌گاه به واسطه گردابه‌های برخاستگی و چاله آبشستگی بالادست تکیه‌گاه توسط گردابه‌های نعل اسبی توسعه می‌یابند.

برخاستگی موسومند، می‌شود. ولی به‌طور کلی می‌توان گردابه نعل اسبی را عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف تکیه‌گاه به‌ویژه در جلو آن دانست. همچنین با توجه به مطالعات محققین، می‌توان



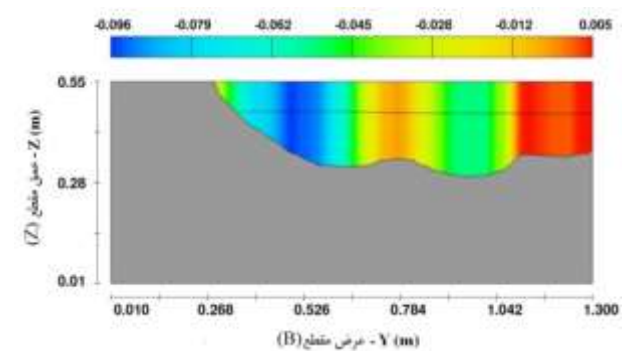
شکل ۹- پروفیل عرضی پس از آبشستگی در مقطع بحرانی آبشستگی A-A



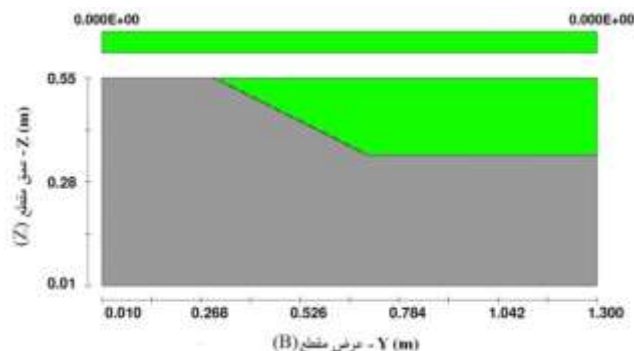
شکل ۱۰- تعاریف بخش‌های مختلف پروفیل عرضی آبشستگی مقطع

جدول ۴- درصد رسوب برجای مانده و فرسایش یافته در کرانه و کل مقطع عرضی در موقیعت‌های مختلف استقرار آبشکن

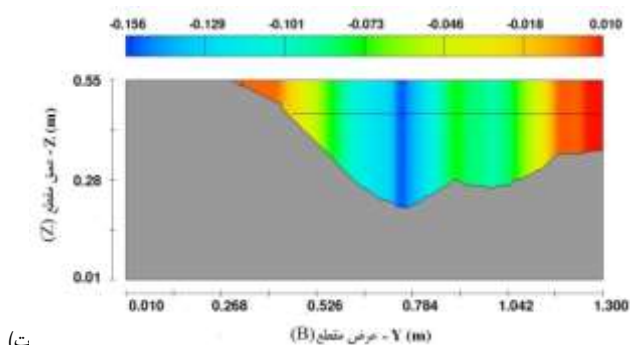
نام مدل	(%) A <sub>1</sub>	(%) A <sub>2</sub>	(%) A <sub>3</sub>	(%) A <sub>4</sub>
مدل‌سازی در لحظه T=0	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰
بدون آبشکن (مدل مبنا)	۷۳/۵۶	۲۶/۴۴	۹۲/۱۷	۷/۷۰
G-P10.35-90	۷۶/۸۰	۲۳/۲۰	۹۲/۱۶	۷/۷۶
G-P10.86-90	۸۹	۱۱/۰۰	۸۸/۰۷	۱۱/۸۴
G-P10.97-90	۷۶/۲۵	۲۳/۷۵	۸۳/۵۳	۱۶/۴۰
G-P11.01-90	۸۳/۹۹	۱۶/۰۱	۸۶/۴۱	۱۳/۵۲
G-P11.16-90	۸۹/۴۹	۱۰/۵۱	۹۳/۸۸	۶/۰۶
G-P11.31-90	۸۵/۲۹	۱۴/۷۱	۹۱/۴۶	۸/۴۶



