

نیم‌رخ‌های آب‌شستگی و تغییرات تنش‌های برشی در حفره در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس

حسین خلیلی شایان^۱، جواد فرهودی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

* کرج، صندوق پستی ۴۱۱۱-۳۱۵۸۷

jfarhoudi@ut.ac.ir

چکیده- در این مطالعه تشابه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی حاصل از جریان مستغرق خروجی از دریچه‌های کشویی در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس بررسی شده است. برای این منظور از نتایج ۲۳۳ آزمایش و برداشت ۳۲۶۲ نیم‌رخ حفره در گستره وسیعی از اعداد فرود، دانه‌بندی ذرات رسوبی، عمق پایاب، طول و شیب حوضچه معکوس استفاده شد. نتیجه تحقیقات نشان داد نیم‌رخ‌های آب‌شستگی در پایاب هر شیب حوضچه، خودمتشابه هستند. معادله‌ای چندجمله‌ای برای توصیف نیم‌رخ‌های بدون بعد حفره در شیب‌های مختلف ارائه گردید. در یک حالت خاص از عدد فرود ذره، عمق پایاب و طول حوضچه، افزایش شیب حوضچه معکوس از صفر به ۱۵/۶٪، سبب کاهش ۱۵٪ در عمق بیشینه آب‌شستگی خواهد شد. روشی نظری جهت تقریب تنش ناشی از وزن ذره، تنش برشی بستر و تنش برشی در آستانه حرکت ذره در طول حفره آب‌شستگی، ارائه شد. مشاهدات نشان داد تنش‌های برشی بستر و وزن در طول حفره، بر اساس یک روند مشابه با زمان تغییر می‌کنند. در پایان، تأثیر هندسه حوضچه بر تغییرات تنش‌های برشی و وزن بررسی گردید.

کلید واژگان: تشابه ذاتی، تنش برشی بستر، جت مستغرق، حوضچه آرامش معکوس، نیم‌رخ آب‌شستگی.

۱- مقدمه

سوی جریان در مجاورت سازه از تنش برشی مربوط به آستانه حرکت ذرات بیشتر باشد. در چنین شرایطی، ذرات سازنده بستر توسط جریان آب کنده شده و سپس حمل می‌شوند که نتیجه آن بر هم خوردن وضعیت ریختاری رودخانه و ایجاد حفره آب‌شستگی در اطراف سازه خواهد بود. بدیهی است توسعه این حفره ممکن است پایداری سازه را تهدید کند. مجموعه مطالعات انجام شده

آب‌شستگی در اطراف سازه‌های آبی احداث شده روی پی‌های نفوذپذیر، از جمله مهمترین مسائلی است که عملکرد اولیه مورد انتظار از این سازه و پایداری آن را در طول زمان بهره‌برداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده در پایاب سازه‌ها، علاوه بر شرایط حضور جریان‌های موضعی، هنگامی رخ می‌دهد که تنش برشی وارده از

می‌باشد که در نوع خود پیچیده و زمان‌بر است. (1986) Ali and Lim با اندازه‌گیری سرعت جریان در مجاورت بستر حفره، تغییرات تنش برشی بستر را در طول حفره محاسبه کردند. (Hogg et al. 1997). مدلی تحلیلی را برای پیش‌بینی دوبعدی حفره آب‌شستگی در نتیجه یک جت دیواره‌ای متلاطم ارائه کردند. ایشان تغییرات زمانی حفره آب‌شستگی را با انتگرال‌گیری از معادله بقای حجمی رسوب محاسبه و نتایج را با نیم‌رخ‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. (Dey and Westrich 2003) به‌واسطه حل معادله انتگرالی مومتم فن-کارمن (Schlichting and Gersten 2000) و استفاده از نتایج اندازه‌گیری سرعت جریان در طول حفره، عباراتی را برای تعیین تنش برشی مجاور بستر به‌علت جریان‌های برگشتی در وجه بالادست و جریان‌های رو به‌جلو در وجه پایین‌دست حفره به‌دست آوردند. Adduce and Sciortino (2006) مدلی ریاضی را برای شبیه‌سازی نیم‌رخ آب‌شستگی ناشی از یک جت دوبعدی افقی ارائه کردند. این مدل قادر به تعیین تغییرات تنش برشی مجاور بستر در طول حفره در زمان‌های مختلف می‌باشد. به هر ترتیب، تاکنون معادلات مدونی برای تخمین انواع تنش‌های برشی در طول حفره آب‌شستگی با هندسه دلخواه به‌جهت پیچیدگی موضوع ارائه نشده است.

در این مطالعه، نخست تشابه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی در پایاب حوضچه‌های آرامش افقی و معکوس ناشی از جت مستغرق خروجی از دریچه کشویی بر اساس نتایج آزمایشگاهی بررسی می‌شود. سپس معادلاتی برای توصیف نیم‌رخ حفره در هر زمان، ارائه می‌گردد. بر اساس مفهوم بردار نیروها و تعادل یک ذره رسوبی منفرد در طول حفره، روشی نظری پیشنهاد می‌شود که با داشتن نیم‌رخ‌های آب‌شستگی در هر زمان، بتوان انواع مختلف تنش‌های برشی را در طول حفره محاسبه و روند تغییرات آنها را با زمان بررسی کرد. همچنین تأثیر طول و شیب حوضچه بر تغییرات این تنش‌ها بررسی می‌شود.

توسط محققان در زمینه توسعه حفره آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌ها را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم کرد: برخی از محققان به مطالعه هندسه حفره آب‌شستگی در زمان‌های مختلف پرداخته‌اند و برخی دیگر عوامل مؤثر بر توسعه حفره را بررسی کرده‌اند. برخی از محققان، در طی تحقیقات خود چنین گزارش کردند که اگر نیم‌رخ‌های آب‌شستگی به صورت مناسب بی‌بعد شوند، شکل حفره از نظر هندسه مشابه و مستقل از زمان و اندازه ذرات رسوبی خواهد بود (Laursen, 1952, Hassan and Narayanan, 1985, Farhoudi and Smith, 1985, Chatterjee et al., 1994, Dey and Sarkar, 2006). در این میان، (Dargahi 2003) و (Oliveto et al. 2011) هیچ‌گونه تشابهی بین نیم‌رخ‌های آب‌شستگی مشاهده نکردند.

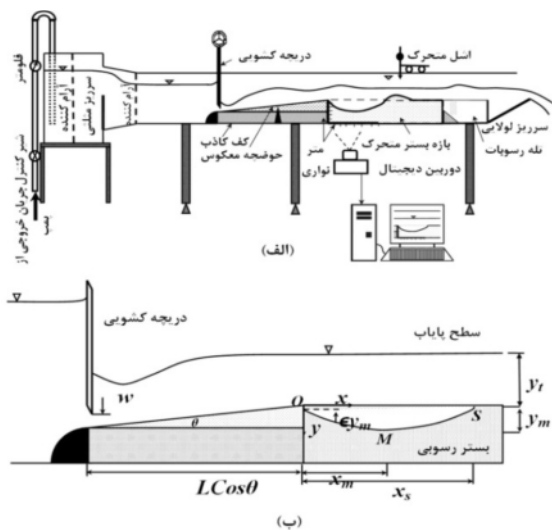
از جمله زمینه‌های مورد علاقه محققین، بررسی تغییرات سرعت و تنش برشی در طول و عمق حفره آب‌شستگی است. در طول توسعه فرایند آب‌شستگی موضعی با زمان، سه نوع تنش بر شکل‌گیری حفره آب‌شستگی مؤثر است؛ تنش برشی ناشی از وزن مستغرق ذره روی وجوه شیبدار بالادست و پایین‌دست حفره، تنش برشی ناشی از سرعت‌های جریان در مجاورت بستر و تنش برشی در آستانه حرکت ذره رسوبی (Adduce and Sciortino 2006). از یک دیدگاه، پیشرفت آب‌شستگی تا زمانی ادامه خواهد یافت که برآیند تنش برشی بستر و تنش ناشی از وزن مستغرق ذره در امتداد جابه‌جایی بیشتر از تنش برشی در آستانه حرکت ذره رسوبی باشد. اطلاع از روند تغییرات تنش برشی در ناحیه حفره آب‌شستگی در تعیین بار بستر انتقال یافته با گذشت زمان و پیش‌بینی تغییرات سرعت در طول و عمق حفره آب‌شستگی مفید است. از سویی هر گونه اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در مجاورت بستر آنها در جریان‌های یکنواخت با استفاده از لوله ستون امکان‌پذیر است. اندازه‌گیری غیرمستقیم تنش برشی نیز مستلزم اندازه‌گیری سرعت‌های مجاور بستر

