

بررسی چگونگی تغییرات تنش برشی بستر و انرژی جریان در اطراف موانع زاویه‌دار نفوذناپذیر و نفوذپذیر میله‌ای و توری سنگی در کانال مستقیم با بستر متحرک

مجید فضلی^{1*} و عماد کهریزی²

1- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*mfazi@basu.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/8/16؛ پذیرش مقاله: 97/3/28)

چکیده- وجود موانع در مسیر جریان سبب تغییرات قابل توجهی در توزیع تنش برشی وارد بر کف کانال و رودخانه می‌گردد. در تحقیق پیش‌رو توزیع تنش برشی در اطراف موانع زاویه‌دار نفوذناپذیر و موانع زاویه‌دار نفوذپذیر توری سنگی و میله‌ای دوردیفه با دو آرایش در امتداد هم و زیگزگی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی با عدد فرود 0/26 در شرایط آب زلال و نسبت سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت ذرات کف صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که توزیع تنش برشی بستر در مانع نفوذناپذیر از تنش برشی در مانع نفوذپذیر توری سنگی با تخلخل 30 درصد حدود 14/6 درصد بیشتر است. همچنین در موانع نفوذپذیر میله‌ای دوردیفه در امتداد هم و زیگزگی توزیع تنش برشی تقریباً از شرایط مشابهی برخوردار است. محاسبات مربوط به استهلاک انرژی جنبشی در اطراف موانع زاویه‌دار بیانگر آن است که در موانع نفوذناپذیر، استهلاک انرژی حدود 14 درصد بیشتر از موانع نفوذپذیر توری سنگی است. همچنین در موانع نفوذپذیر با درصد بازشدگی یکسان نیز استهلاک انرژی در موانع توری سنگی حدود 80 درصد بیشتر از موانع میله‌ای دوردیفه است. این محاسبات همچنین نشان می‌دهد که استهلاک انرژی به آرایش هندسی میله‌ها نیز وابسته است؛ به‌طوری‌که استهلاک انرژی موانع میله‌ای دوردیفه زیگزگی، 18 درصد بیشتر از موانع در امتداد هم می‌باشد.

کلیدواژگان: تنش برشی کف، انرژی جنبشی، مانع نفوذناپذیر، موانع میله‌ای، آبستنگی، استهلاک انرژی.

1- مقدمه

عرضی رودخانه بسیار مهم است. با وجود این که تنش برشی بستر اهمیت زیادی دارد اما متأسفانه اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در رودخانه‌ها به‌خصوص در هنگام وقوع سیل بسیار مشکل است. همچنین بدیهی است که قرار دادن هرگونه مانعی در مسیر جریان سبب تغییراتی در الگوی جریان به‌ویژه در نزدیکی کف کانال می‌گردد که این تغییرات در الگوی جریان همراه با تغییرات تنش برشی در نزدیکی بستر خواهد شد. یقیناً در این حالات، استفاده از فرمول عمومی تنش برشی وارده بر کف که تنش برشی متوسط را با

تنش برشی وارد بر کف و جداره‌های رودخانه یکی از مهم‌ترین پارامترهای جریان در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز بوده و در بسیاری از معادله‌های مهم هیدرولیک و انتقال رسوب مانند محاسبه‌های انتقال بار معلق و بستر، مدل‌های آشفستگی، طراحی کانال‌ها و تعیین بازه‌های پایدار رودخانه‌ها، انتخاب محل مناسب آبگیر، فرسایش دیواره‌ها و کف رودخانه و همچنین ریخت‌شناسی رودخانه کاربرد دارد. به‌علاوه، آگاهی داشتن از توزیع تنش برشی بستر در عرض رودخانه به‌منظور پیش‌بینی تغییرات هندسی مقطع

سرعت و قدر مطلق مؤلفه قائم مقادیر بیشتری نسبت به حالت نفوذ ناپذیر بودن را دارند (شیبانی و بیات، 1385).
 رضانی و قمشی (1393)، مطالعه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در حضور پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق روی دشت سیلابی را انجام دادند. آن‌ها برای محاسبه تنش برشی بستر از تنش‌های رینولدزی $-\overline{\rho u'v'}$ ، $-\overline{\rho u'w'}$ ، $-\overline{\rho w'v'}$ استفاده کردند و سرعت جریان در اعماق مختلف را با سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تنش برشی در دماغه بالادست تکیه‌گاه است و در حالت‌هایی که پوشش گیاهی اضافه شد، تنش برشی دماغه تکیه‌گاه کاهش یافت و تنش برشی در آبراهه اصلی مقطع مرکب افزایش یافت (رضانی و قمشی، 1393).

کاظمی و همکاران (1391)، با اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه-بعدی سرعت در دو شرایط با و بدون سرریز W ، تغییر الگوی جریان و به خصوص سرعت‌های عرضی و تنش برشی در قوس 90 درجه تند را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بالادست محل نصب، توزیع عرضی تنش برشی بی‌بعد بستر با حضور سرریز W نسبت به قبل از نصب سرریز یکنواخت‌تر می‌شود؛ به طوری که در ساحل خارجی کاهش و در ساحل داخلی افزایش یافته است (کاظمی و همکاران، 1391).

واقفی و همکاران (1394)، تأثیر قدرت جریان ثانویه بر تنش برشی بستر پیرامون آبشکن سرسپری مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس 90 درجه ملایم با بستر صلب را انجام دادند. نتایج بیانگر این است که بیشترین مقدار بی‌بعد تنش برشی بستر نیز در محدوده استقرار می‌باشد اما بعد از عبور از محدوده استقرار آبشکن، مقدار تنش برشی بستر نزولی و سپس یکنواخت می‌گردد (واقفی و همکاران، 1394).

تینگسانچالی³ و همکاران (1990)، الگوی جریان و تنش برشی حول آبشکن را در کانال مستقیم و با بستر صلب شبیه‌سازی نمودند. غریب زاده و همکاران (1391)، نقش مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی در

فرض جریان یکنواخت رودخانه محاسبه می‌کند، $(\tau_b = gRS)$ جواب‌گو نیست (هوشمندی و همکاران، 1394). لذا محققان روش‌هایی را برای محاسبه غیرمستقیم تنش برشی ارائه کردند.

راجاراتنام و نواچوکو¹ (1983)، تنش‌های برشی بستر را در اطراف آبشکن‌ها به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از لوله‌های پرستون و پیتوت برای درصدهای تنگ شدگی 8 و 16 درصد و اعداد فرود مختلف اندازه‌گیری نمودند. آزمایشات آن‌ها بیانگر افزایش قابل توجه تنش برشی بستر در نزدیکی دماغه پایین دست و در همسایگی نزدیک آبشکن بود (Rajaratnam and Nwachukwu, 1983).

مولیناس² و همکاران (1998) به طور آزمایشگاهی به وسیله لوله پرستون توزیع تنش برشی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی را در یک کانال مستطیلی بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بالاترین مقدار تنش برشی برای محدوده عدد فرود بین 0/3 تا 0/9 و نسبت پیش‌آمدگی 0/1، 0/2 و 0/3 در دماغه تکیه‌گاه (گوشه بالادست تکیه‌گاه) رخ می‌دهد. مطابق با مطالعات آزمایشگاهی، تنش برشی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی بسته به شرایط جریان و میزان پیش‌آمدگی تکیه‌گاه افزایش می‌یابد (Molinas et al. 1998).

احمد و راجاراتنام (2000)، میدان جریان را حول یک تکیه‌گاه بالی شکل بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه، به مقدار حداکثر $\frac{\tau}{\tau_0}$ برابر 3/63 در نزدیکی دماغه می‌رسد که τ تنش برشی بستر و τ_0 تنش برشی جریان نزدیک شونده در بستر است (Ahmed and Rajaratnam, 2000).