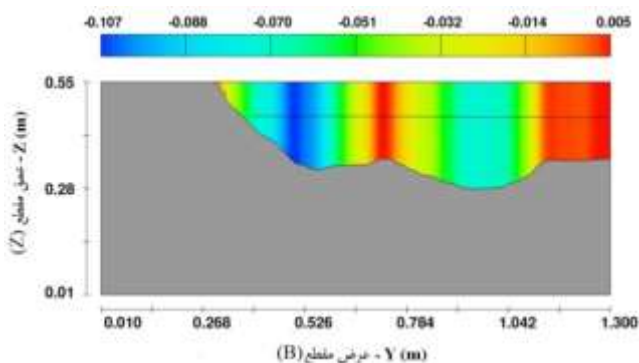
(ب) مدل مینا



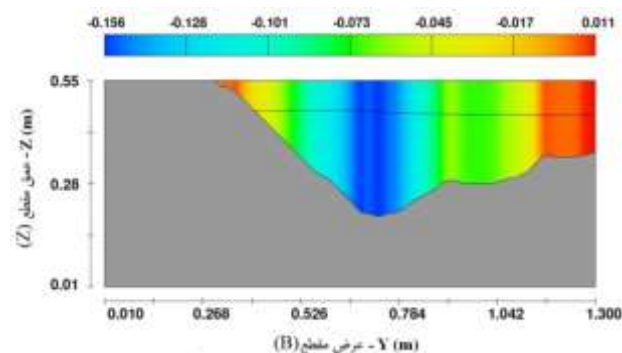
(الف) مدل سازی در لحظه  $T=0$



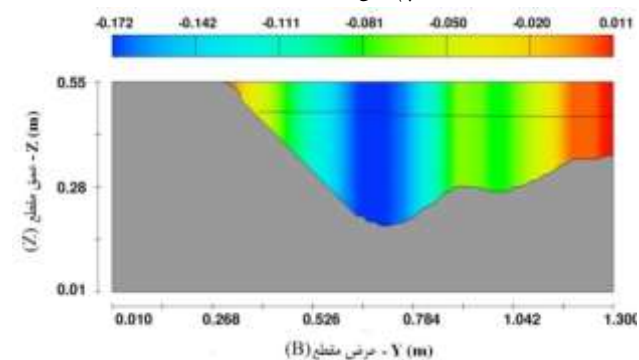
مدل G-P10.86-90



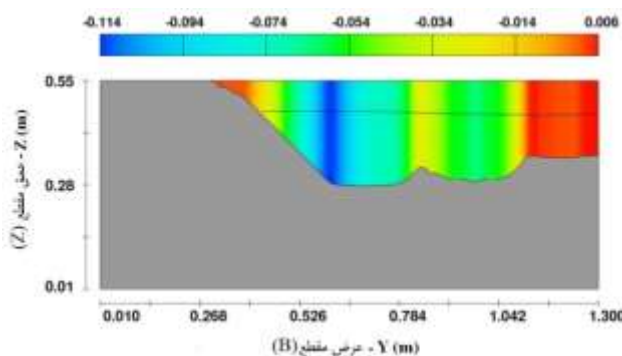
مدل G-P10.35-90 (پ)



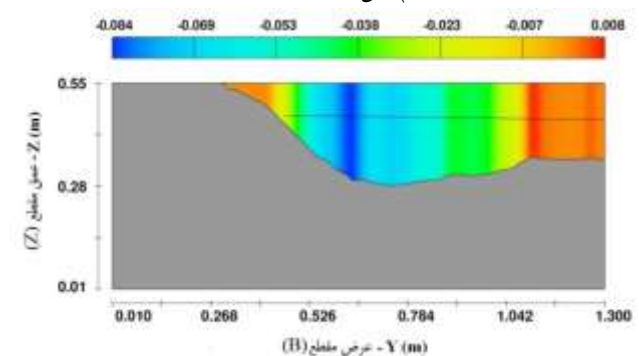
مدل G-P11.01-90 (ج)