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- برداشت نیم‌رخ‌های آب‌شستگی از نتایج آزمایشگاهی

به منظور مطالعه وضعیت نیم‌رخ‌های آب‌شستگی ناشی از جت مستغرق خروجی از دریچه کشویی در پایاب حوضچه‌های آرامش افقی و حوضچه‌های آرامش معکوس، از نتایج انجام ۲۳۳ آزمایش و برداشت ۳۲۶۲ نیم‌رخ بر روی یک مدل آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه تحقیقات آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱-الف استفاده شد. آزمایش‌ها در محدوده گسترده‌ای از ذرات رسوبی با دانه‌بندی یکنواخت D_{50} ، طول نسبی L/w و شیب حوضچه آرامش معکوس $S_o = -\tan \theta$ ، عدد فرود اولیه پرش Fr_1 و عمق نسبی پایاب y_1/y_l انجام شد. (y_l) عمق پایاب، L طول حوضچه، θ زاویه شیب حوضچه معکوس، w بازشدگی دریچه و y_1 عمق آب در ناحیه تنگ‌شدگی (جدول ۱). برای اندازه‌گیری دبی جریان در هر حالت از یک سرریز مثلثی واسنجی شده توسط یک فلومتر الکترو مغناطیسی فلنچی استفاده شد. آزمایش‌ها پس از برقراری نسبی شرایط جریان از قبیل تنظیم دبی، بازشدگی دریچه و عمق پایاب در پایان آزمایش قبلی شروع می‌شد. به منظور جلوگیری از آب‌شستگی ناخواسته رسوبات در لحظات اولیه آزمایش تا رسیدن به شرایط مورد انتظار، سطح صاف رسوبات از پایین دست به آرامی از آب پر شده و پس از رسیدن سطح آب به مقدار مناسب، آزمایش جدید آغاز می‌گردید. در هر آزمایش نیم‌رخ آب‌شستگی در زمان‌های ۱۵ و ۳۰ ثانیه، ۱ و ۲ و ۴ و ۸ و ۱۵ و ۳۰ دقیقه، ۱ و ۲ و ۴ و ۸ و ۱۲ و ۱۸ و ۲۴

ساعت (ندرتاً ۴۸ ساعت تا ۵۶ ساعت) به واسطه تکنیک عکس‌برداری برداشت و رقومی شد. به منظور بررسی کفایت زمان انجام آزمایشات معادل ۲۴ ساعت، آزمایشی شاهد در مدت ۵۴ ساعت و در شرایط $(S_o = -0.076, Fr_1 = 9.15, D_{50} = 1.11\text{mm})$ انجام شد. شکل ۲ نشان می‌دهد چنانچه وضعیت حفره در پایان ۵۴ ساعت آزمایش به عنوان شرایط تعادل نسبی در نظر گرفته شود، نزدیک به ۸۷/۵٪ از عمق بیشینه در پایان ۵۴ ساعت آزمایش، در مدت ۲۴ ساعت آزمایش حاصل می‌شود. مشاهده می‌شود پس از گذشت ۲۴ ساعت شیب تغییرات عمق بیشینه با زمان $(\frac{dy_m}{dt})$ ، تغییر قابل توجهی نخواهد کرد. با این وجود مسأله عدم دستیابی به تعادل دینامیکی بستر آب‌شستگی قبلاً توسط et al. (2000) Balachandar در نتیجه انجام یک آزمایش ۹۶ ساعته گزارش شده است.



شکل ۱ الف- مدل آزمایشگاهی، ب- طرحی از حفره آب‌شستگی

جدول ۱ دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

پارامتر	Fr_1	$\frac{y_l}{y_1}$	$\frac{L}{w}$	S_o	$D_{50} (mm)$
دامنه تغییرات	۳/۸-۱۱/۱	۲/۹-۲۴/۶	۴۷/۲-۸۴/۳	۰-(-۰/۱۵۶)	۰/۵۸-۱/۷۸

۲-۲- روش پیشنهادی

مشاهدات نشان می‌دهد جز در مراحل اولیه آب‌شستگی که بخش معینی از رسوبات انتقال یافته را بار معلق تشکیل می‌دهد، بخش اعظم رسوبات با گذشت زمان در قالب بار بستر منتقل می‌شوند (Farhoudi and Smith, 1985).

حرکت ذره رسوبی است که در شرایط انتقال ذره روی بستر شیب‌دار به صورت تابعی از موقعیت مکانی و تنش برشی در آستانه حرکت ذره روی بستر افقی (τ_{cr}^*) تعریف می‌شود (Meyer-Peter and Muller, 1948).

$$\tau_{cr}^* = 0.047 \gamma_w (S_s - 1) D_{50} \quad (3)$$

از معادله (۱) در طول بازه انتقال Δx و در مدت Δt می‌توان نوشت:

$$\frac{q_{2(B)} - q_{1(B)}}{\Delta x} = (n-1) \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (4)$$

معادله (۴) را با بهره‌گیری از معادله (۲) می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت.

$$(\tau_{o(2)} - \tau_{cr(2)}) = \left[\frac{\sqrt{\rho} \gamma_w (S_s - 1)}{8} \left(q_{1(B)} + (n-1) \Delta x \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

در طول جابجایی ذره رسوبی در طول حفره آب‌شستگی دو نوع تنش بر ذره وارد می‌شود: تنش برشی ناشی از وزن ذره در امتداد جابه‌جایی، τ_w و تنش برشی وارده از سوی بستر، τ_b . در نتیجه:

$$\tau_o = \tau_b + \tau_w \quad (6)$$

انتقال رسوبات هنگامی انجام می‌شود که $\tau_o > \tau_{cr}$. با استفاده از مجموعه معادلات (۵) و (۶) می‌توان رابطه (۷) را نوشت.

$$\tau_{b(x_2, t_2)} = \tau_{cr(x_2, t_2)} - \tau_{w(x_2, t_2)} + \left[\frac{\sqrt{\rho} \gamma_w (S_s - 1)}{8} \left(q_{B(x_1, t_1)} + (n-1) \Delta x \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

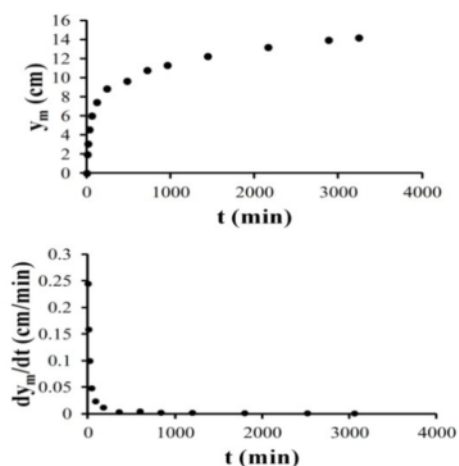
که در آن:

$$q_{B(x_1, t_1)} = \frac{8}{\sqrt{\rho} \gamma_w (S_s - 1)} (\tau_{o(1)} - \tau_{cr(1)})^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

و $x_2 = x_1 + \Delta x$, $t_2 = t_1 + \Delta t$ در شروع فرایند آب‌شستگی روی سطح صاف رسوبات در مبدا زمان $t_0 = 0$ و مکان $x_0 = 0$ ، با فرض عدم آورد رسوبات بستری از بالادست خواهیم داشت:

$$q_{0(B)} = q_{B(x_0, t_0)} = 0 \quad (9)$$

برشی بستر در طول حفره آب‌شستگی در هر زمان دلخواه



شکل ۲ تغییرات عمق بیشینه با زمان در طی یک آزمایش ۵۴ ساعته

معادله بقای رسوب در واحد عرض حفره و با فرض عدم آورد رسوب از بالادست را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت (Farhoudi and Smith, 1985):

$$(1-n) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

که در آن، $y = y(x, t)$ معادله نیم‌رخ حفره در فاصله x از مبدا و در زمان t ، n تخلخل ذرات رسوبی و q_B دبی بار بستر در واحد عرض است. از سویی معادله پیشنهادی (Meyer-Peter and Muller, 1948) جهت برآورد دبی انتقال رسوب در واحد عرض را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت (Hogg et al., 1997).

$$q_B = \frac{8}{\sqrt{\rho} \gamma_w (S_s - 1)} (\tau_o - \tau_{cr})^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

که در آن، τ_o تنش برشی وارده بر ذره، γ_w وزن مخصوص آب، ρ جرم مخصوص آب و S_s چگالی نسبی ذرات رسوبی است. τ_{cr} نیز تنش برشی در آستانه

همچنین، $\vec{e}_s = \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|}$ بردار یکه در راستای جابه‌جایی ذره مستغرق ذره در راستای جابه‌جایی و تنش برشی در آستانه حرکت ذره و معلوم بودن نیم‌رخ آب‌شستگی در آن زمان، به دست دهد. در نتیجه لازم است عباراتی به منظور تعیین $\tau_w(x)$ و $\tau_{cr}(x)$ روی سطح حفره آب‌شستگی استخراج شود. شایان ذکر است که به علت انتقال ذره رسوبی روی سطح نیم‌رخ دو بعدی حفره آب‌شستگی، $\tau_w(x)$ و $\tau_{cr}(x)$ توابعی از موقعیت مکانی ذره رسوبی روی سطح نیم‌رخ آب‌شستگی هستند.