شیبانی و بیات (1385)، سرعت جریان و تنش برشی بر روی تاج بند توری‌سنگی سرریز شونده را انجام دادند. در این تحقیق، آزمایش‌های مدل فیزیکی برای بررسی چگونگی توزیع سرعت جریان و تنش‌های برشی بر روی بند توری‌سنگی سرریز شونده انجام شده‌اند. مقایسه نتایج تحقیق آن‌ها، تأثیر نفوذپذیری سطح تاج را در توزیع سرعت و تنش برشی نشان داد. در حالت نفوذپذیر بودن سطح تاج، دیده شد که تنش‌های برشی، مؤلفه افقی

¹ Rajaratnam & Nwachukwu² Molinas³ Tingsanchali & Maheswaran

بوعلی سینا همدان و در فلومی بتنی به طول 15 متر، ارتفاع و عرض 60 سانتی‌متر و شیب کف 0/001 با دیواره‌های شفاف از جنس شیشه 10 میلی‌متری انجام شده است. به طوری که الگوی جریان قابل رویت و تصویربرداری است. در شکل 1 تصویر فلوم و نمای شماتیک از پلان فلوم دیده می‌شود. در انتهای فلوم یک دریچه پروانه‌ای به منظور تنظیم عمق جریان قرار داشت. به منظور پمپاژ و انتقال آب از حوضچه پایین دست به حوضچه بالادست و برقراری جریان از پمپی با ظرفیت آبدی 190-370 لیتر بر ثانیه استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری دبی جریان یک سرریز مستطیلی لبه تیز از جنس شیشه 10 میلی‌متری هم عرض کانال و به ارتفاع 30 سانتی‌متری در انتهای کانال تعبیه شد. جهت بررسی پارامترهای مورد نظر، نیاز به داشتن بستری از جنس ماسه با دانه‌بندی مشخص بود. بدین جهت برای زیر کردن کف کانال، ذرات ماسه رودخانه‌ای با دانه‌بندی کاملاً یکنواخت به قطر متوسط 1/5 میلی‌متر در لایه‌ای به ضخامت تقریبی 26 سانتی‌متر و در ناحیه‌ای به طول 2 متر در اواسط کانال مورد نظر تعبیه شد؛ به نحوی که جریان در رسیدن به ناحیه توسعه یافته باشد تا مشخصات جریان ثابت باشد و دچار تغییر نشود.

سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی جریان برای دبی مورد نظر با استفاده از سرعت‌سنج سه‌بعدی Vectrino که مدلی از سرعت‌سنج‌های ADV است و برای اندازه‌گیری توپوگرافی بستر از متر لیزری استفاده می‌کند با فرکانس 20 هرتز اندازه‌گیری شد.

آبشستگی حول تکیه‌گاه بیضوی پل‌ها را بررسی کردند (غریب زاده و همکاران، 1391).

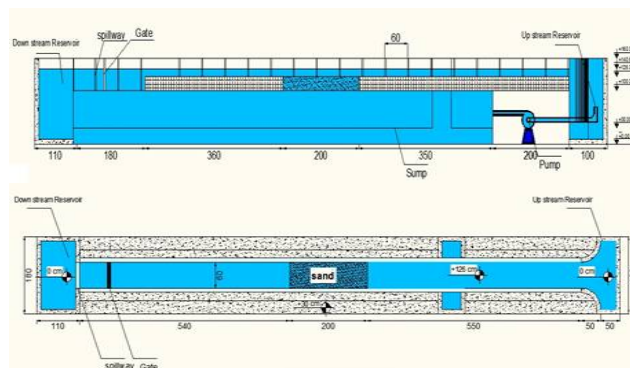
تغییرات تنش برشی در اطراف موانع زاویه‌دار موجود در مسیر جریان (ابشکن‌ها) چه در حالت نفوذپذیر و چه در حالت نفوذناپذیر از جمله مواردی است که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش، تنش برشی در اطراف موانع نفوذناپذیر و موانع نفوذپذیر، در دو حالت استفاده از توری‌سنگی و موانع میله‌ای دو ردیفه با زاویه 45 درجه و 135 درجه نسبت به امتداد جریان، با روش متوسط‌گیری در عمق محاسبه شد و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی کانال مستقیم مقایسه شده است.

از آن‌جا که نصب موانع مایل در رودخانه‌ها، هم برخورد جریان با مانع را به دنبال داشته و هم جریان‌های گردابه‌ای ایجاد می‌نماید بنابراین می‌توانند کاهش انرژی جنبشی جریان را به دنبال داشته باشند. اگرچه هدف از احداث آن‌ها استهلاک انرژی جریان نیست؛ اما تغییرات انرژی جنبشی جریان قبل و بعد از موانع موجود در مسیر جریان می‌تواند مشخص نماید که مانع چه بخشی از انرژی جریان را مستهلک نموده است. لذا تغییرات انرژی جنبشی در قبل و بعد از موانع نیز محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا درصد استهلاک انرژی در مورد هر یک از این موانع تعیین گردد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تجهیزات آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک، گروه عمران دانشگاه



ب- نمای شماتیک از پلان فلوم

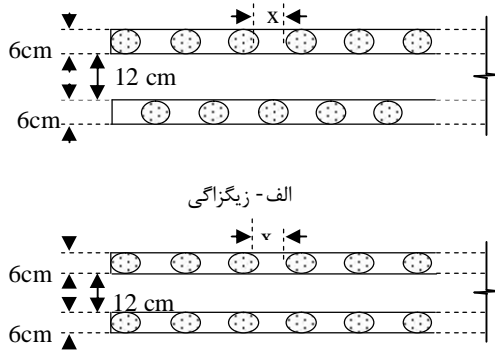


الف- تصویری از فلوم

شکل 1 کانال تحقیقاتی مورد استفاده

موانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم به این صورت بوده که میله‌ها و فواصل خالی بین آن‌ها در دو ردیف مانع 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 3 به صورت شماتیک نحوه قرارگیری میله‌ها را در دو حالت مانع دوردیفه زیگزگی و در امتداد هم نشان می‌دهد.

در این آزمایش‌ها مانع نفوذناپذیر، از یک صفحه شیشه‌ای به ضخامت 6 میلی‌متر، طول 12 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر ساخته شده است. همچنین مانع توری‌سنگی به طول 12 سانتی‌متر و تخلخل 30 درصد از جنس توری فلزی به شکل قالب مستطیلی به ارتفاع 60 سانتی‌متر و طول 12 سانتی‌متر ساخته شد. در شکل‌های 4- الف و ب به ترتیب نحوه قرارگیری مانع میله‌ای دوردیفه با زاویه 45 درجه و 135 درجه در کانال تحقیقاتی مشاهده می‌شود.



ب- در امتداد هم

شکل 3 نمای شماتیک از مانع باز دو ردیفه



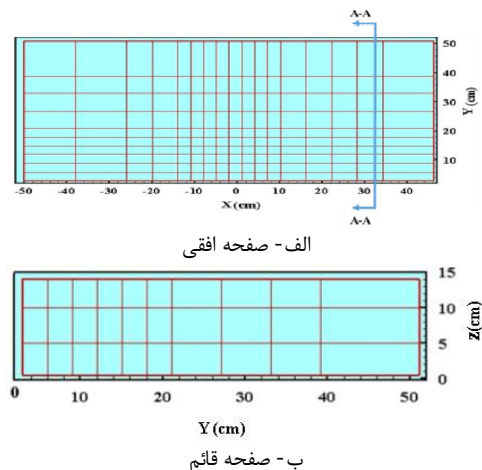
الف - مانع میله‌ای دو ردیفه زیگزگی با زاویه 45
ب - مانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم با زاویه 135

شکل 4 قرارگیری موانع میله‌ای دو ردیفه در کانال تحقیقاتی

برای آن که سرعت‌های برداشت شده به وسیله سرعت‌سنج، سرعت‌های قابل اطمینانی باشند باید حداقل به مدت 60 ثانیه برای هر نقطه، نمونه‌برداری انجام شود (مهرآیین، 1393). بنابراین زمان نمونه‌برداری برای هر نقطه 60 ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در دبی 28 لیتر بر ثانیه و عمق ثابت 14/6 سانتی‌متر انجام شد که متناظر با عدد فرود 0/26 بود. برای محاسبه تنش برشی از روش متوسط‌گیری در عمق استفاده شده است.

برداشت‌ها در 4 سطح ارتفاعی در عمق‌های 0/5 سانتی‌متر از کف، 0/5 سانتی‌متر از سطح آب و فواصل 5 و 10 سانتی‌متری از بستر اولیه صورت گرفته است. به طوری که سرعت‌های سطحی با استفاده از پروب جانب‌نگر و بقیه سرعت‌ها با استفاده از پروب پایین‌نگر برداشت شد. از پروب پایین‌نگر معمولاً برای اندازه‌گیری سرعت در عمق جریان استفاده می‌شود و از پروب جانب‌نگر عمدتاً برای تعیین سرعت در لایه‌های نزدیک سطح آب و همچنین در شرایطی که اندازه‌گیری جریان در اطراف سازه مد نظر است، استفاده می‌شود. (شکل 2)

در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها از سه نوع مانع میله‌ای نفوذپذیر، مانع نفوذناپذیر و مانع توری‌سنگی استفاده شده است. جهت ساخت موانع میله‌ای باز، از میله‌های آهنی به قطر 6 میلی‌متر که در قطعات 60 سانتی‌متری برش داده شده بودند، استفاده شد. آرایش میله‌ها به صورت دوردیفه زیگزگی و دوردیفه در امتداد هم بود.