مدل G-P10.97-90 (ث)



مدل G-P11.31-90 (ح)

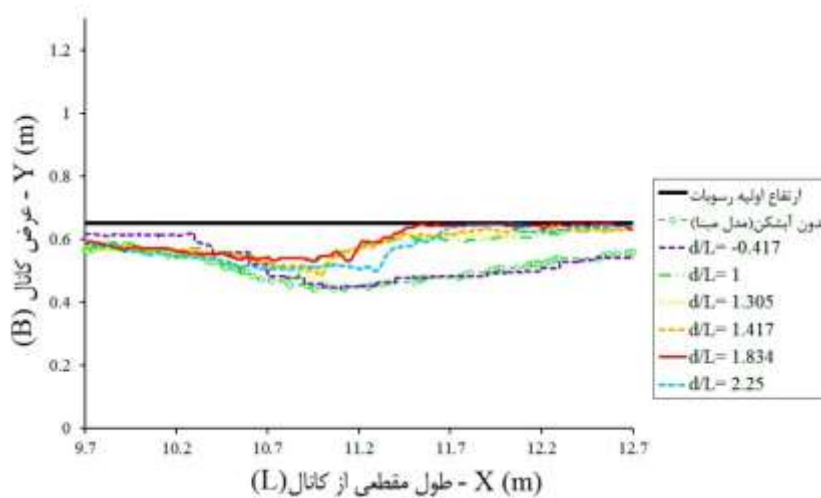


مدل G-P11.16-90 (چ)

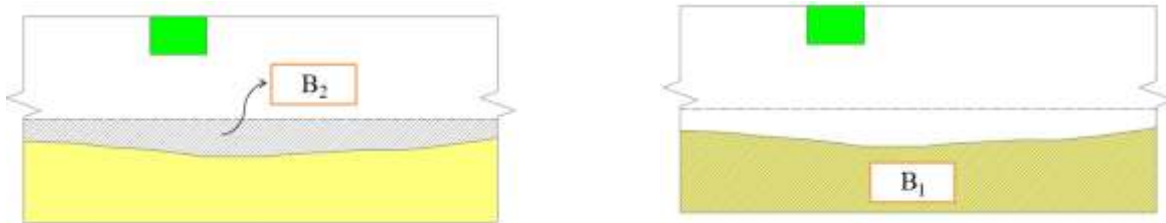
شکل ۱۱- پروفیل عرضی آبستتگی در مقطع A-A

بدست آمده است، حداکثر عمق آبشستگی برای هر مدل نیز در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج ذکر شده در جدول (۵) بیانگر این موضوع است که آبشکن G-P11.16-90 با  $d/L=1/834$  بیشترین درصد از سطح رسوب کرانه را در پروفیل طولی محافظت نموده و مقدار حداکثر عمق آبشستگی آن، حداقل است و علت این موضوع را می‌توان تأثیر این موقیعت قرارگیری آبشکن بر کم کردن شدت گردابه‌هایی که پیش‌تر ذکر شد دانست و آبشکن G-P10.35-90 با  $d/L=0/417$  کمترین درصد از رسوب کرانه را حفاظت کرده و مقدار حداکثر عمق آبشستگی این مدل از دیگر مدل‌ها بیشتر است.