از شروع آب‌شستگی را منوط به تعیین تنش ناشی از وزن مستغرق ذره در راستای جابه‌جایی و تنش برشی در آستانه حرکت ذره و معلوم بودن نیم‌رخ آب‌شستگی در آن زمان، به دست دهد. در نتیجه لازم است عباراتی به منظور تعیین $\tau_w(x)$ و $\tau_{cr}(x)$ روی سطح حفره آب‌شستگی استخراج شود. شایان ذکر است که به علت انتقال ذره رسوبی روی سطح نیم‌رخ دو بعدی حفره آب‌شستگی، $\tau_w(x)$ و $\tau_{cr}(x)$ توابعی از موقعیت مکانی ذره رسوبی روی سطح نیم‌رخ آب‌شستگی هستند.

$$\vec{e}_s = \frac{1}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \vec{i} + \frac{y'_x}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \vec{j} \quad (13)$$

که در آن، \vec{i} بردار یکه در راستای افقی و y'_x شیب خط مماس بر نیم‌رخ حفره در هر نقطه است. در نتیجه:

$$\vec{\tau}_w = -\frac{wy'_x}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \vec{i} + \frac{y'_x}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \vec{j} \right) \quad (14)$$

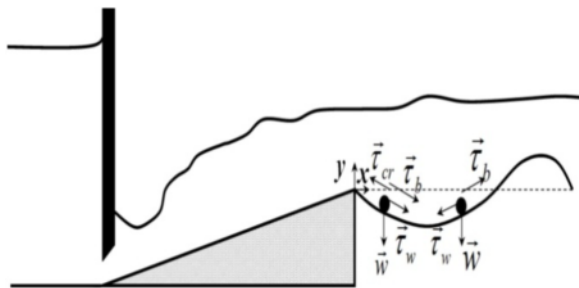
بنابراین مقدار تنش برشی ناشی از وزن مستغرق ذره عبارت است از:

$$\tau_w = -\frac{wy'_x}{\sqrt{1+(y'_x)^2}} \quad (15)$$

با جای‌گذاری تعریف تنش برشی در آستانه حرکت ذره روی سطح افقی از معادله (۱۰) می‌توان نوشت:

$$\tau_w = -\frac{\tau_{cr}^* y'_x}{\tan \phi \cdot \sqrt{1+(y'_x)^2}} \quad (16)$$

از معادله (۱۶) و شکل ۳ مشخص است که در شرایط انتقال ذره رسوبی روی وجه بالادست حفره $y'_x < 0$ ، در نتیجه $\tau_w > 0$ ، یعنی تنش برشی ناشی از وزن ذره همسو با راستای جریان است و $\tau_o = \tau_b + \tau_w$. همچنین در شرایط انتقال ذره رسوبی روی وجه پایین دست حفره $y'_x > 0$ ، در نتیجه $\tau_w < 0$ ، یعنی تنش برشی ناشی از وزن ذره در خلاف جهت جریان است و $\tau_o = \tau_b - \tau_w$.



شکل ۳ انواع تنش‌های مؤثر بر ذره رسوبی در طول حفره آب‌شستگی

۲-۲-۱- تعیین تنش برشی ناشی از وزن مستغرق ذره

برای انتقال روی سطح نیم‌رخ آب‌شستگی $\tau_w(x)$ تنش ناشی از وزن مستغرق ذره (W) با فرض ذره کروی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w = \frac{W}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (9)$$

در شرایط آستانه حرکت ذره رسوبی روی سطح افقی:

$$\tau_{cr}^* = w \cdot \tan \phi \quad (10)$$

که در آن ϕ زاویه ایستایی ذره رسوبی است (زاویه ایستایی ذره رسوبی به صورت زاویه بین پاره خط وصل کننده مراکز دو ذره و راستای عمود بر سطح قرار گیری ذره تعریف می‌شود). در معادله (۱۰) فرض بر حرکت ذرات به صورت لغزشی بر روی یکدیگر است؛ حال آنکه ممکن است بخشی از رسوبات به صورت پرش‌های کوتاه حرکت کنند. بردار تنش برشی ناشی از وزن ذره در راستای قائم \vec{w} عبارت است از:

$$\vec{w} = -w \cdot \vec{j} \quad (11)$$

که در آن \vec{j} بردار یکه در راستای قائم است. بردار تنش برشی ناشی از وزن ذره در امتداد جابه‌جایی $\vec{\tau}_w$ نیز به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$\vec{\tau}_w = \text{proj}_{\vec{e}_s}^{\vec{w}} = \frac{\vec{w} \cdot \vec{e}_s}{|\vec{e}_s|^2} \vec{e}_s \quad (12)$$

که در آن $\text{proj}_{\vec{e}_s}^{\vec{w}}$ تصویر بردار \vec{w} در راستای \vec{e}_s است.

لذا از مجموعه معادلات (۵) و (۲۱)، تنش برشی بستر در هر موقعیت زمانی و مکانی در طول توسعه حفره آب‌شستگی با فرض عدم تشکیل فرم بستری، به طور مستقیم از رابطه (۲۲) قابل برآورد است:

$$\tau_{b(x_2, t_2)} = \frac{\tau_{cr}^*}{\tan \phi \cdot \sqrt{1 + (y'_x)^2}} (y'_x + \tan \phi) + \quad (22)$$

$$\left[\frac{\sqrt{\rho} \gamma_w (S_s - 1)}{8} \left(q_{B(x_1, t_1)} + (n-1) \Delta x \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \right]^2$$

استخراج معادلات مختلف تقریب‌زننده تنش‌ها در ناحیه حفره، مبتنی بر فرضیات ساده‌کننده است. معادله (۱)، پیوستگی رسوب را در راستای اصلی جریان به دست می‌دهد؛ درحالی‌که ماهیت پدیده آب‌شستگی سه بعدی است. در نتیجه تدقیق روابط پیشنهادی تقریب‌زننده تنش‌ها، نیاز به اطلاع از تغییرات نیم‌رخ عرضی حفره با زمان و ورود مولفه سوم ابعاد حفره در معادله (۱) است. از سوی دیگر، معادله (۲۲) تغییرات طولی تنش برشی را بر اساس فرض جریان یک‌بعدی، پارامترهای متوسط جریان و توزیع نیمه لگاریتمی سرعت در عمق آب و بدون چرخش جریان به دست می‌دهد. لازم است نامطمئن‌های معادلات توصیفی از روش پیشنهادی بخصوص به جهت انحراف از وضعیت جریان چرخشی در وجه بالادست حفره با نتایج تجربی بررسی شوند. یک کاربرد روش پیشنهادی فوق، تعیین نیم‌رخ زمانی حفره آب‌شستگی با اتنگرال‌گیری عددی از معادله (۵)، پس از تعیین تنش دینامیکی بستر و مقایسه با نتایج تجربی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تشابه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی

شکل ۱- ب پارامترهای مختلف مورد بررسی در پدیده تشابه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی را نشان می‌دهد. در این تحقیق به منظور بررسی تشابه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی، شکل‌گیری تل‌ماسه در پایین دست حوضچه مورد توجه قرار نگرفته است. زیرا اعتقاد بر این است که شکل‌گیری

۲-۲-۲- تعیین تنش برشی در آستانه حرکت ذره برای

انتقال روی سطح نیم‌رخ آب‌شستگی $\tau_{cr}(x)$

برای این منظور لازم است تصویر تنش ناشی از وزن ذره در راستای قائم \vec{W} در امتداد عمود بر راستای سطح نیم‌رخ تعیین شود:

$$proj_{\vec{e}_n}^{\vec{w}} = \frac{\vec{w} \cdot \vec{e}_n}{|\vec{e}_n|^2} \vec{e}_n \quad (17)$$

که در آن، $\vec{w} = -w \cdot \vec{j}$ و $\vec{e}_n = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$ بردار یکه در راستای عمود بر سطح آب‌شستگی ($\vec{n} = -y'_x \vec{i} + \vec{j}$) است و به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود.