شکل 2 نمونه‌ای از مش‌بندی در صفحه افقی و قائم برای برداشت الگوی جریان

$$\tau_{by} = (C_f \cdot \rho \cdot \bar{v}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2))^{0.5} \quad (3)$$

$$\tau_b = C_f \cdot \rho (U^2 + V^2) \quad (4)$$

$$C_f = \frac{n^2 g}{y^3} \quad (5)$$

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (6)$$

که در آن u و v سرعت‌های متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y ، n ضریب مانینگ، γ عمق جریان و g شتاب گرانش زمین می‌باشد. این روش بیشتر هنگامی به کار می‌رود که بعد قائم، حداقل نسبت به یکی از ابعاد افقی کوچک بوده و مؤلفه قائم سرعت در مقایسه با مؤلفه‌های افقی کوچک باشد (Molinas et al., 1998).

در روش سوم تنش برشی بستر با استفاده از تنش‌های رینولدز و رابطه (7) محاسبه می‌گردد.

$$\tau_b = (\tau_\theta^2 + \tau_r^2)^{0.5} \quad (7)$$

$$\tau_\theta = -\rho(\overline{w'u'} + \overline{v'u'}) \quad (8)$$

$$\tau_r = -\rho(\overline{\theta'u'} + \overline{v'w'}) \quad (9)$$

در این روابط w' ، v' ، u' مؤلفه‌های نوسانی سرعت در راستاهای مختلف و τ_r و τ_θ مؤلفه‌های مماسی و شعاعی تنش برشی کف می‌باشند (احمد، 1951). این روش هنگامی استفاده می‌شود که برداشت سرعت در لایه مرزی آشفته انجام پذیرفته باشد. در تحقیق پیش‌رو برای محاسبه تنش برشی در کانال مستقیم نیز از روش سرعت متوسط‌گیری شده در عمق که در روابط (2) تا (6) ارائه شده، استفاده گردیده است.

2-3- انرژی جنبشی جریان

در مورد انرژی جنبشی می‌توان گفت که انرژی جنبشی از رابطه (10) به‌دست می‌آید:

$$k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (10)$$

که در این رابطه k انرژی جنبشی، m جرم و v سرعت جریان است. از آن‌جا که ρ ثابت فرض می‌شود؛ انرژی جنبشی کل در هر مقطع عرضی به‌صورت رابطه (11) محاسبه می‌شود.

$$H = \sum \frac{1}{2} (V^3 \times A) \quad (11)$$

یعنی انرژی جنبشی کل جریان در هر مقطع عرضی از مجموع انرژی جنبشی سلول‌های شبکه حاصل از نقاط

در این پژوهش، جهت انتخاب زمان تعادل نسبی از معیار ویتال¹ و همکاران (1994)، استفاده شد و زمان تعادل نسبی برای حفره آبستنگی در یک آزمایش معادل زمانی تعریف شد که تغییرات عمق آبستنگی در آزمایش کمتر از 1 میلی‌متر در بازه زمانی 5 ساعت شود. نحوه انجام به این صورت بود که عمق آبستنگی در محل تقریبی ماکزیمم آبستنگی در زمان‌های مختلف ثبت شده، نمودار ترسیم گردیده و سپس از روی منحنی ترسیمی، مطابق با معیار مذکور، زمان تعادل 9 ساعت انتخاب شد. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی دبی 28 لیتر بر ثانیه و با استفاده از معیار چانگ (Chang, 1998) سرعت آستانه حرکت ذرات (U_c)، 0/42 متر بر ثانیه تعیین گردید و بر این اساس، سرعت نسبی جریان (U/U_c)، 0/76 تعیین شد.

2-2- تنش برشی

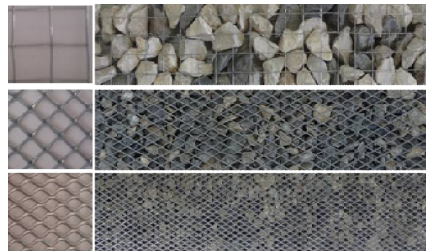
جهت محاسبه تنش برشی با استفاده از میدان جریان با توجه به شرایط حاکم بر پدیده می‌توان از یکی از سه روش ذیل استفاده نمود:

اگر شرایط حاکم بر پدیده به گونه‌ای باشد که بتوان بر تغییرات سرعت در امتداد قائم یک منحنی ثئوریک برازش داد، در این صورت می‌توان سرعت برشی بستر (U^*) را محاسبه و با استفاده از رابطه (1) تنش برشی بستر را به‌دست آورد.

$$\tau_b = \rho \cdot U_*^2 \quad (1)$$

در روش دوم، تنش‌های برشی بستر در جهات x ، y و τ_{by} ، τ_{bx} و برآیند تنش‌های برشی بستر τ_b می‌تواند از روابط ذیل محاسبه شود:

$$\tau_{bx} = (C_f \cdot \rho \cdot \bar{u}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2))^{0.5} \quad (2)$$



شکل 5 توری‌های مورد استفاده در ساخت موانع توری‌سنگی

¹ Vittal

$$(V_x, V_y, V_z)_{n-1} \quad (V_x, V_y, V_z)_n \quad (V_x, V_y, V_z)_{n+1} \quad (12)$$

$$A_{1x} = \frac{(V_{x,n} - V_{x,n-1})}{\Delta t} \quad \text{and} \quad A_{2x} = \frac{(V_{x,n+1} - V_{x,n})}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\Delta A_x = A_{1x} - A_{2x}, \quad \Delta A = \sqrt{\Delta A_x^2 + \Delta A_y^2 + \Delta A_z^2} \quad (14)$$

$$\Delta A < \lambda g \rightarrow ok$$

4- بحث و نتایج

همان‌گونه که قبلاً بیان گردید در این تحقیق، تنش برشی بستر در کانال مستقیم با استفاده از روش سرعت متوسط‌گیری شده در عمق محاسبه شده است. همچنین انرژی جنبشی برای حالات مختلف قرارگیری موانع در مسیر جریان در مقاطع قبل و بعد از مانع محاسبه و مقایسه گردیده است. بنابراین نتایج حاصله ابتدا برای تنش برشی و در ادامه برای انرژی جنبشی و میزان استهلاک انرژی هر یک از موانع، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4-1- بررسی تنش برشی بستر

مقایسه تنش برشی در کف برای بررسی اثرات سه عامل میزان نفوذپذیری مانع، آرایش هندسی موانع میله‌ای دوردیفه و مقایسه عملکرد موانع میله‌ای دوردیفه و توری‌سنگی با نفوذپذیری یکسان مورد بررسی قرار گرفت. الف- بررسی اثر نفوذپذیری موانع بر تنش برشی بستر

در شکل 6 توزیع تنش برشی بدون بعد شده در بستر برای دو مانع نفوذناپذیر و مانع نفوذپذیر با تخلخل 30 درصد (توری‌سنگی) با زاویه قرارگیری 45 درجه نشان داده شده است. T_0 ، تنش برشی در قسمت مستقیم کانال در ناحیه قبل از تأثیر مانع بر جریان می‌باشد. حداکثر تنش برشی ایجاد شده در مانع نفوذناپذیر نسبت به مانع توری‌سنگی، به‌طور متوسط دارای تغییراتی حدود 14/6 درصد می‌باشد. با توجه به شکل 6 چنین برداشت می‌شود که توزیع تنش برشی بستر در موانع نفوذناپذیر از تنش برشی در مانع نفوذپذیر توری‌سنگی با تخلخل 30 درصد بیشتر است.

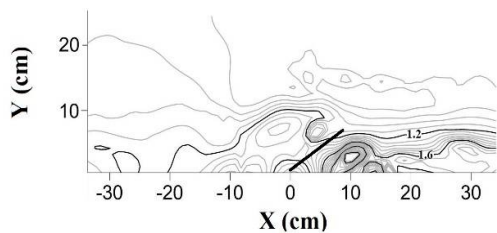
3- خطاها

در این تحقیق، خطاها می‌تواند در هنگام کار با دستگاه ADV، به علت حرکت پراب در آب و تغییرات جزئی دبی به‌دلیل نوسانات برق باشد که برای کاهش خطای ناشی از آن، بعد از حرکت پراب در داخل جریان به مدت 10 تا 20 ثانیه برداشت سرعت صورت نمی‌گرفت و بدین طریق خطای داده‌های برداشت شده به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کرد. بیشترین خطا مربوط به خطای مشاهداتی است یعنی خطا در قرار دادن دقیق دستگاه در محل مورد نظر، خطا در قرائت عمق جریان از روی عمق‌سنج و خطا در نصب آبشکن در محل دقیق خود می‌باشد. همچنین در بعضی از داده‌های ضبط شده توسط دستگاه ADV، مقادیری خارج از محدوده بقیه داده‌ها به نام خطای اسپایک¹ وجود دارد که مربوط به ولتاژگذاری کوتاه مدت است. در این روش از سه سرعت در همسایگی زمانی یکدیگر استفاده می‌شوند. شتاب‌های جریان در دو بازه زمانی مطابق با رابطه (13) برای هر سه جهت جریان محاسبه می‌شود. تفاوت شتاب‌ها در جهت مختلف تعیین شده و به‌صورت ΔA_i نمایش داده می‌شود. مقدار ΔA مطابق با رابطه (14) تعیین شده و نسبت به ضریبی از شتاب ثقل (1 تا 1/5 برابر شتاب ثقل) سنجیده می‌شود. اگر مقدار ΔA بزرگتر از این شتاب حدی در نظر گرفته شده باشد سرعت در زمان n به‌عنوان اسپایک شناخته شده و از بین داده‌ها حذف می‌شود. این روش در شرایطی که داده‌ها دارای کیفیت مناسبی هستند (از لحاظ SNR و Correlation) برای استفاده مناسب است. روابط (12) تا (14) بیانگر عملکرد روش ذکر شده است (مهرآیین، 1393).