از سویی دیگر پروفیل طولی بخشی از کانال در تراز  $m Z=0/3775$  (۲/۷۵ سانتی‌متری تراز بستر) که نسبت به سایر نقاط تراز کرانه، بیشترین آبشستگی رخ داده است در شکل (۱۲) و (۱۴) مشاهده می‌شود که درصد رسوب برجای مانده کرانه ( $B_1$ ) و درصد رسوب فرسایش یافته کرانه ( $B_2$ ) بخشی از کانال (شکل ۱۳)، طبق جدول (۵) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، حداکثر عمق آبشستگی در پای تکیه‌گاه رخ می‌دهد و از حیث پایداری تکیه‌گاه، باید عمق آبشستگی کنترل شده و به حداقل مقدار خود برسد. با توجه به مدل‌های شکل (۱۴) که از نرم‌افزار FLOW-3D



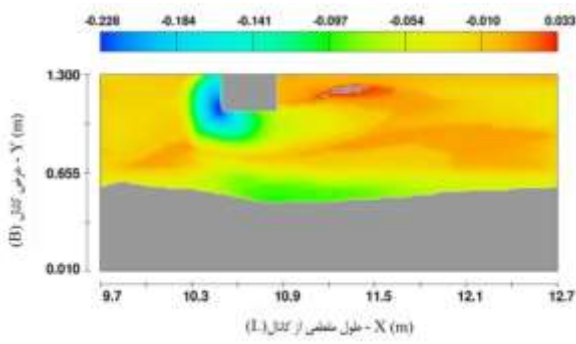
شکل ۱۲- پروفیل طولی کانال (در نمای پلان) در تراز  $m 0/3775$



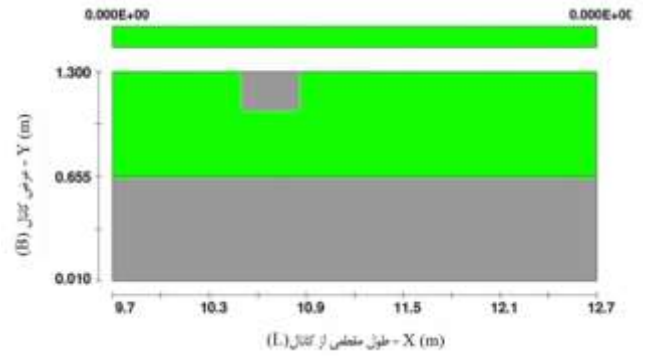
شکل ۱۳- تعاریف بخش‌های مختلف پروفیل طولی آبشستگی مقطع

جدول ۵- درصد رسوب برجای مانده و فرسایش یافته در کرانه پروفیل طولی کانال در موقیعت‌های مختلف استقرار آبشکن و مقدار حداکثر عمق

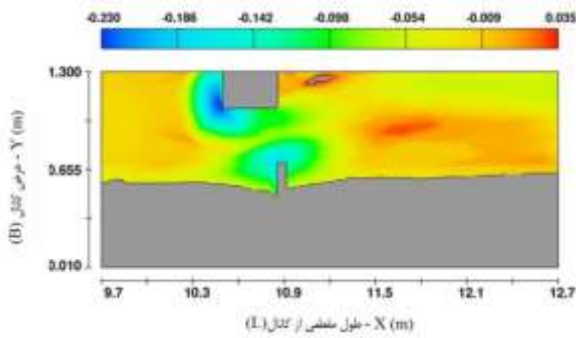
آبشستگی مقطع			
نام مدل	$B_1$ (%)	$B_2$ (%)	حداکثر عمق آبشستگی (m) (متر)
مدل‌سازی در لحظه $T=0$	۱۰۰		
بدون آبشکن (مدل مبنا)	۷۸/۱۶	۲۱/۸۴	۰/۲۲۸
G-P10.35-90	۸۰/۲۴	۱۹/۷۶	۰/۲۵۴
G-P10.86-90	۸۹/۱۴	۱۰/۸۶	۰/۲۳۰
G-P10.97-90	۸۸/۹۲	۱۱/۰۸	۰/۲۳۲
G-P11.01-90	۸۹/۷۵	۱۰/۲۵	۰/۲۳۲
G-P11.16-90	۹۱/۵۵	۸/۴۵	۰/۲۰۵
G-P11.31-90	۸۸/۳۴	۱۱/۶۶	۰/۲۲۶