$$\vec{e}_n = \frac{y'_x}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \vec{i} - \frac{1}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \vec{j} \quad (18)$$

در نتیجه:

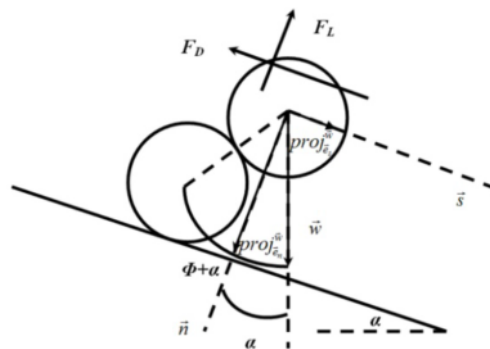
$$proj_{\vec{e}_n}^{\vec{w}} = \frac{w}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \left(\frac{y'_x}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \vec{i} - \frac{1}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \vec{j} \right) \quad (19)$$

از تعادل چرخشی ذره در شرایط آستانه حرکت حاصل از گشتاورهای نیروی کششی (F_D)، نیروی بلند کننده (F_L)، وزن ذره (W) حول مرکز آن، مشابه شرایط تعادل ذره روی بستر افقی می‌توان نوشت (شکل ۴):

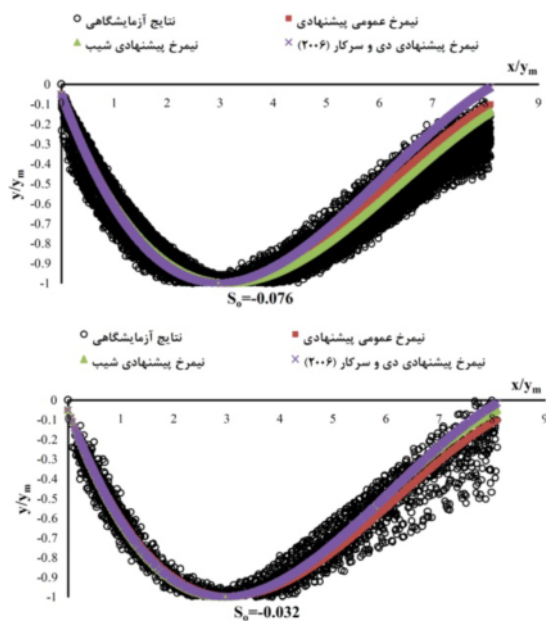
$$\hat{\tau}_{cr} = \frac{w \cdot \tan \phi}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} = \frac{\tau_{cr}^*}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} \quad (20)$$

در نتیجه از معادلات (۱۶) و (۲۰) می‌توان نوشت:

$$\tau_o - \tau_{cr} = \tau_b - \frac{\tau_{cr}^*}{\tan \phi \cdot \sqrt{1 + (y'_x)^2}} (y'_x + \tan \phi) \quad (21)$$



شکل ۴ تعیین تنش برشی ناشی از وزن و تنش برشی در آستانه حرکت ذره روی سطح شیب‌دار حفره



شکل ۵ نمونه نیم‌رخ‌های بی‌بعد حفره آب‌شستگی در پایاب شیب‌های ۰/۰۷۶- و ۰/۰۳۲-

ضریب K_1 از شیب نمودار تغییرات $\left(\frac{x_m}{w} - \frac{y_m}{w}\right)$ و ضریب K_2 از شیب نمودار تغییرات $\left(\frac{x_s}{w} - \frac{y_m}{w}\right)$ از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در پایاب هر شیب حوضچه معکوس تعیین می‌شود. شکل ۶ استخراج ضرایب K_1 و K_2 را در شیب ۰/۰۷۶- به طور نمونه نشان می‌دهد. همچنین از مجموعه نتایج آزمایشگاهی در پایاب تمام شیب‌های معکوس مورد مطالعه، مقادیر متوسط ضرایب K_1 و K_2 برای استنتاج یک نیم‌رخ عمومی پیشنهادی، به ترتیب معادل با ۳/۰۶۶ و ۹/۲۴۶ استخراج گردید. جدول ۲ نیز مقادیر ضرایب معادله (۲۳) را وابسته به شیب حوضچه به دست می‌دهد. همچنین ضرایب نیم‌رخ عمومی حاصل از مجموعه نتایج آزمایشگاهی در پایاب تمام شیب‌ها و نیم‌رخ پیشنهادی از جت مستغرق خروجی از دریچه کشویی در پایاب حوضچه آرامش افقی، در جدول ۲ نشان داده شده است.

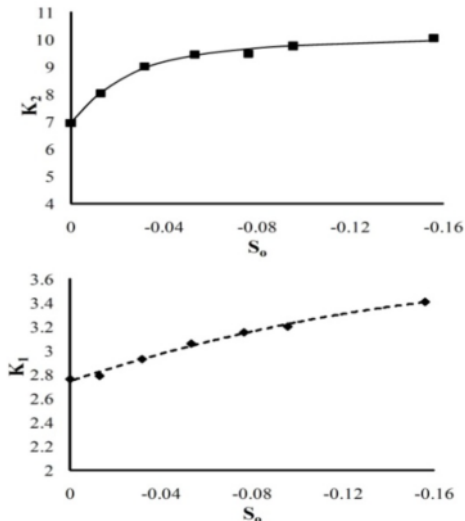
تل‌ماسه منحصر به شرایط آزمایشگاهی است و در مورد پدیده رسوب‌گذاری، بر خلاف پدیده فرسایش نمی‌توان انتظار داشت هر آنچه که در مدل آزمایشگاهی رخ می‌دهد، لزوماً در نمونه اصلی نیز رخ دهد؛ اگرچه شکل‌گیری تل‌ماسه در شرایط آزمایشگاهی مؤثر بر توسعه هندسه گودال آب‌شستگی است. روش‌های مختلفی برای بی‌بعد کردن نیم‌رخ‌های آب‌شستگی توسط محققان پیشنهاد شده است. لکن در این تحقیق فرم بی‌بعد به صورت $(x/y_m, y/y_m)$ به علت کارایی و سهولت مورد توجه قرار گرفته است. با تقسیم موقعیت طولی هر نقطه در هر زمان (x) و موقعیت عمقی هر نقطه در هر زمان (y) به بیشینه عمق آب‌شستگی در آن زمان (y_m) ، نمونه نیم‌رخ‌های بدون بعد آب‌شستگی مطابق شکل ۵ از مجموعه نتایج آزمایشگاهی استنتاج شده‌اند. از مجموعه این نتایج وجود یک نوع تشابه در هندسه حفره در پایاب هر شیب قابل درک است. از برآزش داده‌های به دست آمده، معادله عمومی توصیف‌کننده نیم‌رخ حفره به فرم یک معادله درجه سوم به صورت رابطه (۲۳) قابل ارائه خواهد بود:

$$\frac{y}{y_m} = a_0 + a_1 \frac{x}{y_m} + a_2 \left(\frac{x}{y_m}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{y_m}\right)^3 \quad (23)$$

با تعریف ضرایب $K_1 = \frac{x_m}{y_m}$ و $K_2 = \frac{x_s}{y_m}$ (فاصله عمق بیشینه حفره تا انتهای حوضچه و x_s طول حفره) و استفاده از شرایط مرزی ابتدای حفره $O(0, -\varepsilon y_m)$ ، انتهای حفره $S(K_2 y_m, 0)$ و محل حفره با حداکثر عمق در هر شیب با دو شرط $M(K_1 y_m, -1)$ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} a_0 = -\varepsilon \\ a_1 = \frac{\varepsilon K_1^3 + (\varepsilon - 1)(2K_2^3 - 3K_1 K_2^2)}{K_1^4 K_2 - 2K_1^2 K_2^2 + K_1 K_2^3} \\ a_2 = \frac{-2\varepsilon K_1^3 + (\varepsilon - 1)(3K_1^2 K_2 - K_2^3)}{K_1^4 K_2 - 2K_1^2 K_2^2 + K_1^2 K_2^3} \\ a_3 = \frac{\varepsilon K_1^3 - (\varepsilon - 1)(2K_1^2 K_2 - K_1 K_2^2)}{K_1^5 K_2 - 2K_1^4 K_2^2 + K_1^3 K_2^3} \end{cases} \quad (24)$$

استاندارد (SE) و ضریب همبستگی (R^2) در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج حاصل از این مقایسه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