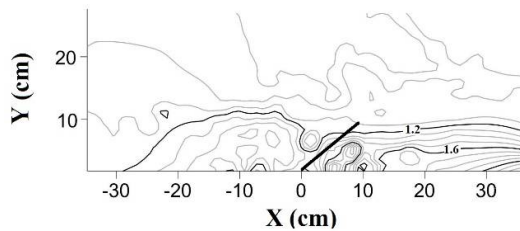
¹ Spike

عبور می‌کند؛ بنابراین سرعت جریان عبوری از دماغه کمتر شده، گردابه تشکیل شده قدرت کمتری داشته و تلاطم کمتری را ایجاد می‌کند در نتیجه تنش برشی ایجاد شده، قدرت و محدوده توزیع کمتری نسبت به مانع نفوذناپذیر با تخلخل صفر را دارد.

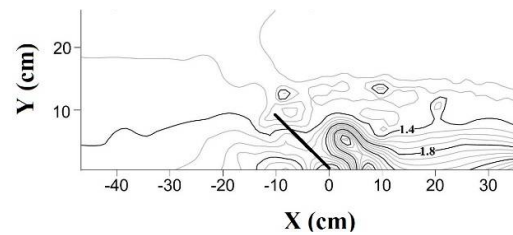
در شکل 7 توزیع تنش برشی در کف برای مانع نفوذناپذیر و مانع نفوذپذیر توری‌سنگی با تخلخل 30 درصد با زاویه قرارگیری 135 درجه مشاهده می‌شود. مطابق با شکل‌های 7- الف و ب می‌توان نتیجه گرفت که متوسط تغییرات حداکثر تنش برشی به‌وجود آمده در مانع نفوذناپذیر نسبت به مانع توری‌سنگی 2/9 درصد می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در حالت زاویه قرارگیری 135 درجه، تنش برشی بستر در موانع نفوذناپذیر و توری‌سنگی دارای توزیعی تقریباً مشابه به هم می‌باشند؛ اگر چه مقدار ماکزیمم تنش برشی ایجاد شده در مانع نفوذناپذیر کمی بیشتر است. به‌طور کلی توزیع تنش برشی در کف، در نواحی که جریان ثانویه بیشتر است بیشترین مقدار خود را دارد. در این حالت نیز مشاهده می‌گردد که در تراز نزدیک به کف کانال، اختلاط جریان بسیار کم سرعت بعد از مانع با جریان‌های منحرف شده از دماغه به سمت دیواره‌ی مجاور موجب بروز گردابه‌ای در این ناحیه شده است که این گردابه سبب تلاطم جریان و تنش برشی و در نهایت برداشت مصالح از کف می‌شود.



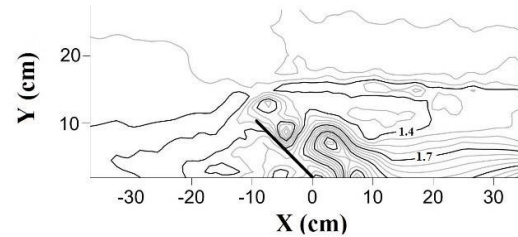
الف) توزیع تنش برشی در کف در مانع نفوذناپذیر با زاویه 135 درجه



ب) توزیع تنش برشی در کف در مانع توری‌سنگی با زاویه 135 درجه
شکل 7 توزیع تنش برشی در کف در مانع نفوذناپذیر و توری‌سنگی با زاویه 135 درجه



الف) در مانع نفوذناپذیر با زاویه 45 درجه

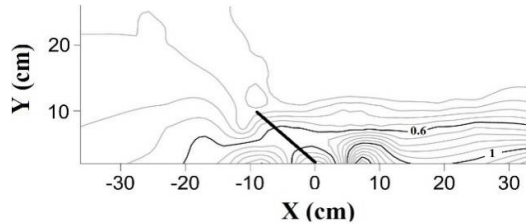


ب) در مانع توری‌سنگی با زاویه 45 درجه

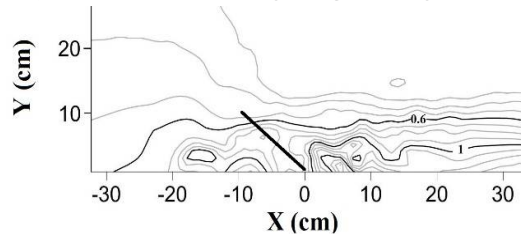
شکل 6 توزیع تنش برشی بدون بعد شده در بستر برای دو مانع نفوذناپذیر و مانع نفوذپذیر با زاویه 45 درجه

علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که مانع نفوذناپذیر در اختلاط جریان‌های پر سرعت دماغه با جریان‌های ثانویه نسبتاً قوی و گردابه‌هایی که قبل از رسیدن به مانع به تدریج در حال شکل‌گیری هستند، تنش برشی بیشتری نسبت به مانع توری‌سنگی ایجاد می‌کنند. به‌عبارت دیگر نقش سازه‌ی موانع متخلخل در مسیر جریان به‌عنوان یک آرام‌کننده جریان است. این موانع، تغییرات زیادی در الگوی جریان ایجاد نمی‌کنند، گردابه‌های پر قدرت تولید نمی‌کنند و موجب انحراف قابل‌توجه در مسیر جریان نمی‌شوند؛ بلکه جریان در عبور از این نوع موانع با افزایش سرعت ملایم‌تری مواجه بوده و با همراه کردن مقداری رسوبات با خود موجبات رسوب‌گذاری در نواحی حول مانع و بعد از آن در پایین‌دست خود را فراهم می‌کنند. به‌هرحال افزایش میزان بازشدگی موانع، موجب کاهش شدت تأثیرات آن به‌عنوان یک مانع در مسیر جریان می‌شود. در حالی که موانع نفوذناپذیر عموماً نقش انحراف‌دهنده جریان را داشته و منجر به ایجاد ناحیه‌ی جدایی جریان وسیع‌تری می‌شوند، چرا که جریان در برخورد با این موانع به دو قسمت عمده تقسیم می‌شود. قسمتی از جریان کاملاً منحرف می‌شود و قسمت دیگر آن که پشت مانع واقع است، برگشت پیدا می‌کند. در حالی که در مانع توری‌سنگی به‌دلیل تخلخل موجود بخشی از جریان آب از بین خلل و فرج توری‌سنگی

در حالت زیگزاگی و در امتداد هم با زاویه قرارگیری 45 درجه نشان داده شده است.



الف) توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم



ب) توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه زیگزاگی

شکل 8 توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی با زاویه قرارگیری 45 درجه

مطابق شکل از مقادیر حداکثر تنش برش چنین برداشت می‌شود که متوسط تغییرات حداکثر تنش برشی موجود در مانع زیگزاگی نسبت به مانع در امتداد هم 2 درصد می‌باشد. از مقایسه موانع باز میله‌ای دوردیفه در امتداد هم و زیگزاگی شکل‌های 8- الف با 8- ب می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی در مانع با آرایش زیگزاگی بیشتر از مانع با حالت قرارگیری در امتداد هم است. این موضوع نشان می‌دهد که آرایش هندسی میله‌ها در موانع میله‌ای دوردیفه نقش مهمی در توزیع تنش برشی در بستر دارد. دلیل این موضوع با توجه به نحوه عبور جریان از هر یک از این موانع قابل فهم است؛ چرا که آشفتگی جریان عبوری از مانع در امتداد هم، به مراتب کمتر از مانع زیگزاگی می‌باشد. از مقایسه شکل 8 با شکل 7- ب نیز مشخص می‌گردد که مانع توری‌سنگی، تنش برشی بیشتری نسبت به موانع میله‌ای دوردیفه دارد؛ به طوری که حداکثر تنش برشی ایجاد شده در مانع توری‌سنگی نسبت به مانع دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی به ترتیب دارای 44 و 42/8 درصد تغییرات می‌باشد؛ علت وقوع چنین شرایطی