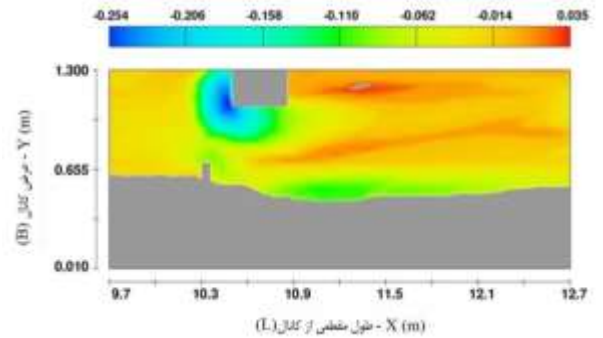
(ب) مدل مینا



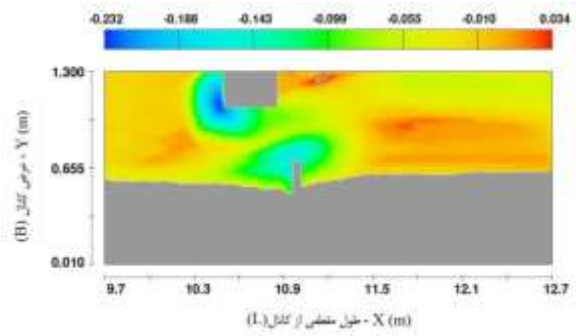
(الف) مدل سازی در لحظه T=0



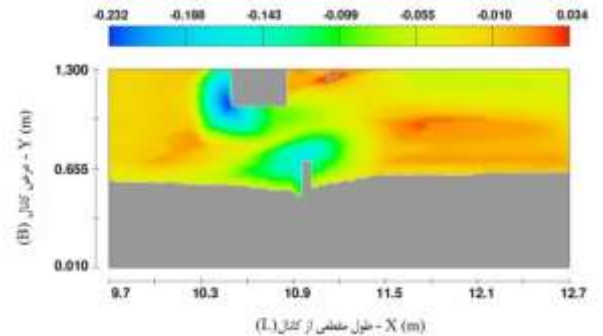
(ت) مدل G-P10.86-90



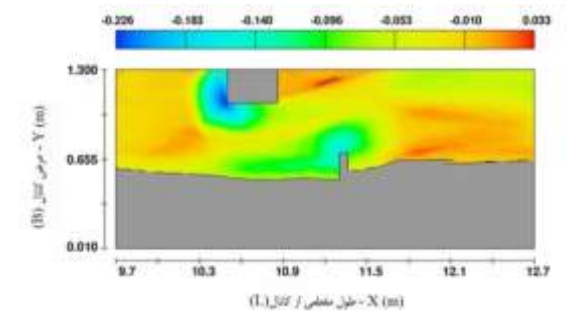
(پ) مدل G-P10.35-90



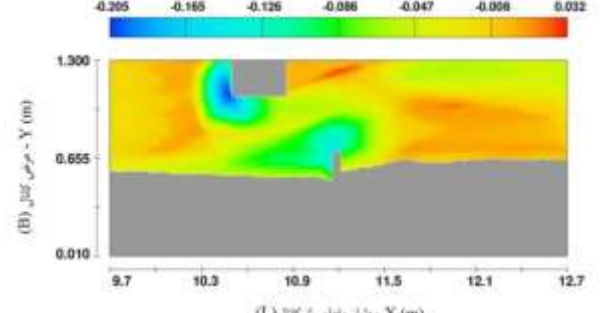
(ج) مدل G-P11.01-90



(ث) مدل G-P10.97-90

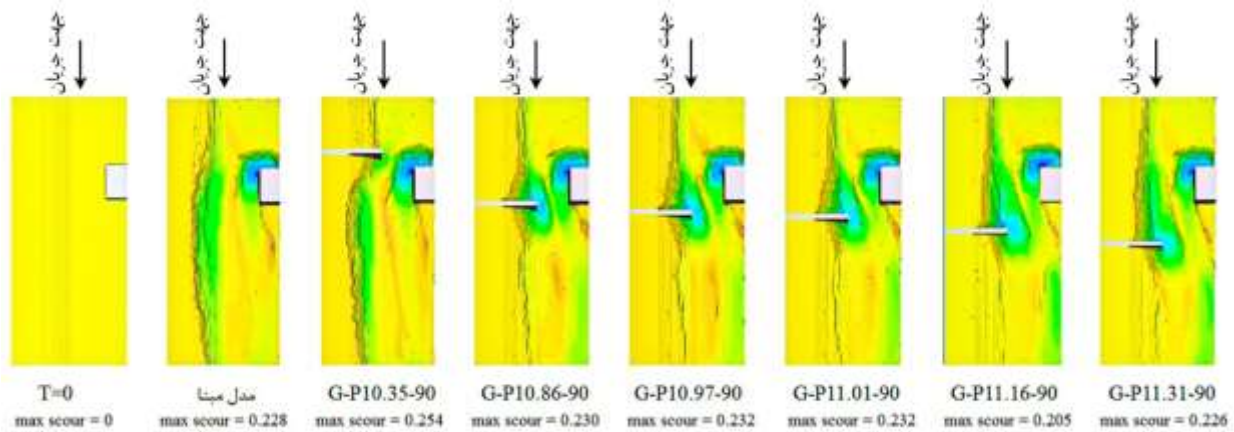


(ح) مدل G-P11.31-90



(ج) مدل G-P11.16-90

شکل ۱۴- پروفیل طولی بخشی از کانال در تراز  $Z=+3775$  m



شکل ۱۵- نمای سه‌بعدی پروفیل طولی بخشی از کانال در تراز  $Z=+۳۷۷۵$  m (واحد حداکثر عمق آبشستگی بر حسب متر می‌باشد)

جدول ۶- میزان حفاظت هر آبشکن از رسوب کرانه و کل مقطع عرضی نسبت به مدل مبنا

موقیعت آبشکن						نتایج حاصل شده