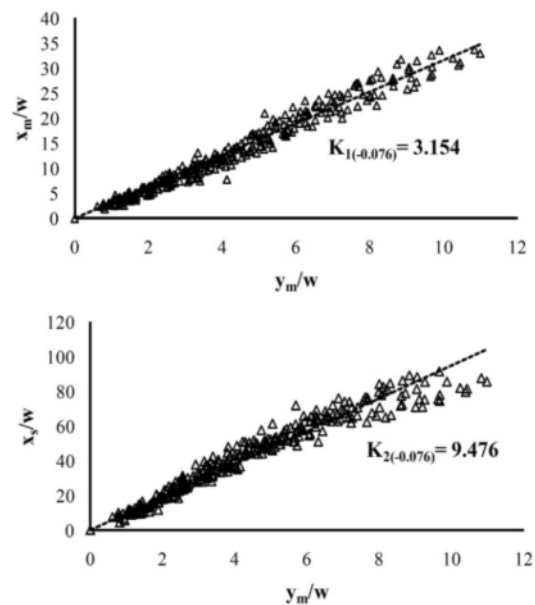


شکل ۷ تغییرات ضرایب K_1 و K_2 با شیب حوضچه

جدول ۳ ارزیابی نیم‌رخ‌های مختلف حفره آب‌شستگی

SE	R^2	نوع نیم‌رخ
۰/۱۲۳	۰/۸۸۱	دی و سرکار (۲۰۰۶)
۰/۱۱۰	۰/۹۰۶	نیم‌رخ عمومی
۰/۰۸۵	۰/۹۴۳	نیم‌رخ پیشنهادی برای هر شیب

از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که نیم‌رخ پیشنهادی برای هر شیب، با دقت بیشتری ($R^2 = 0.943, SE = 0.085$) در هر شیب و در هر زمان به دست می‌دهد. از مجموعه نمودارهای حاصل می‌توان دریافت که با استفاده از نیم‌رخ‌های بی‌بعد پیشنهاد شده برای حفره آب‌شستگی در هر شیب، می‌توان تمام حفره‌های آب‌شستگی در پایین دست دریاچه‌های کشویی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد. ضرایب معادلات نیم‌رخ‌های پیشنهادی، مستقل از دانه‌بندی ذرات رسوبی هستند؛ لکن در عین

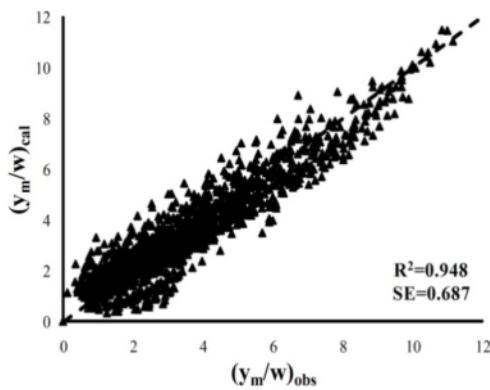


شکل ۶ استخراج ضرایب K_1 و K_2 را در شیب -0.076

جدول ۲ ضرایب معادله (۲۳) در نیم‌رخ‌های مختلف

شیب‌های حوضچه	a_0	a_1	a_2	a_3
-۰/۱۵۶	-۰/۶۲۵۷	۰/۱۲۱۸	-۰/۰۰۵۹	-۰/۰۰۵۹
-۰/۰۹۶	-۰/۶۹۶۹	۰/۱۵۱۱	-۰/۰۰۸۱	-۰/۰۰۸۱
-۰/۰۷۶	-۰/۶۷۶۴	۰/۱۴۲۴	-۰/۰۰۷۴	-۰/۰۰۷۴
-۰/۰۵۳	-۰/۷۷۲۲	۰/۱۸۵۶	-۰/۰۱۱۱	-۰/۰۱۱۱
-۰/۰۳۲	-۰/۷۲۸۱	۰/۱۶۵	-۰/۰۰۹۳	-۰/۰۰۹۳
-۰/۰۱۳	-۰/۶۶۶۱	۰/۱۳۸۱	-۰/۰۰۷۱	-۰/۰۰۷۱
۰	-۰/۷۵۳	۰/۱۷۳۷	-۰/۰۰۹۳	-۰/۰۰۹۳
نیم‌رخ عمومی	-۰/۶۹۵۸	۰/۱۵۰۷	-۰/۰۰۸۱	-۰/۰۰۸۱
Dey and Sarkar (2006)	-۰/۷۱۶۹	۰/۱۵۹۵	-۰/۰۰۸۷	-۰/۰۰۸۷

شکل ۷ تغییرات ضرایب K_1 و K_2 را وابسته به شیب حوضچه به دست می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت با افزایش میزان شیب، طول حفره آب‌شستگی و فاصله عمق بیشینه حفره تا انتهای حوضچه با شدت بیشتری افزایش خواهد یافت. به منظور ارزیابی معادله پیشنهادی دی و سرکار (۲۰۰۶)، نیم‌رخ عمومی پیشنهادی در تمام شیب‌ها و نیم‌رخ پیشنهادی در هر شیب از دو معیار خطای



شکل ۸ ارزیابی دقت معادله (۲۳) در برآورد y_m

۲-۳- بررسی تأثیر طول و شیب حوضچه معکوس بر ابعاد حفره آب‌شستگی

شکل‌های ۹-الف، ۹-ب و ۹-ج، به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر شیب و طول حوضچه آرامش بر تغییرات عمق آب‌شستگی بیشینه (y_{me})، فاصله عمق بیشینه تا انتهای کف بند (x_{me}) و طول حفره (x_{se}) در یک شرایط معین از عمق پایاب ($\frac{y_t}{w} = 6$) و عدد فرود ذره ($F_o = \frac{q}{\sqrt{g(S_s - 1)D_{50}^3}} = 8$) می‌باشد. تأثیر شیب

معکوس بر جریان ورودی به بستر رسوبی و الگوی توسعه حفره آب‌شستگی را می‌توان به مثابه یک آستانه انتهایی در نظر گرفت. افزایش شیب حوضچه معکوس در یک طول معین یا افزایش در طول حوضچه معکوس در یک شیب معین، به مانند افزایش ارتفاع یک آستانه انتهایی در انتهای حوضچه است. در نتیجه افزایش شیب یا طول حوضچه، بخشی از خطوط جریان نزدیک بستر به سمت سطح آب متمایل می‌شوند. لذا جریان ریزشی از سطح آب در فاصله دورتری نسبت به حضور حوضچه افقی با سطح بستر رسوبی برخورد خواهد کرد.

در عین حال جریان ریزشی به علت برخورد با سطح آب دارای تنش برشی کمتری جهت انتقال ذرات رسوبی در مقایسه با حضور یک حوضچه آرامش افقی در بالادست خواهد بود.

حال وابستگی زیادی به هندسه سازه بالادست یعنی بازشدگی دریاچه و شیب حوضچه دارند.

مجموعه پارامترهای مؤثر بر پدیده آب‌شستگی موضعی در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس عبارتند از:

$$F(\rho, \nu, y_t, g, q, L, \tan \theta, w, D_{50}, y_m, y_1, t) = 0 \quad (25)$$

که در آن، ρ جرم مخصوص سیال، ν لزجت سینماتیکی سیال، y_t عمق پایاب، g شتاب ثقل، q دبی در واحد عرض، y_1 عمق آب در ناحیه تنگ‌شدگی و t پارامتر زمان می‌باشد. در این تحلیل به علت یکنواختی ذرات رسوبی از تأثیر پارامترهایی مانند ضریب یکنواختی، زاویه ایستایی و چگالی نسبی رسوبات صرف‌نظر شده است. همچنین با اغماض از تأثیر عدد رینولدز جریان ($Re = f_1(\rho, \nu, w, q)$) به علت فرض جریان کاملاً متلاطم در طول آزمایش‌ها، در نظر گرفتن عمق بیشینه آب‌شستگی به عنوان متغیر وابسته، استفاده از نظریه پای-

باکینگهام و تعریف $t_0 = \frac{y_t}{\sqrt{g(S_s - 1)D_{50}}}$ خواهیم داشت:

$$\frac{y_m}{w} = f\left(\tan \theta, \frac{y_t}{w}, \frac{L}{w}, Fr_1, \frac{t}{t_0}, \frac{D_{50}}{w}\right) \quad (26)$$

که در آن، $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{g} y_1^3 \cos \theta}$ عدد فرود اولیه جهش روی حوضچه معکوس است. با شناخت پارامترهای بی‌بعد مؤثر و استفاده از تحلیل رگرسیون داده‌های موجود، رابطه زیر به منظور تعیین عمق بیشینه حفره در هر لحظه (y_m) به دست آمد:

$$\frac{y_m}{w} = 0.486(1 - \tan \theta)^{-0.342} \times \left(\frac{y_t}{w}\right)^{-0.635} \times \left(\frac{L}{w}\right)^{-1.006} \times (Fr_1)^{1.528} \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{0.271} \times \left(\frac{D_{50}}{w}\right)^{-0.538} \quad (27)$$

