



دانشگاه گواران، دانشکده مهندسی عمران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره اول، ۱۳۹۸

<http://jwsc.gau.ac.ir>

۱۱۱-۱۳۰

بررسی آزمایشگاهی حداکثر عمق و طول گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای تحت شرایط جریان زیربحرانی

* رسول دانشفراز^۱، جعفر چابک‌پور^۲ و مهدی دسینه^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، آستادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه،

^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۸

چکیده

سابقه و هدف: برداشت شن و ماسه از بستر و کناره‌های رودخانه سبب تغییر در شرایط هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، افزایش فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه و همچنین تخریب سازه‌های موجود در مسیر رودخانه می‌گردد. هدف از پژوهش حاضر بررسی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای است.

مواد و روش‌ها: برای این پژوهش از کانال مستطیلی شکل به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با شیب ثابت استفاده شد. گودال‌هایی نیز با اندازه‌های مختلف و تحت سرعت‌های نسبی جریان ۰/۸۳، ۰/۸۹، ۰/۹۴ و ۱ برای حالت با و بدون اعمال دریچه در دانه بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر ایجاد گردید. در این پژوهش زمان آزمایش برای حالت بدون اعمال دریچه ۱ ساعت و برای حالت با اعمال دریچه ۱/۵ ساعت می‌باشد که زمان تعادل برای هر دو حالت ۱۵ دقیقه آخر آزمایش ذکر گردید. برای برداشت داده از نیم‌رخ سه‌بعدی بستر در هر دو حالت، بعد از قطع جریان آب و ثبت عمق آب در نقاط مختلف، از اسکنر سه‌بعدی لیزری استفاده شد. همچنین از مقطع کناری بستر متحرک نیز اقدام به عکسبرداری از نحوه گسترش گودال‌های ایجاد شده در فواصل زمانی مختلف گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB، Tec-Plot 360، Grapher و Excel اقدام به مرتب‌سازی و آرایش مجدد داده‌ها و رسم نمودارهای برداشت شده گردید. در طول آزمایش‌های انجام شده تشکیل فرم‌های بستر نیز در بالا و پایین دست گودال‌های ایجاد شده مشاهده و نحوه تغییرات آن‌ها با زمان ثبت شد.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش عدد فرود و عمق گودال‌ها و همچنین با ایجاد جریان ثانویه در داخل گودال‌ها، نسبت بی‌بعد ارتفاع گودال به عمق جریان $(\frac{H}{y})$ کاهش و برعکس طول و عرض گودال به عمق جریان $(\frac{B}{y}$ و $\frac{L}{y})$ افزایش می‌یابد. در ضمن مشخص گردید که با افزایش تنش برشی و عدد فرود، نسبت سرعت برشی بحرانی به سرعت جریان $(\frac{u_{*cr}}{V})$ افزایش خواهد یافت. همچنین نیم‌رخ طولی و نمایی سه‌بعدی از انتقال گودال‌ها

* مسئول مکاتبه: daneshfaraz@yahoo.com

برای تمامی شرایط هیدرولیکی و رسوبی مختلف مشاهده و ترسیم شد. در انتها معادلات تجربی برای حداکثر طول و عمق آبستنگی برای گودال مستطیلی شکل به همراه آنالیز حساسیت ارائه گردید. در حالت کلی نشان داده شد که زاویه ایستایی مصالح داخل آب (ϕ) بیشترین تأثیر را در افزایش و ارتفاع گودال به عمق جریان ($\frac{H}{y}$) بیشترین تأثیر را در کاهش طول و عمق آبستنگی گودال دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج آزمایش‌ها به صورت ارائه روابط بی‌بعد برای حداکثر عمق و طول آبستنگی گودال‌ها برای هر دو حالت با و بدون اعمال دریچه در هر دو دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر تحت شرایط جریان زیربحرانی و نشان دادن بیشترین و کمترین اثر پارامترها و به‌کارگیری آنالیز حساسیت برای روابط حاصل شده، می‌باشد. همچنین مشاهده شد که کمترین درصد خطا برای حداکثر عمق آبستنگی مربوط به دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متری در حالت بدون اعمال دریچه با درصد خطای نسبی ۲/۹۸٪ و خطای RMSE (بدون واحد)، ۰/۲۳ می‌باشد. کمترین درصد خطا برای حداکثر طول آبستنگی نیز مربوط به دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری برای حالت با اعمال دریچه با درصد خطای نسبی ۴/۷۵٪ و خطای RMSE (بدون واحد)، ۰/۵ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال گودال، حداکثر طول گودال، حداکثر عمق گودال، رودخانه، زاویه ایستایی ذرات رسوبی