۲/۲۵	۱/۸۳۴	۱/۴۱۷	۱/۳۰۵	۱	-۰/۴۱۷	
$d/L=$	$d/L=$	$d/L=$	$d/L=$	$d/L=$	$d/L=$	
۱۵/۹۴	۲۱/۶۵	۱۴/۱۸	۳/۶۶	۲۰/۹۸	۴/۴۱	میزان حفاظت رسوب کرانه در پروفیل عرضی توسط هر آبشکن نسبت به مدل مبنا
-۰/۷۷	۱/۸۶	-۶/۲۵	-۹/۳۷	-۴/۴۵	-۰/۰۱	میزان حفاظت رسوب در کل پروفیل عرضی توسط هر آبشکن نسبت به مدل مبنا
۱۳/۰۳	۱۷/۱۲	۱۴/۸۳	۱۳/۷۶	۱۴/۰۴	۲/۶۶	میزان حفاظت رسوب کرانه در پروفیل طولی توسط هر آبشکن نسبت به مدل مبنا

جانمایی آبشکن به سمت پایین دست، آبشکن کارایی بهتری در حفاظت از کرانه را دارد و مشاهده می‌شود که از موقیعت  $d/L=1$  تا  $d/L=1/834$  میزان حفاظت کرانه به مرور بهبود می‌یابد و در موقیعت  $d/L=1/834$  ایده‌آل‌ترین نتایج را حاصل می‌دهد و از موقیعت  $d/L=1/834$  به سمت پایین دست، میزان حفاظت از کرانه روند نزولی پیدا می‌کند.