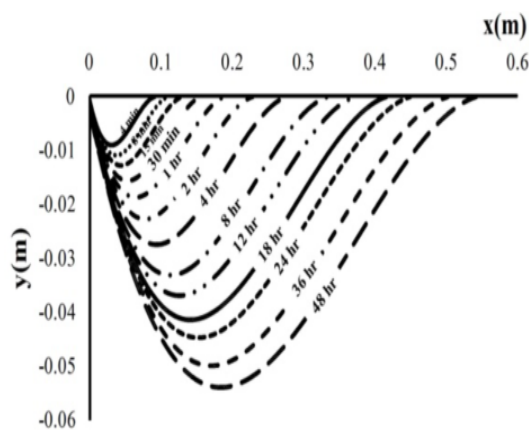
شکل ۸ دقت برآورد تعیین عمق بیشینه حفره را در هر زمان از معادله (۲۳) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

آب‌شستگی با زمان و استفاده گام به گام از معادلات (۱۶)، (۲۰) و (۲۲)، تغییرات انواع مختلف تنش‌های برشی ناشی از وزن و تنش برشی بستر در طول حفره و در هر زمان حاصل خواهد شد. در شکل ۱۰ نیم‌رخ‌های حفره آب‌شستگی در طول مدت زمان ۴۸ ساعت در

حالت نمونه $S_o = -0.156$, $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{gy_1^3}} = 8.53$,

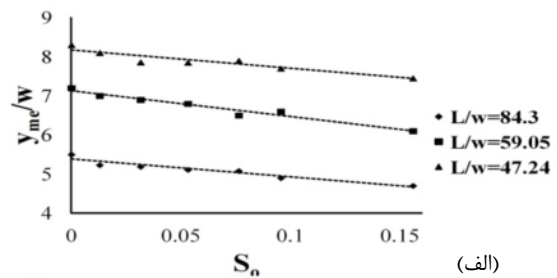
نشان داده شده است. $\frac{D_{50}}{w} = 0.127$, $\frac{L}{w} = 84.3$

نیز تغییرات زمانی و مکانی تنش برشی وزن و تنش برشی بستر را با در نظر گرفتن نیم‌رخ‌های حفره آب‌شستگی از شکل ۱۰ نشان می‌دهد.

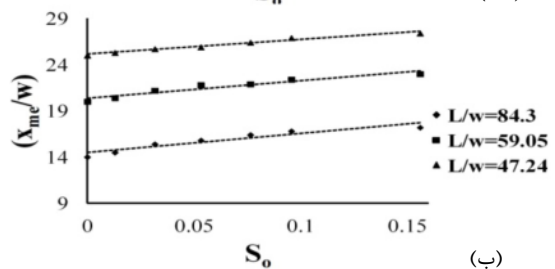


شکل ۱۰ نمونه نیم‌رخ حاصل از نتایج آزمایشگاهی در شرایط عدم حضور تل‌ماسه

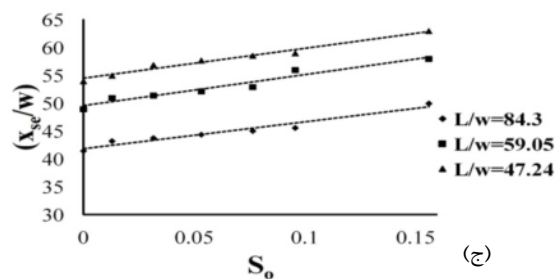
در طول ناحیه حفره آب‌شستگی در هر زمان، مقدار تنش برشی ناشی از وزن ذره در وجه بالادست حفره با کاهش شیب وجه بالادست در طول حفره کاهش خواهد یافت. در محل بیشینه عمق آب‌شستگی و شکل‌گیری نقطه‌ای یک بستر افقی، مقدار تنش برشی ناشی از وزن برابر صفر خواهد شد. با پیشرفت طولی حفره، مقدار تنش برشی ناشی از وزن ذره در وجه پایین‌دست حفره با افزایش میزان شیب، افزایش خواهد یافت.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹ تأثیر شیب و طول حوضچه بر تغییرات ابعاد حفره

این امر سبب خواهد شد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست حوضچه معکوس، عمقی کمتر داشته، لکن گسترش طولی آن نسبت به شرایط حضور حوضچه آرامش افقی بیشتر گردد. در حالت خاص مورد بررسی و به ازای نسبت $\frac{L}{w} = 59$ ، افزایش شیب حوضچه معکوس از صفر به $\frac{1}{6}$ ، سبب کاهش ۱۵٪ در عمق بیشینه و افزایش ۱۵٪ و ۱۸٪ به ترتیب در موقعیت عمق بیشینه و طول حفره آب‌شستگی خواهد شد. در نتیجه با افزایش طول یا شیب حوضچه معکوس، عمق حفره آب‌شستگی کاهش یافته لکن طول حفره و فاصله عمق بیشینه تا انتهای کف‌بند افزایش خواهد یافت.

۳-۳- تشابه تنش‌های برشی در طول حفره آب‌شستگی

با استفاده از نتایج حاصل از تغییرات ابعاد حفره

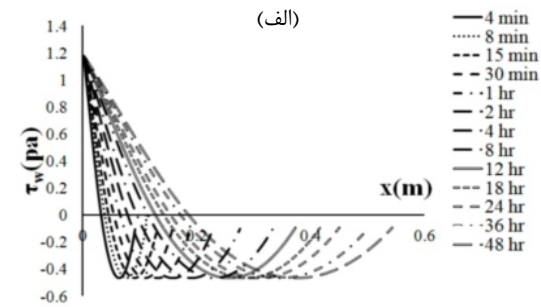
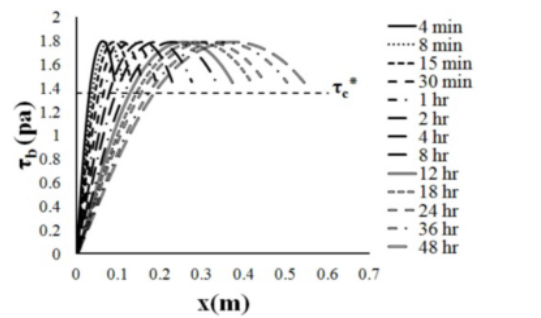
عطف نیم‌رخ حفره در وجه پایین‌دست حفره وجود خواهد داشت که در آن نیروی ناشی از وزن ذره در خلاف راستای جریان بیشینه خواهد شد، در نتیجه لازم است از سوی بستر نیروی بیشتری برای غلبه بر مجموع تنش‌های ناشی از وزن ذره و تنش برشی در آستانه حرکت ذره وارد شود. از نقطه عطف تا شکل‌گیری یک بستر افقی در وجه پایین‌دست حفره مقدار تنش برشی ناشی از وزن ذره تا رسیدن به مقدار صفر و تنش برشی بستر تا رسیدن به مقدار تنش برشی در آستانه حرکت ذره روی بستر افقی کاهش خواهد یافت.

• به نظر می‌رسد نیم‌رخ‌های تغییرات تنش برشی ناشی از وزن ذره و تنش برشی بستر با گذشت زمان، خود متشابه باشند؛ به این معنا که اگر بتوان این نیم‌رخ‌ها را به شکل مناسبی بی‌بعد کرد، ارائه یک معادله عمومی واحد برای تعیین انواع مختلف تنش برشی در طول حفره و در هر زمان امکان‌پذیر باشد. با تقسیم موقعیت مکانی هر نقطه در طول حفره به عمق آب‌شستگی بیشینه حفره در آن زمان و تقسیم تنش برشی ناشی از وزن ذره یا تنش برشی بستر بر تنش برشی در آستانه حرکت ذره روی بستر افقی، معادلاتی به فرم زیر جهت برآورد عمومی تغییرات انواع تنش برشی در هر زمان و در هر موقعیت مکانی در طول حفره حاصل خواهد شد (شکل ۱۲):

$$\frac{\tau_b}{\tau_c^*} = -0.027 \left(\frac{x}{y_m} \right)^2 + 0.382 \left(\frac{x}{y_m} \right) \quad (28)$$

$$\frac{\tau_b}{\tau_c^*} = -0.027 \left(\frac{x}{y_m} \right)^2 + 0.382 \left(\frac{x}{y_m} \right) \quad (29)$$

در شرایط حضور تل‌ماسه نیز با اطلاع از نیم‌رخ حفره و به طریق مشابه، تغییرات انواع تنش برشی در طول حفره آب‌شستگی قابل برآورد است. این روش قابل بسط به حفره‌های آب‌شستگی در پایاب انواع سازه‌های هیدرولیکی است. همچنین این روش می‌تواند در پیش‌بینی مقادیر تنش برشی بستر در طول انواع فرم‌های بستری با اطلاع از نیم‌رخ طولی بستر به‌کار رود.