از مقایسه تنش برشی در موانع نفوذپذیر توری‌سنگی و موانع نفوذناپذیر شکل‌های 6 و 7 می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی میزان تنش برشی بستر در حالت قرارگیری مانع با زاویه 45 درجه نسبت به قرارگیری با زاویه 135 درجه بیشتر است. دلیل این امر را با توجه به عملکرد قرارگیری مانع در هر یک از این دو زاویه بر الگوی جریان می‌توان جستجو کرد. از آنجا که قرارگیری مانع با زاویه 45 درجه هدایت جریان آب به پایین دست را با آشفتگی بسیار بیشتری انجام می‌دهند؛ در نتیجه باعث بروز اختلالات شدیدتر در مسیر جریان، تشکیل جریان‌های ثانویه و تنش برشی بیشتر نسبت به قرارگیری با زاویه 135 درجه می‌شوند. در موانع با زاویه قرارگیری 135 درجه با توجه به زاویه‌ای که نسبت به جریان دارند، هدایت جریان آب به پایین دست را با آشفتگی بسیار کمتری انجام می‌دهند. جریان اصلی کانال با نزدیک شدن به مانع هماهنگ با زاویه میل آن منحرف شده و از این رو دچار تغییرات زیادی در مقادیر کمی سرعت نمی‌شود. همچنین از آنجا که تغییر در تنگ‌شدگی مقطع به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد، جریان فرصت تطبیق با شرایط را یافته و دچار تغییرات آبی نمی‌شود. از این رو جریان‌های گردابه‌ای به وجود آمده قدرت کمتری دارند و تنش برشی کمتری به کف وارد می‌کنند. به طور کلی در این موانع، هم تلاطم جریان کمتر بوده و هم مقادیر کمی سرعت در حضور مانع کمتر می‌باشد.

ب- بررسی اثر انواع موانع نفوذپذیر بر تنش برشی بستر

برای ایجاد موانع نفوذپذیر در مسیر جریان می‌توان از مانع توری‌سنگی یا موانع میله‌ای استفاده نمود. در این پژوهش برای بررسی عملکرد این دو نوع مانع، با در نظر گرفتن نفوذپذیری یکسان، آزمایش‌هایی بر روی موانع میله‌ای دوردیفه نیز صورت پذیرفت. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید در ساخت موانع میله‌ای دوردیفه، دو آرایش هندسی متفاوت در قرارگیری دو ردیف میله‌ها به کار گرفته شد که به ترتیب، آرایش در امتداد هم قرار گرفتن میله‌ها در دو ردیف و آرایش زیگزاگی میله‌ها است. در شکل 8 توزیع تنش برشی در موانع میله‌ای دو ردیفه

زاویه قرارگیری 45 درجه بیشتر از زاویه قرارگیری 135 درجه است.

برای بررسی عملکرد تنش برشی ماکزیمم بر بستر متحرک می‌توان به مقایسه حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف هر یک از این موانع پرداخت. بدین منظور، تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده برای موانع مختلف در دو زاویه قرارگیری 45 و 135 درجه در جدول 2 ارائه شده است. مطابق با جدول 2 چنین برداشت می‌شود که تغییرات عمق آبشستگی به‌خوبی از تغییرات حداکثر تنش برشی پیروی می‌نماید، شاید تنها مورد عدم هماهنگی بین تغییرات تنش برشی ماکزیمم و حداکثر عمق آبشستگی در خصوص موانع میله‌ای دو ردیفه موجود باشد. چرا که علی‌رغم بیشتر بودن تنش برشی ماکزیمم در مورد موانع میله‌ای دو ردیفه زیگزاگی نسبت به موانع در امتداد هم، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین حداکثر عمق آبشستگی در اطراف این دو مانع موجود نمی‌باشد.

جدول 1 تغییرات تنش برشی ماکزیمم نسبت به تنش متوسط برای موانع مختلف با زاویه قرارگیری متفاوت

زاویه قرارگیری		نوع مانع
135	45	
2/4	2/74	مانع نفوذ ناپذیر
2/05	2/66	مانع توری سنگی
1/32	1/49	مانع دو ردیفه متوالی
1/45	1/52	مانع دو ردیفه زیگزاگی

جدول 2 تغییرات عمق آبشستگی ماکزیمم برای موانع مختلف با زاویه قرارگیری متفاوت

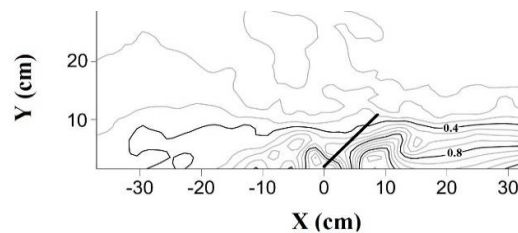
زاویه قرارگیری		نوع مانع
135	45 (cm)	
6/6	11	مانع نفوذ ناپذیر
6/1	8	مانع توری سنگی
0/81	0/89	مانع دو ردیفه متوالی
0/7	0/84	مانع دو ردیفه زیگزاگی

دلیل این موضوع چنین بیان می‌گردد که تنش برشی ایجاد شده به‌دلیل حضور این موانع در هر دو حالت برای

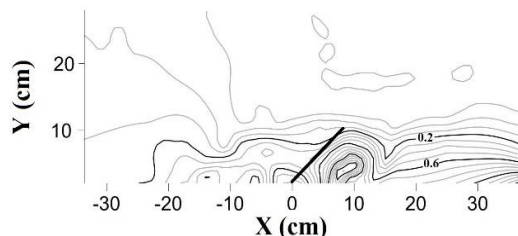
هم متأثر از الگوی جریان در برخورد با این موانع است. در مانع توری‌سنگی، جریان کمتری نسبت به موانع میله‌ای از میان مانع عبور می‌کند؛ در نتیجه جریان ثانویه بیشتری تشکیل می‌شود و تنش برشی بستر بیشتر می‌شود.

همچنین در شکل 9 توزیع تنش برشی در موانع میله‌ای دو ردیفه در حالت زیگزاگی و در امتداد هم با زاویه قرارگیری 135 درجه نشان داده شده است. متوسط تغییرات حداکثر تنش برشی ایجاد شده در موانع میله‌ای دو ردیفه زیگزاگی نسبت به موانع در امتداد هم با زاویه قرارگیری 135 درجه نیز حدود 1/1 درصد می‌باشد. از مقایسه‌ی بین زاویه قرارگیری موانع میله‌ای دو ردیفه می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی در مانع با زاویه قرارگیری 45 درجه نسبت به مانع با زاویه قرارگیری 135 درجه برای هر دو نوع آرایش هندسی میله‌ها از شدت بیشتری برخوردار است.

در جدول 1 خلاصه نتایج تغییرات تنش برشی ماکزیمم نسبت به تنش برشی متوسط (کانال بالادست قبل از تأثیر پذیری از مانع) برای موانع مختلف با دو زاویه قرارگیری 45 و 135 درجه ارائه شده است.



الف) توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم



ب) توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه زیگزاگی

شکل 9 توزیع تنش برشی در مانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی با زاویه قرارگیری 135 درجه

از جدول 1 چنین برداشت می‌شود که به‌طور کلی تنش برشی ماکزیمم ایجاد شده در تمامی حالات برای موانع با

4-2- بررسی الگوی جریان در اطراف موانع نفوذپذیر و

نفوذناپذیر و اثر آن بر استهلاک انرژی جنبشی جریان در این بخش، الگوی جریان در اطراف موانع نفوذناپذیر، موانع میله‌ای دو ردیفه و مانع توری‌سنگی که دارای نفوذپذیری یکسان می‌باشند بررسی شده است. برای همین منظور اثرات میزان نفوذپذیری موانع، آرایش هندسی موانع میله‌ای دوردیفه و نیز زاویه قرارگیری موانع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4-2-1- بررسی خطوط جریان در مقاطع ارتفاعی مختلف

خطوط جریان صفحات مختلف قائم، حاصل از دو مؤلفه طولی و عرضی سرعت در محدوده میدان جریان برای موانع مختلف، اندازه‌گیری و در شکل‌های 10 تا 13 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود در لایه عمقی نزدیک به بستر، در پایین‌دست موانع و نزدیک به دیواره مجاور مانع، یک ناحیه چرخشی شکل گرفته است. ابعاد ناحیه چرخشی در پایین‌دست مانع برای نفوذپذیری‌های مختلف متفاوت است. هر چه میزان نفوذپذیری کمتر باشد ابعاد ناحیه چرخشی بزرگتر و فاصله آن از دیواره مجاوره مانع بیشتر می‌شود. علت این پدیده می‌تواند به میزان عبور جریان از بدنه مانع ارتباط داشته باشد، به این صورت که در مانع بسته عبور جریان از مانع امکان‌پذیر نبوده و ناحیه چرخشی بزرگی در پایین‌دست شکل می‌گیرد اما با افزایش میزان نفوذپذیری مانع، جریان عبوری از آن بیشتر شده و ابعاد ناحیه چرخشی کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق با شکل‌ها بزرگترین ناحیه چرخشی مربوط به مانع بسته می‌باشد و پس از آن به ترتیب موانع توری‌سنگی، زیگزاگی و در امتداد هم قرار دارند.