آبشکن مورد استفاده در موقیعت  $d/L=1/834$ ، در پروفیل عرضی مقطع بحرانی A-A، ۲۱/۶۵ درصد و در پروفیل طولی کانال ۱۷/۱۲ درصد از سطح رسوب کرانه را نسبت به مدل مبنا (بدون آبشکن) محافظت نموده است. علاوه بر این طبق جدول (۶)، مشاهده می‌شود که به جز موقیعت  $d/L=1/834$ ، در دیگر موقیعت‌ها درصد رسوب برجای مانده در کل پروفیل عرضی مقطع بحرانی نسبت به مدل مبنا منفی بوده و این بدین معناست که درصد رسوب فرسایش یافته نسبت به مدل مبنا بیشتر می‌باشد؛ اما درصد رسوب برجای مانده در کل پروفیل عرضی مقطع با آبشکن به موقیعت  $d/L=1/834$ ، ۱/۸۵۷ درصد بوده که نسبت به دیگر مدل‌ها، مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین مقدار حداکثر عمق آبشستگی آبشکن با موقیعت  $d/L=1/834$  حداقل و آبشکن با موقیعت  $d/L=-0/417$ ، حداکثر

در پایان نتایج حاصل شده از نمودار و جداول ارائه شده، در جدول (۶) به اختصار بیان شده است تا امر مقایسه کارایی هر موقیعت آبشکن نسبت به مدل مبنا (بدون آبشکن) آسان تر شود.

### نتیجه گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی موقیعت بهینه استقرار آبشکن برای حفاظت کرانه‌ی رودخانه با مقطع دوزنقه‌ای می‌باشد که می‌توان با توجه به نمودارها و جداول ارائه شده، مهم‌ترین نتایج را به صورت زیر برشمرد:

آبشکن مورد استفاده در قبل تکیه‌گاه  $(d/L=-0/417)$ ، در پروفیل عرضی مقطع بحرانی A-A، ۴/۴۱ درصد و در مقطع طولی کانال ۲/۶۶ درصد از سطح رسوب کرانه را نسبت به مدل مبنا (بدون آبشکن) محافظت نموده که مقدار ناچیزی بوده و نتیجه می‌شود آبشکن مورد استفاده در قبل تکیه‌گاه تأثیر قابل توجهی در حفاظت از کرانه را ندارد. همچنین حداکثر عمق آبشستگی که در پای تکیه‌گاه به وجود آمده از دیگر موقیعت‌های قرارگیری آبشکن، بیشتر است که از حیث ناپایداری تکیه‌گاه قابل قبول نمی‌باشد. لذا با تغییر موقیعت