مقدمه

شن و ماسه رودخانه‌ای به دلیل قرار گرفتن در معرض آب، منابع مطلوبی از مصالح می‌باشند زیرا مواد ضعیف و سست آن‌ها توسط سایش حذف گردیده و شن و ماسه بادوام با دانه‌بندی مناسب بجا مانده است. همین امر سبب هزینه فرآوری کم‌تر این منابع شده است. برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها، اگر طبق دستورالعمل کنترل‌کننده صورت نگیرد، موجب آثار منفی خواهد شد. در مورد اثرات برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. فرهادزاده (۱۳۷۹) و امینی (۱۳۸۰)، به بررسی آزمایشگاهی انتقال گودال‌های ایجاد شده در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش یا کاهش طول گودال‌ها، سرعت انتقال گودال‌ها نیز افزایش یا کاهش می‌یابد (۱ و ۵). لی و همکاران (۱۹۹۳) و لی و چن (۱۹۹۶)، به مطالعه آزمایشگاهی انتقال گودال مستطیلی شکل تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای در فلومی به

ابعاد ۱۷ متر طول و ۰/۶ متر عرض با دانه‌بندی‌های یکنواخت و غیریکنواخت در شرایط جریان زیربحرانی پرداختند. آن‌ها نتایج آزمایش‌ها را به صورت معادلات رگرسیون برای ماکزیمم عمق آبستنگی و سرعت مهاجرت، طول مؤثر و شکل گودال‌ها ارائه کردند و انتقال گودال را تابعی از پارامترهای بالا معرفی نمودند (۹ و ۱۰). صالحی نیشابوری و همکاران (۲۰۰۲)، به بررسی اثرات جابجایی گودال مستطیلی شکل و تغییرات نیمرخ طولی آن ناشی از برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت پرداختند. آزمایش‌ها با در نظر گرفتن طول و عرض مختلف و ارتفاع ثابت برای گودال انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت جابجایی گودال با نسبت طول به عرض آن دچار تغییر می‌شود (۱۲). رینالدی و همکاران (۲۰۰۵)، نشان دادند که تغییر در رفتار دینامیکی و شکل رودخانه به شدت برداشت شن و ماسه و نوع مواد تشکیل‌دهنده رودخانه بستگی دارد (۱۳). لیانگ‌وین و همکاران

پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه باعث بر هم زدن تعادل رودخانه و همچنین کاهش سطح تراز بستر در رودخانه می‌شود (۳). گریمود و همکاران (۲۰۱۶)، به مطالعه آزمایشگاهی اثرات برداشت شن و ماسه در یک میکروفلوم با بستر چسبنده متشکل از سیلیکا و کائولیت پرداختند. آن‌ها تمرکز خود را بیشتر بر روی اثرات دینامیکی برداشت شن و ماسه و تثبیت بستر با استفاده از درصدهای مختلف کائولیت گذاشتند. حاصل این نتایج را نیز با نتایج به‌دست آمده از رودخانه‌های آبرفتی و بستر سنگی مقایسه کردند (۶).

رضایی و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی بر آبستگي پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. نتایج بیانگر عملکرد مثبت رس و پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی در کاهش طول و عمق آبستگي می‌باشد. بهترین عملکرد مربوط به مخلوط رس و ۱۰ درصد پلی‌آکریل‌آمید کاتیونی گزارش شد (۱۴). با توجه به کمبود پژوهش‌هایی که برای حالت با اعمال دریچه و ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌ها تحت شرایط مختلف وجود دارد، پژوهش حاضر به بررسی انتقال گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای با ابعاد گودال‌های مختلف و سرعت نسبی جریان متفاوت در شرایط جریان زیربحرانی، با دریچه و بدون اعمال دریچه در دانه‌بندی‌های یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته است. همچنین با ارائه یک سری روابط تجربی برای پیش‌بینی حداکثر عمق و طول انتقال گودال برای هر دو حالت با دریچه و بدون اعمال دریچه به همراه حالت کلی (هر دو دانه‌بندی و هر دو حالت ذکر شده) پرداخته شده است.