با توجه به شکل‌ها، در لایه‌های نزدیک بستر به دلیل آن‌که تا حد زیادی تحت تأثیر بستر و ناهمواری‌های آن قرار دارد؛ در محدوده اطراف و پایین دست مانع، سرعت‌های طولی کم و نزدیک به صفر بوده و در محدوده دماغه مانع و امتداد آن به سمت پایین‌دست دارای بیشترین مقادیر سرعت می‌باشد که علت آن فاصله از بستر و لایه برشی نزدیک به آن است.

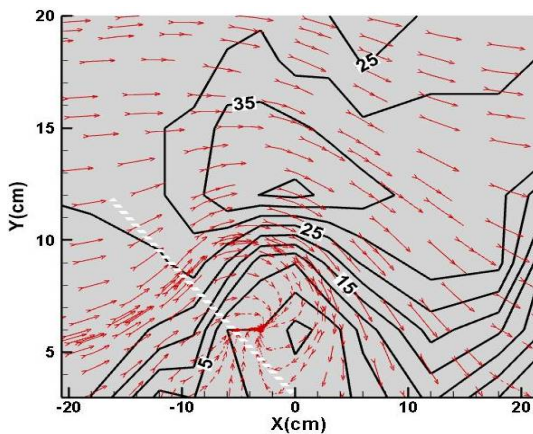
حرکت ذرات رسوب کافی نیست و عمق آبشستگی قابل توجهی ایجاد نمی‌کند.

همچنین در جدول 3 مقادیر عددی نسبت تنش برشی ماکزیمم به تنش برشی متوسط در مقطع 12 سانتی‌متری در بالادست، در دماغه و در مقطع 12 سانتی‌متری پایین‌دست موانع مختلف با زوایای قرارگیری 45 و 135 درجه ارائه شده است.

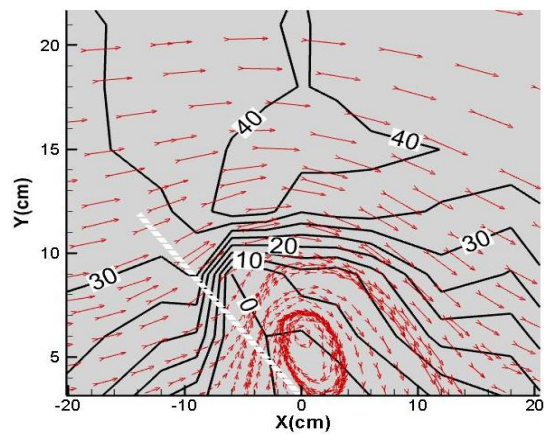
از جدول 3 چنین برداشت می‌شود که موانع نفوذپذیر، بالا دست خود را زیاد تحت تأثیر قرار نمی‌دهند به طوری که حداکثر تنش برشی در فاصله معادل L (طول آبشکن) در بالادست، برای انواع موانع، نزدیک به متوسط تنش برشی در کانال قبل از محدوده موانع می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که برای موانع میله‌ای اعم از دو ردیفه زیگزاگی یا در امتداد هم در دماغه و در پایین‌دست در مقطعی به فاصله L از موانع، تفاوت قابل ملاحظه‌ای برای تنش برشی آن‌ها با یکدیگر مشاهده نمی‌شود و در هر دو حالت تغییرات قابل توجهی در تنش برشی نسبت به تنش برشی در کانال مستقیم قبل از رسیدن به محدوده موانع وجود ندارد؛ که همین موضوع نشان‌دهنده علت عدم ایجاد آبشستگی قابل توجه در اطراف این موانع و نزدیک بودن حداکثر عمق آبشستگی برای این دو نوع مانع نفوذپذیر می‌باشد. علاوه بر این از نتایج ارائه شده در جدول 3 مشهود است که تقریباً در تمامی نقاط در محدوده عملکرد موانع، تنش برشی ایجاد شده در موانع نفوذناپذیر بیشتر از موانع نفوذپذیر و برای زاویه قرارگیری 45 درجه بیشتر از زاویه قرارگیری 135 درجه می‌باشد.

جدول 3 نسبت تنش برشی ماکزیمم به تنش برشی متوسط در مقاطع الف) بالادست، ب) دماغه و ج) پایین‌دست موانع مختلف

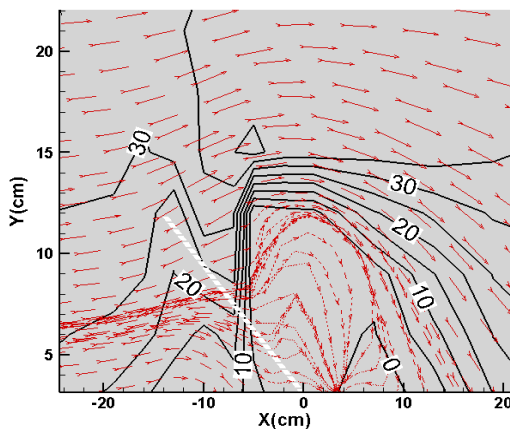
نوع مانع	زاویه 45 درجه		زاویه 135 درجه	
	بعد از دماغه	قبل از دماغه	بعد از دماغه	قبل از دماغه
مانع نفوذناپذیر	2/47	2/4	1/42	1/94
مانع توری سنگی	2/1	2/14	1/2	1/95
مانع دو ردیفه متوالی	1/17	1/18	1/09	1/17
مانع دو ردیفه زیگزاگی	1/15	1/2	0/8	1/15



الف - در لایه 0/5 سانتی متری از سطح آب

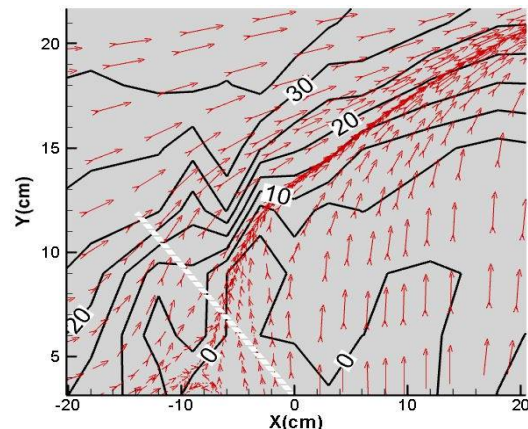


الف - در لایه 0/5 سانتی متری از سطح آب



ب- در لایه 0/5 سانتی متری از بستر کانال

شکل 11 خطوط سرعت در اطراف مانع توری سنگی



ب- در لایه 0/5 سانتی متری از بستر کانال

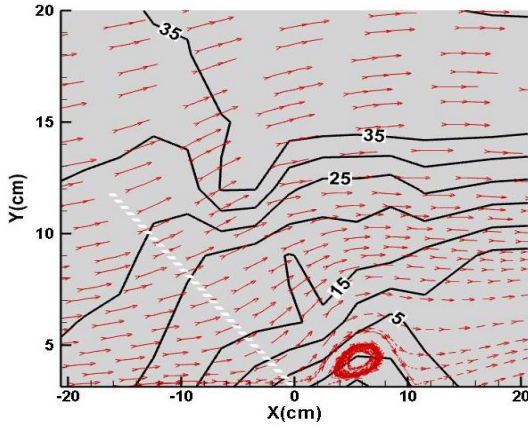
شکل 10 خطوط سرعت در اطراف مانع نفوذ ناپذیر

همان‌طور که از تصاویر پیداست و انتظار می‌رود؛ سرعت‌های طولی جریان در محدوده بین موانع باز دو ردیفه و در نزدیکی دیواره کانال نسبتاً پایین و حتی نزدیک صفر هستند. مطابق با شکل در مقطع بالادست مانع، به واسطه تأثیر مانع بر ناحیه بالادست، کاهش سرعت جریان در امتداد دیواره مجاور مانع رخ داده و سرعت در امتداد مجرای اصلی کانال به سمت دیواره مقابل افزایش یافته است.