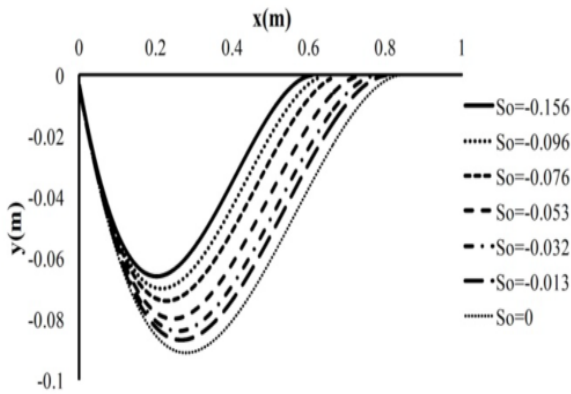


شکل ۱۱ تغییرات زمانی و مکانی تنش برشی ناشی از الف- تنش برشی بستر و ب- وزن ذره

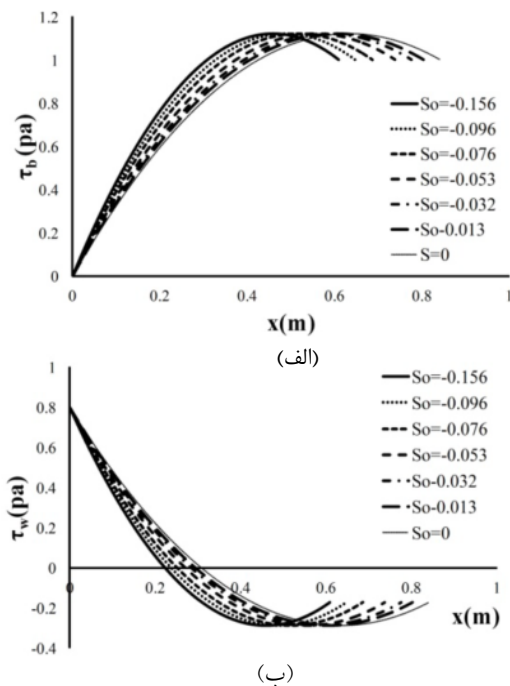
• مقدار تنش برشی بستر در طول وجه بالادست حفره تا رسیدن به محل حفره با بیشینه عمق افزایش خواهد یافت. همچنین تنش برشی بستر در بیشینه عمق حفره به علت عدم تأثیر وزن ذره روی یک بستر افقی، معادل با تنش برشی در آستانه حرکت ذره خواهد بود. در طول وجه پایین‌دست حفره، مقدار تنش برشی بستر در یک بخش تا رسیدن به یک موقعیت معین افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که در طول وجه بالادست حفره، تنش برشی ناشی از وزن ذره در جهت جریان بر روی ذره تأثیر نموده، در نتیجه مقدار تنش برشی لازم بستر برای انتقال ذره کمتر از تنش برشی در آستانه حرکت ذره خواهد بود؛ لکن در وجه پایین‌دست حفره به علت تأثیر تنش برشی ناشی از وزن ذره در خلاف جهت جریان، لازم است از سوی بستر نیروی بیشتری جهت انتقال ذره اعمال شود. در نتیجه در بخش پایین‌دست حفره مقدار تنش برشی بستر از تنش برشی در آستانه حرکت ذره بیشتر است.

• در شرایط عدم حضور تل‌ماسه یک نقطه موسوم به

حوضچه افزایش می‌یابد؛ لکن پس از این موقعیت افزایش شیب حوضچه با کاهش مقاومت برشی ناشی از وزن ذره همراه خواهد بود.

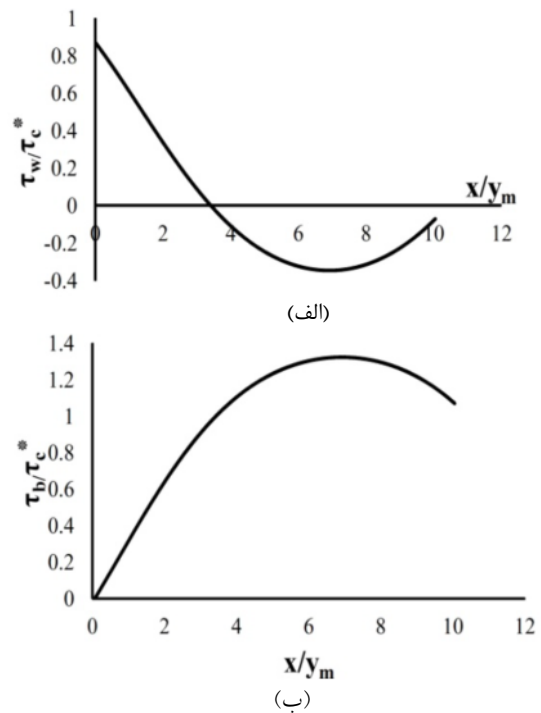


شکل ۱۳ نیم‌رخ حفره‌های آب‌شستگی از نتایج آزمایشگاهی در شیب‌های مختلف



شکل ۱۴ تأثیر شیب حوضچه معکوس بر تغییرات الف-تنش وزن ب-تنش برشی بستر

همچنین تا قبل از نقطه عطف نیم‌رخ، با افزایش شیب حوضچه، تنش برشی بستر افزایش و پس از آن، شیب



شکل ۱۲ فرم بدون بعد تغییرات تنش برشی الف-تنش برشی وزن و ب-تنش برشی بستر در طول حفره

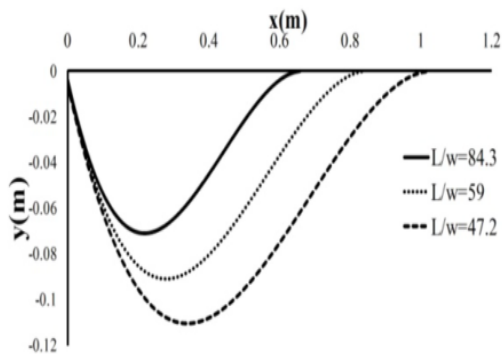
۳-۴- بررسی تأثیر شیب و طول حوضچه و دانه‌بندی ذرات رسوبی بر تغییرات تنش برشی بستر و تنش وزن

به منظور مطالعه تأثیر شیب حوضچه معکوس بر تغییرات انواع مختلف تنش برشی در طول حفره آب‌شستگی، مجموعه‌ای از نتایج آزمایشگاهی با شرایط $F_o = \frac{q}{\sqrt{g(S_s - 1)D_{s0}^3}} = 12$ و عدد فرود ذره) F_o

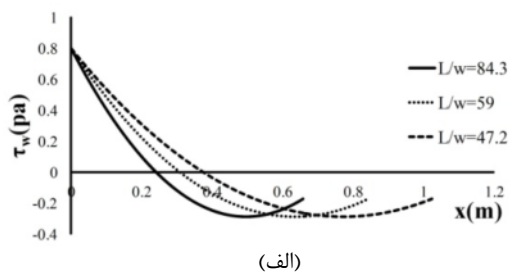
در شیب‌های $\frac{L}{w} = 84.3$ ، $\frac{y_t}{w} = 6$ ، $\frac{D_{s0}}{w} = 0.079$

مختلف حوضچه در نظر گرفته شد. نیم‌رخ حفره‌های آب‌شستگی در پایان ۲۴ ساعت آزمایش در هر حالت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در هر حالت تغییرات تنش برشی ناشی از وزن ذره و تنش برشی بستر محاسبه و در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

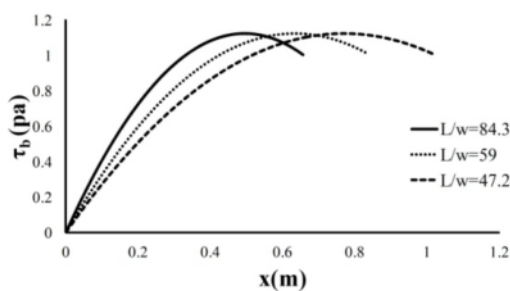
روند تغییرات انواع تنش برشی با شیب حوضچه دارای دو بخش است: مقدار تنش برشی ناشی از وزن ذره از ابتدای حفره تا نقطه عطف نیم‌رخ، با افزایش میزان شیب



شکل ۱۵ نیم‌رخ‌های حفره آب‌شستگی از نتایج آزمایشگاهی به ازای سه نسبت مختلف طول حوضچه



(الف)



(ب)

شکل ۱۶ تأثیر طول نسبی حوضچه بر تغییرات الف- تنش وزن و ب- تنش برشی بستر

در نتیجه در یک شرایط معین، نیروی لازم جهت انتقال ذره رسوبی و غلبه بر مقاومت بستری قبل از نقطه عطف در شیب‌های بالاتر حوضچه، بیشتر و در نتیجه میزان توسعه عمقی حفره کمتر خواهد بود. لکن پس از نقطه عطف به علت کاهش مقاومت بستری، انتقال ذره رسوبی در شیب‌های بالاتر راحت‌تر و در نتیجه توسعه طولی حفره افزایش خواهد یافت.