(۲۰۰۷)، به مطالعه پیامدهای برداشت شن و ماسه در رودخانه دونجیانگ در چین پرداختند. نتایج بیانگر آن است که برداشت شن و ماسه موجب تغییرات قابل‌توجهی در ریخت‌شناسی و رژیم رودخانه مذکور می‌شود و به مرور زمان باعث افزایش عمق و طول انتقال گودال می‌شود (۱۱). جباری و فرضی (۲۰۱۰)، با استفاده از مطالعات میدانی و عددی به بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر تغییر الگوی جریان رودخانه رازآور استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد که بار رسوبی در پایین‌دست محل برداشت تا فاصله ۲۰۰ متری افزایش و در ضمن اثرات آن تا فاصله ۶۰۰ متری ادامه داشته است (۸). اشرف و همکاران (۲۰۱۱)، به مطالعه اثرات زیست‌محیطی برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای در مالزی پرداختند. آن‌ها بیان نمودند که برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه، بار بستر در محل برداشت شن و ماسه را کاهش و قدرت حمل جریان در پایین‌دست را افزایش می‌دهد. در ضمن برداشت شن و ماسه، فرسایش بالادست و کناره رودخانه‌ها را به همراه دارد (۲). چن (۲۰۱۱)، اقدام به شبیه‌سازی رفتار رودخانه سالت در آریزونا تحت تأثیر برداشت شن و ماسه با استفاده از دو مدل CCE2D و HEC-RAS نمود. نتایج نشان داد که علاوه بر تغییر در رفتار انتقال رسوبات، نوع و میزان رسوبات نیز تغییر یافته است و باعث انتقال گودال به بالادست و پایین‌دست شده است (۴). اسرکک و همکاران (۲۰۱۲)، به مطالعه تأثیر برداشت شن و ماسه و عناصر قیمتی دیگر در رودخانه کافو در زامبیا پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با افزایش برداشت شن و ماسه، مقدار رسوبات معلق افزایش یافته و به تبع آن نیز اثرات سوء زیست‌محیطی در پایین‌دست افزایش داشته است (۱۵). کانتلی و موتو (۲۰۱۴)، به بررسی آزمایشگاهی اثرات برداشت شن و ماسه با بستر رسوبی برای جریان فوق‌بحرانی

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی: در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها، از یک کانال با مقطع مستطیلی شکل به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با شیب ثابت استفاده شده است (شکل ۱). جریان در کانال توسط دو پمپ که هر کدام با حداکثر دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه متصل به یک مخزن در ابتدای کانال است، تأمین گردید. دبی جریان نیز توسط شیرهای متصل به دو روتامتر در خروجی پمپ‌ها اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا در کف فلوم دو کف‌بند از جنس پلی‌اتیلن با زبری نزدیک به پلکسی‌گلس با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و فاصله ۱۴۷ سانتی‌متر از همدیگر ایجاد شد. سپس ما بین این دو کف‌بند با استفاده از سنگدانه‌هایی با ذرات رسوبی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر، بستر متحرک ایجاد شد. در سطح این بستر گودال‌هایی به شکل مستطیل به ارتفاع‌های ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر و به طول ۲۲ سانتی‌متر و هم عرض با عرض کانال (۳۰)

سانتی‌متر) برای بررسی انتقال گودال‌ها، حفر شد تا اثرات عبور جریان با دبی‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ لیتر بر ثانیه در حالت جریان زیربحرانی با و بدون اعمال دریچه بررسی گردد. تغییرات عمق آب نیز برای نقاط مختلف بالادست و پایین‌دست و اطراف گودال‌ها برای هر دو دانه‌بندی قرائت و مدت زمان لازم برای هر آزمایش بعد از رسیدن به زمان تعادل برای حالت بدون اعمال دریچه ۱/۵ ساعت و برای حالت با اعمال دریچه ۱/۵ ساعت در نظر گرفته شد. بدین‌صورت که هر ۱۵ دقیقه، عمق آب برای نقاط مختلف ثبت و بعد از قطع جریان آب با استفاده از اسکنر سه‌بعدی لیزری، عمل اسکن‌برداری از نیمرخ بستر شروع می‌شود. جهت مقایسه تغییرات عمق گودال و انتقال آن در زمان‌های مختلف ابتدا برای زمان $t=0$ قبل ایجاد جریان در کانال، اسکن برداری انجام گرفت. شکل ۲ اسکنر سه‌بعدی و شکل ۳ گودال‌های ایجاد شده در بستر کانال را نشان می‌دهد.