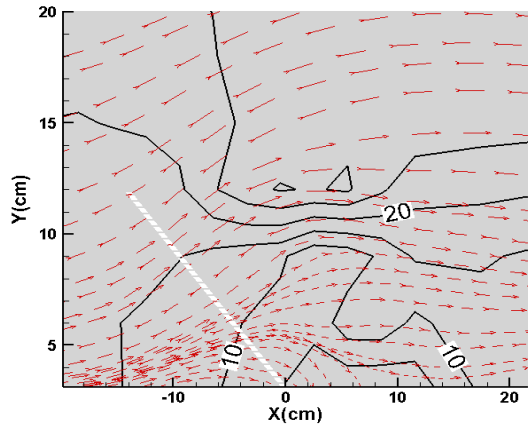
همچنین با بررسی ساختار جریان در لایه 0/5 سانتی متری از سطح آب نیز مشاهده می‌شود که میدان جریان به طور کلی در اطراف مانع نفوذناپذیر دچار تغییر شده است در حالی که در موانع باز در محدوده نزدیک به مانع و پایین دست آن، تنها انحراف اندک خطوط جریان در محل دماغه مشاهد شد.

در تمامی حالت‌ها در بالادست میدان و دور از مانع، خطوط جریان نسبتاً موازی بوده و در امتداد دیواره‌های کانال می‌باشند. با حرکت به سمت مانع، جریان تحت تأثیر حضور آن قرار گرفته و خطوط جریان به‌طور تدریجی از دیواره مجاور مانع به قسمت مرکزی کانال منحرف می‌شود. در لایه 0/5 سانتی متری از بستر و در بالادست مانع نفوذناپذیر، جریان برگشتی مشاهده می‌شود که اندرکنش آن با جریان نزدیک شونده موجب تشکیل ناحیه جدایی جریان بالادست مانع می‌شود. با دقت در شکل‌های 12 و 13 مربوط به موانع باز با نفوذپذیری 30 درصد ملاحظه می‌گردد که جریان برگشتی در بالادست این موانع شکل نمی‌گیرد. این امر به دلیل قابلیت عبور جریان از موانع می‌باشد.

موانع نشان داده شده است. زاویه قرارگیری موانع در این شکل ها نیز 45 درجه می باشد.

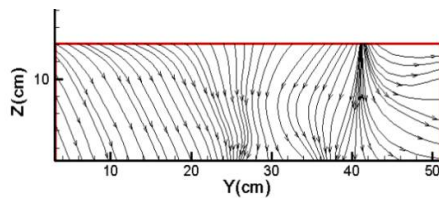


الف - در لایه 0/5 سانتی متری از سطح آب

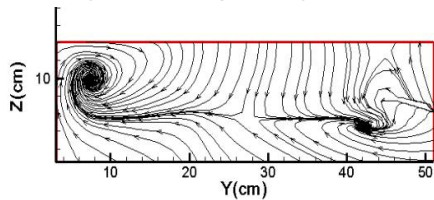


ب- در لایه 0/5 سانتی متری از بستر کانال

شکل 13 خطوط سرعت در اطراف مانع دو ردیفه زیگزاگی

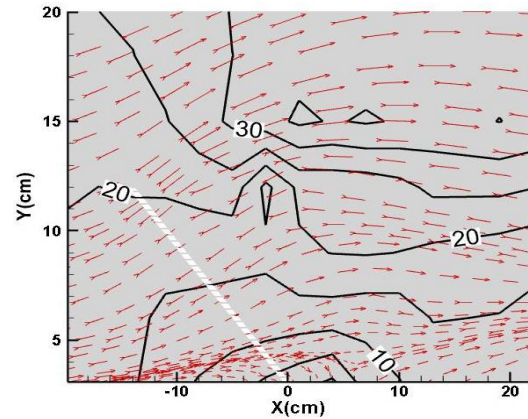


الف - مقطع 20 سانتی متری قبل از مانع

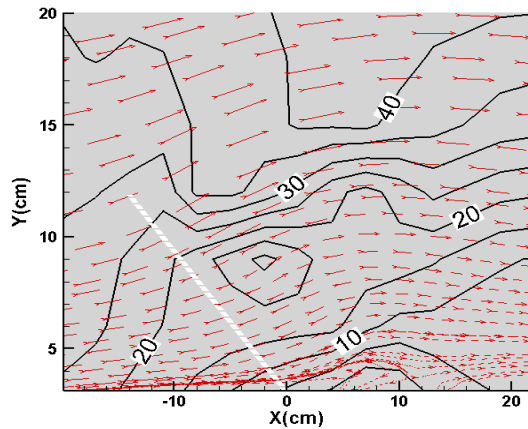


ب- مقطع 20 سانتی متری بعد از مانع

شکل 14 جریان عرضی در اطراف مانع نفوذناپذیر



الف - در لایه 0/5 سانتی متری از سطح آب



ب- در لایه 0/5 سانتی متری از بستر کانال

شکل 12 خطوط سرعت در اطراف مانع دو ردیفه در امتداد هم

با مقایسه خطوط جریان حول موانع مشاهده می شود که ساختار جریان در عمق نیز تغییر می کند. در لایه نزدیک به کف، جریان های عرضی و برگشتی بالادست مانع در اثر اختلاط با جریان پایین رونده که از لایه های فوقانی به سمت بستر در حرکت است، باعث تشکیل گردابه در صفحات افقی و قائم شده است. با افزایش عمق، جریان بالادست مانع در محل دماغه با انحراف شدیدی به سمت مرکز کانال حرکت می کند.

4-2-2- تغییرات جریان عرضی و جریان های ثانویه در اطراف موانع مختلف

در شکل های 14 تا 16 چگونگی شکل گیری جریان عرضی در اطراف موانع نفوذناپذیر، توری سنگی و میله ای دو ردیفه زیگزاگی در مقاطع عرضی 20 سانتی متری قبل و بعد از

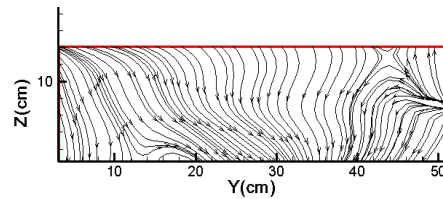
لايه‌لای سنگدانه‌های آن بیشتر شده و بخشی از انرژی این جریان با عبور از مانع، مستهلک شده و قدرت خود را از دست می‌دهد. اما همان‌گونه که در بخش قبلی، توضیحاتی در خصوص گردابه‌های افقی و عرضی بیان گردید، هر چه میزان تخلخل مانع کمتر باشد گردابه‌های تشکیل شده قوی‌تر، سرعت جریان عبوری از دماغه مانع بیشتر و استهلاک انرژی بیشتری حاصل می‌شود. برای مقایسه عملکرد موانع مختلف در استهلاک انرژی جنبشی، درصد استهلاک انرژی جنبشی برای موانع مختلف و دو زاویه قرارگیری 45 و 135 درجه محاسبه شده و در جدول 4 ارائه شده است.

با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول می‌توان نتیجه گرفت که میزان استهلاک انرژی در موانع نفوذناپذیر بیشتر از موانع نفوذپذیر است. علت این موضوع را می‌توان ناشی از گردابه‌های قوی‌تری که در مانع نفوذناپذیر ایجاد می‌شود و سبب آشفتگی بیشتر جریان می‌گردد دانست. در خصوص زاویه قرارگیری موانع نیز نتایج ارائه شده در جدول 4 بیانگر آن است که به‌طور کلی برای همه موانع، استهلاک انرژی به زاویه قرارگیری مانع وابسته است. به‌طوری‌که قرارگیری مانع با زاویه 45 درجه استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مانعی که با زاویه 135 درجه قرار می‌گیرد دارد. دلیل این امر را نیز می‌توان با توجه به چگونگی عبور جریان در اطراف این موانع دانست که قبلاً بیان گردید.

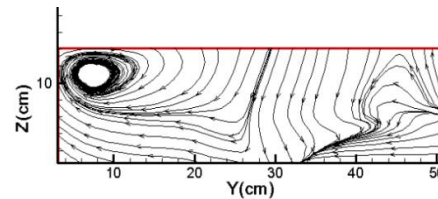
جدول 4 استهلاک انرژی جنبشی موانع مختلف (درصد)

نوع مانع	زاویه 45	زاویه 135
نفوذناپذیر	35/4	29/1
توری‌سنگی با تخلخل 30%	31/2	25/7
میله‌ای در امتداد هم	20	16/2
میله‌ای زیگزاگی	23/5	18/5

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 4 برای بازشدگی یکسان 30 درصد در موانع توری‌سنگی، موانع باز دو ردیفه در امتداد هم و زیگزاگی با زاویه قرارگیری 45 درجه و 135 درجه قابل مشاهده است که علی‌رغم نفوذپذیری یکسان انواع موانع نفوذپذیر بررسی شده، استهلاک انرژی

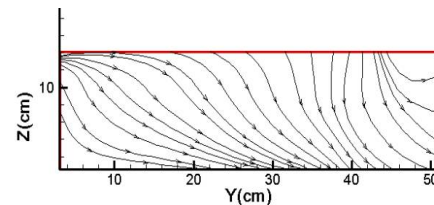


الف - مقطع 20 سانتی‌متری قبل از مانع

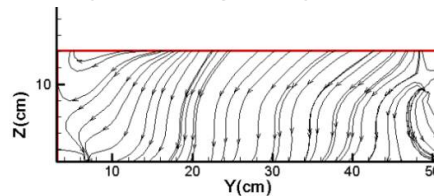


ب - مقطع 20 سانتی‌متری بعد از مانع

شکل 15 جریان عرضی در اطراف مانع توری‌سنگی



الف - مقطع 20 سانتی‌متری قبل از مانع



ب - مقطع 20 سانتی‌متری بعد از مانع

شکل 16 جریان عرضی در اطراف مانع میله ای دو ردیفه زیگزاگی

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود علی‌رغم تشابه نسبی الگوی جریان عرضی در قبل از مانع، شدت گردابه‌های عرضی شکل گرفته ناشی از جریان ثانویه متأثر از حضور موانع در بعد از آن‌ها به‌شدت با یکدیگر متفاوت است. به‌طوری‌که در مانع توری‌سنگی در مقایسه با مانع نفوذناپذیر، گردابه‌های عرضی ضعیف‌تر گردیده و در مانع میله‌ای دو ردیفه بسیار ضعیف‌تر می‌شود.