بیشتر حوضچه، کاهش تنش برشی بستر را به همراه خواهد داشت. قبلاً تشریح گردید که با افزایش شیب معکوس در یک شرایط معین از طول حوضچه، دانه بندی ذرات و شرایط جریان؛ عمق آب‌شستگی بیشینه کاهش و طول حفره آب‌شستگی افزایش خواهد یافت. این مسئله از دیدگاه تحلیل تنش برشی از شکل‌های ۱۴ نیز قابل درک است. با افزایش شیب حوضچه تا قبل از نقطه عطف نیم‌رخ، نیروی لازم برای غلبه بر اثر مقاومت بستر افزایش می‌یابد؛ در نتیجه در یک شرایط معین عمق آب‌شستگی بیشینه در پایاب حوضچه با شیب بالاتر، کمتر خواهد بود.

لکن پس از نقطه عطف، افزایش شیب حوضچه کاهش نیروی لازم جهت غلبه بر مقاومت بستر را به همراه خواهد داشت. این مسأله سبب خواهد شد در یک شرایط معین، انتقال ذرات رسوبی در ناحیه پایین دست عطف نیم‌رخ، راحت‌تر صورت گرفته و در نتیجه طول حفره آب‌شستگی با افزایش میزان شیب حوضچه افزایش یابد.

به منظور مطالعه تأثیر طول نسبی حوضچه بر تغییرات انواع مختلف تنش‌های برشی، نتایج حاصل از نیم‌رخ‌های آزمایشگاهی در شرایط معین

$F_o = 12$, $\frac{V_L}{w} = 6$, $S_o = -0.076$ در سه طول نسبی

حوضچه استفاده شد (شکل ۱۵). نتایج محاسبه تنش‌های برشی بستر و تنش برشی ناشی از وزن در سه حالت مطلوب، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. پیش از این تشریح شد که با افزایش طول نسبی حوضچه در یک شرایط معین، عمق آب‌شستگی بیشینه کاهش و طول حفره آب‌شستگی افزایش خواهد یافت. این مسأله از دیدگاه تحلیل تنش نیز قابل درک است.

با افزایش طول حوضچه مطابق شکل ۱۶، مقاومت برشی بستر قبل از نقطه عطف افزایش و پس از نقطه عطف نیم‌رخ، افزایش شیب حوضچه کاهش مقاومت بستر را به همراه خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

S_o	شیب حوضچه آرامش
S_s	چگالی نسبی ذرات رسوبی
t	زمان
w	بازشدگی دریچه
x_{me}	فاصله بیشینه حفره تا حوضچه در شرایط تعادل
x_{se}	طول حفره آب‌شستگی در شرایط تعادل
y_m	عمق بیشینه حفره آب‌شستگی در هر زمان
y_{me}	عمق بیشینه حفره آب‌شستگی در شرایط تعادل
y_t	عمق پایاب
ρ	جرم مخصوص آب
ν	لزجت سینماتیکی آب
γ_w	وزن مخصوص آب
ϕ	زاویه ایستایی ذره رسوبی
θ	زاویه شیب حوضچه آرامش
τ_b	تنش برشی بستر
τ_{cr}	تنش برشی آستانه حرکت ذره روی سطح شیب‌دار
τ_{cr}^*	تنش برشی آستانه حرکت ذره روی سطح افقی
τ_o	تنش برشی وارده بر ذره ناشی از وزن و بستر
τ_w	تنش برشی ناشی از وزن ذره رسوب

اگرچه نیم‌رخ‌های آب‌شستگی در پایاب هر شیب حوضچه معکوس از یک تشابه معین پیروی می‌کنند، لکن با افزایش شیب حوضچه بر گسترش طولی آن افزوده خواهد شد.

با افزایش شیب و طول حوضچه آرامش معکوس، جریان رها شده از سطح حوضچه در فاصله دورتر و با قدرت فرساینده‌گی کمتر به سطح رسوبات برخورد کرده و لذا حفره آب‌شستگی عمق کمتر و طول بیشتری خواهد داشت. متناظر با وجود تشابه بین نیم‌رخ‌های آب‌شستگی، نیم‌رخ‌های تغییرات تنش‌های بستی و وزن ذره در زمان‌های مختلف خود متشابه هستند. در طول وجه بالادست حفره، تنش وزن در جهت جریان بوده و تنش برشی کمتری جهت انتقال ذره لازم است؛ لکن در طول وجه پایین‌دست حفره، لازم است تنش برشی بیشتری از سوی بستر جهت غلبه بر اثر وزن ذره اعمال شود. در طول وجه پایین‌دست حفره یک نقطه موسوم به عطف نیم‌رخ آب‌شستگی وجود دارد که بیشترین تنش ناشی از وزن اعمال و تنش برشی بستر حداکثر خواهد شد. افزایش شیب یا طول حوضچه تا قبل از نقطه عطف نیم‌رخ حفره سبب افزایش تنش برشی بستر و پس از نقطه عطف سبب کاهش مقاومت بستر خواهد شد. این مسأله سبب کاهش عمق و افزایش طول حفره با افزایش شیب و طول حوضچه معکوس خواهد شد.

۵- فهرست علائم

۶- منابع

Adduce, C. and Sciortino, G. (2006). "Scour due to a horizontal turbulent jet: Numerical and experimental investigation", J. of Hydraulic Res., 44(5), pp. 663-673.

Ali, K. H. M. and Lim, L. (1986). "Local scour caused by submerged wall jets", Proceedings, Institution of Civil Engineers, 81(2), pp. 607-645.

Balachandar, R., Kells, J.A. and Thiessens, R.J. (2000). "The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour", Canadian Journal of Civil Engineering, 27(1), pp. 138-150.

Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N. and Chatterjee, M. (1994). "Local scour due to submerged horizontal jet", J. of Hydraulic Eng., 120(8), pp. 973-992.

Dargahi, B. (2003). "Scour development downstream of a spillway", J. of Hydraulic Res., 41(4), pp. 417-426.

Dey, S. and Westrich, B. (2003). "Hydraulics of

D_{50}	قطر مربوط به ۵۰ درصد ذرات عبوری از الک
Fr_1	عدد فرود اولیه پرش آبی
F_o	عدد فرود ذره رسوبی
g	شتاب ثقل
L	طول حوضچه آرامش
q	دبی جریان در واحد عرض
q_B	بار بستر در واحد عرض و در واحد زمان

Laursen, E. M. (1952). "Observation on the nature of scour", Proc. 5th Hydraulic Conference. University of Iowa, Iowa City, USA, pp. 179-197.

Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport", Proc. 3rd Meeting of IAHR, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.

Oliveto, G., Comuniello, V. and Bulbule T. (2011). "Time-dependent local scour downstream of positive-step stilling basins", J. of Hydraulic Res., 49(1), pp. 105-112.

Schlichting, H. and Gersten, K. (2000). "Boundary layer theory", Springer-Verlag, Berlin.

submerged jet subject to change in cohesive bed geometry", J. of Hydraulic Eng. 129(1), pp. 44-53.

Dey, S. and Sarkar, A. (2006). "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets", J. of Hydraulic Eng., 132(3), pp. 24-257.

Farhoudi, J. and Smith, K.V.H. (1985). "Local scour profiles downstream of hydraulic jump", J. of Hydraulic Res., 23(4), pp. 343-358.

Hassan, N.M.K.N. and Narayanan, R. (1985). "Local scour downstream of an apron", J. of Hydraulic Eng., 111(11), pp. 1371-1385.

Hogg, A. J., Huppert, H. E. and Dade, B. (1997). "Erosion by planar turbulent jets", J. of Fluid Mech., 338, pp. 317-340.