- Teraguchi, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., and Zhang, H. 2010. Morphological Changes induced by River Training Structures: Bandal-like structures and Groins. *Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*. 505-518.
- Karami, H., Ardeshir, A., Behzadian, K. and Ghodsian, M. 2011. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*. 49.6: 809-813.
- Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A., and Hosseini, S. H. 2014. Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. *Water and Environment Journal*. 28(1): 124-134.
- Koken, M., and Gogus, M. 2015. Effect of spur dike length on the horseshoe vortex system and the bed shear stress distribution. *Journal of Hydraulic Research*. 53(2): 196-206.
- Lee, K.S., and Jang, C.L. 2016. Numerical investigation of space effects of serial spur dikes on flow and bed changes by using Nays2D. *Journal of Korea Water Resources Association*. 49(3): 241-252.
- Pourshahbaz, H., and Abbasi, S. 2017. Numerical scour modeling around parallel spur dikes in FLOW-3D. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*. 1-16.
- Kumar, T., Tyagi, D., Aggarwal, L., and Kumar, M. 2018. Comparison of scour around different shapes of groynes in open channel. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*. 4.3: 382-392.
- Gunawan, P.H., and Pudjaprasetya, S.R. 2018. Simulation of shoreline development in a groyne system, with a case study Sanur Bali beach. In *Journal of Physics: Conference Series*. 971. 1: 1-12.
- Kumar, A., and Ojha, C.S.P. 2019. Near-bed turbulence around an unsubmerged L-head groyne. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 1-8.
- Dutta, D., and Kalita H.M. 2019. Performances of Straight Head and T-head Groynes as River Training Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 491.1. IOP Publishin.
- Pandey, M., Valyrakis, M., Qi, M., Sharma, A., and Lodhi, A.S. 2020. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike. *International Journal of Sediment Research*. 33-45.
- بوده و علت این موضوع را می‌توان تأثیر آبشکن با موقعیت  $d/L=1/834$  در کم کردن شدت گردابه‌های نعل اسبی دانست.
- در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، موقعیت بی‌بعد  $d/L=1/834$  از حیث حفاظت کرانه‌ی رودخانه و همچنین کنترل و کاهش حداکثر عمق آبستگي نسبت به سایر موقعیت‌ها بهینه بوده و استفاده از این موقعیت مناسب‌تر به نظر می‌رسد.
- ### منابع
- ثبات، م.، صالحی نیشابوری، ع.، و صفرزاده، م. ۱۳۹۹. مطالعه عددی جریان آشفته و فرآیندهای مؤثر بر آبستگي حول آبشکن مستقیم با بستر صلب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۷۶-۹۰.
- عباسی، س.، پورشهباز، ح.، و تقوائی، پ. ۱۳۹۸. بررسی تغییرات مورفولوژی بستر در کانال‌های دارای سری آبشکن‌های موازی با طول‌های نامساوی و جهت‌گیری‌های مختلف. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹(۳): ۳۸-۴۸.
- خلج، م.، گوهری، س.، و اخروی، س. ۱۳۹۸. بررسی عددی و آزمایشگاهی الگوی آبستگي پیرامون آبشکن‌های چوگانی و مستقیم. مجله علوم آب و خاک. ۲۳(۳): ۲۶۱-۲۷۳.
- اقبال زاده، ا.، رستم نژاد، م.، واقفی، م.، و الیاسی، س. ۱۳۹۷. بررسی عددی تأثیر طول آبشکن مستغرق بر الگوی جریان در کانال باز مستقیم. دانش آب و خاک. ۲۸(۲): ۵۷-۶۹.
- اسدی، م.، و زمردیان، م. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبستگي موضعی بستر در اطراف آبشکن قائم و زاویه‌دار با مدل عددی FLOW-3D. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹(۲): ۱۶۷-۱۷۹.
- واقفی، م.، اقبال زاده، ا.، و رستم نژاد، م. ۱۳۹۵. بررسی عددی اثر دبی بر الگوی جریان حول آبشکن ساده مستغرق در کانال رو باز. فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب. ۹(۲۸): ۶۷-۸۰.
- Hang, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Yasuyuki, B.A.B.A. 2009. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *International Journal of Sediment Research*. 24(1): 33-45.

## Optimization of the Impermeable Straight Spur Dike Location in the Opposite Bank of the Base Location

M. Saghafi Zanjani<sup>1\*</sup>, S. Abbasi<sup>2</sup>

Received: Jun.30, 2020

Accepted: Aug.09, 2020

### Abstract

Erosion of riverbank edges is one of the major concerns of the hydraulic engineers. Using spur dikes is one of the methods which help to control and reduce the erosion. In the present study, the location of the spur dikes in the riverbank was optimized numerically using the FLOW-3D numerical model. Comparison of the numerical and experimental results showed a good agreement between them. In addition, the level of riverbank protection was also studied in the present study considering six different spur dike locations. The results showed that by changing the location of the spur dike toward downstream, the spur dike in the location with a dimensionless ratio of  $d/L=1.834$  (the spur dike located 66 cm away from the base beginning) protected a greater riverbank area against erosion. The spur dike in the mentioned location decreased the riverbank erosion in the cross-section and in the longitudinal section by 21.65% and 17.12%, respectively.

**Keywords:** Bank protection, FLOW-3D, Spur Dike, Spur Dike location

---

1- M.Sc. Student, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: h.rafiel.om@gmail.com)