4-2-3- بررسی اثر موانع مختلف بر استهلاک انرژی

به‌طور کلی افزایش آشفتگی باعث کاهش انرژی جریان می‌شود. با افزایش درصد تخلخل مانع، جریان عبوری از

زیگراگی در زاویه قرارگیری 45 درجه به ترتیب 29/8، 14/2، 10/8 و 12/9 درصد بیشتر از تنش برشی بستر در موانع با زاویه قرارگیری 135 درجه است. با توجه به این که در ساخت مانع نفوذپذیر با درصد یکسان نفوذپذیری؛ امکان استفاده از موانع توری سنگی و میله‌ای موجود می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که موانع توری سنگی در مقایسه با موانع میله‌ای دو ردیفه، هم استهلاک انرژی بیشتری ایجاد می‌کند و هم تنش برشی بیشتری به وجود می‌آورد. از آنجا که موانع میله‌ای دوردیفه می‌توانند به صورت در امتداد هم یا زیگراگی ساخته شوند نتایج نشان می‌دهد که استهلاک انرژی در موانع زیگراگی بیشتر از موانع در امتداد هم می‌باشد و حضور این موانع، تنش برشی بیشتری بر کف وارد می‌سازد.

6- فهرست علائم

A	مساحت هر سلول
d_{50}	قطری که 50% ذرات از آن کوچکترند
g	شتاب گرانش زمین
k	انرژی جنبشی
m	جرم
n	ضریب مانینگ
R	شعاع هیدرولیکی
S	شیب کف کانال
t_b	تنش برشی کف
U, V	سرعت متوسط‌گیری شده در جهت X و Y
ρ	چگالی
τ_r, τ_θ	تنش برشی کف در جهت مماسی و شعاعی
y	عمق جریان
w', v', u'	مؤلفه‌های نوسانی سرعت

7- منابع

رزمجو، م. ق. (1390). تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر روی تغییرات بستر در اطراف آبشکن‌های باز و بسته. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

موانع توری سنگی در مقایسه با موانع میله‌ای دوردیفه با هر آرایش هندسی بیشتر است، اما استهلاک انرژی در موانع میله‌ای دوردیفه کاملاً متأثر از آرایش هندسی میله‌های آن‌ها می‌باشد، به طوری که مقدار استهلاک انرژی برای موانع میله‌ای دوردیفه زیگراگی بیشتر از موانع میله‌ای دو ردیفه در امتداد هم می‌باشد. در موانع زیگراگی، میله‌های ردیف دوم در مقابل فضای خالی بین میله‌های ردیف اول قرار می‌گیرند؛ به همین دلیل جریان عبوری از ردیف اول در راستای حرکت خود به میله‌های ردیف دوم برخورد می‌کند. این برخورد باعث افت شدید انرژی در جریان نسبت به آرایش در امتداد هم شده است.

5- نتیجه‌گیری

برای مقایسه عملکرد انواع موانع نفوذپذیر زاویه‌دار، شامل مانع توری سنگی و مانع میله‌ای دوردیفه با دو آرایش زیگراگی و در امتداد هم، بررسی تجربی صورت پذیرفت. این مقایسه برای نفوذپذیری 30 درصد و زوایای قرارگیری موانع نسبت به امتداد جریان 45 و 135 درجه در کانال مستقیم با بستر متحرک انجام شد. در این پژوهش، تنش برشی وارد بر کف برای انواع موانع به همراه اثر هر یک از آن‌ها بر استهلاک انرژی بررسی گردید. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که تنش برشی در اطراف موانع نفوذپذیر کمتر از موانع نفوذناپذیر می‌باشد؛ به طوری که متوسط تغییرات تنش برشی در مانع نفوذناپذیر نسبت به موانع توری سنگی، دو ردیفه زیگراگی و دو ردیفه در امتداد هم به ترتیب 14/6، 45 و 39/6 درصد می‌باشد. همچنین استهلاک انرژی در موانع نفوذناپذیر بیشتر از موانع نفوذپذیر است. زاویه قرارگیری مانع نسبت به امتداد جریان بر استهلاک انرژی و تنش برشی بستر مؤثر می‌باشد؛ به طوری که میزان استهلاک انرژی در زاویه قرارگیری 45 درجه نسبت به امتداد جریان در موانع نفوذناپذیر، توری سنگی، دو ردیفه در امتداد هم و زیگراگی به ترتیب حدود 27/3، 23/3، 21/6 و 21/9 درصد بیشتر از استهلاک انرژی در زاویه قرارگیری 135 درجه موانع نسبت به امتداد جریان می‌باشد. همچنین تنش برشی بستر در موانع نفوذناپذیر، توری سنگی، در امتداد هم و

- Kazemi, M, Shafaei Bojestan, M and Atashi, V, (2011). Investigation of shear stress in a sharp-angle arc of 90 degrees with and without overflow, Third National Conference on Integrated Water Resources Management, Sari, Iran.
- Molinas, A., Kheireldin, K. and Baosheng, W. (1998). Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8), pp. 822-830.
- Rajaratnam, N. and Nwachukwu B. A. groin-like structures. *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.* 109: 463-480.
- Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B. (1983). "Erosion near groyne-like structures", *J. Hydraul.* 21(4), pp. 277-287.
- Sheibani, H, R, Bayat, H.A. (2006). Flow velocity and shear stress Reynolds on the crest of the Gabion overflow dam, *Esteghlal J*, 26 (1).
- Tingsanchali, T. Maheswaran, S. (1990). "2-D depth averaged flow computation near groyne", *J. Hydraul Eng.* 116(1) pp. 71-86.
- Vaghefi, M, Ghodsian, M, S. Moosavi Naeini, A and Panah Pour, N. (2010). Laboratory study of two-dimensional shear stress variations in a 90 degree arc using an average velocity method, Tenth conference Golbal irrigation and reduce evaporate.
- Vittal, N., Kothiyari, U. C., Haghighat, M. (1994). Clear water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 120, (11): 1309-1318.
- Zhang, H. Nakagawa, H, 2009. Characteristics of local flow and bed deformation at impermeable and permeable spur dykes. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol 53, February.
- رمضانی، ی.، قمشی، م. (1393). مطالعه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در حضور پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق روی دشت سیلابی. *مجله علمی پژوهش هیدرولیک*، دوره 9، شماره 1، ص. 45-57.
- مهرآیین، م. (1393). مبنای استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی در مهندسی هیدرولیکی با تأکید بر دستگاه سرعت‌سنج صوتی تک نقطه‌ای. *پژوهشکده آب، دانشگاه تربیت مدرس*.
- Ahmed, F. and Rajaratnam, N. (2000). Observations on flow around an abutment. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(1), pp. 51-59.
- Ahmed, M. (1951). "Spacing and protection", 46, London.
- Chand, F. (1998). Maryland SHA procedure for estimating scour at bridge abutments part 2-clear water scour, *ASCE Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference held in Memphis*, 1: pp. 169-173.
- Fazli, M. Vaghefi, M. Ghodsian, M. (2009). "Investigation and comparison of shear stress calculation methods in arc channels", 8th International Congress of Civil Engineering, University of Shiraz, Iran (In Persian).
- Gharib zade, A. Afzali Mehr, H. Moradian, M. and Baghbani, R. (2012). "The role of components of reynolds stresses and kinetic energy of turbulence in scouring around elliptical bridges", 9th International Conference of River Engineering, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran (In Persian).
- Hooshmandi, F. Zahiri, A. Meftah Helghi, A.A. (2015). "Comparison of methods for estimating shear stress distribution in width of open channels", Short Technical Report, *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(5) (In Persian).