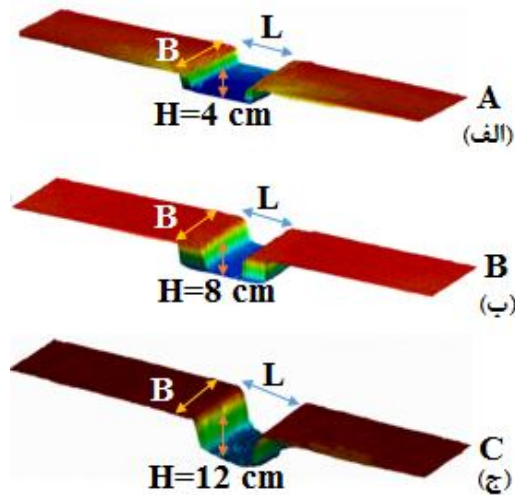
شکل ۱- فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی تحقیق حاضر.

Figure 1. The experimental flume and equipment of the present research.



شکل ۲- اسکنر سه‌بعدی.

Figure 2. 3D scanner.

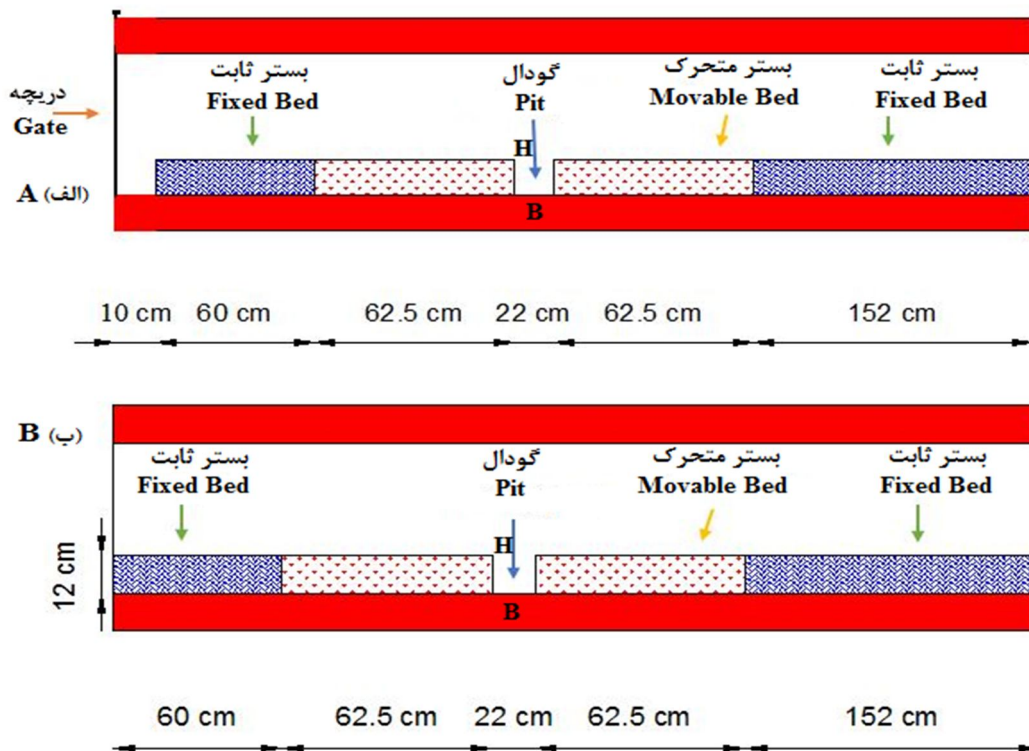


شکل ۳- گودال‌های ایجاد شده در بستر کانال.

Figure 3. The created pit holes in the bed of the channel.

جدول ۱ شرایط هیدرولیکی و هندسی برای انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

در شکل ۴ نمای شماتیک از گودال‌های ایجاد شده در کف بستر متحرک نشان داده شده است و در



شکل ۴- نمای شماتیک از گودال‌های ایجاد شده در کف بستر کانال: الف) با دریچه، ب) بدون دریچه.

Figure 4. The schematic view of the created pits in the bed of the channel: A) With gate, B) Without gate.

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی و هندسی تحقیق حاضر.

Table 1. Hydraulic and geometric conditions of the present research.

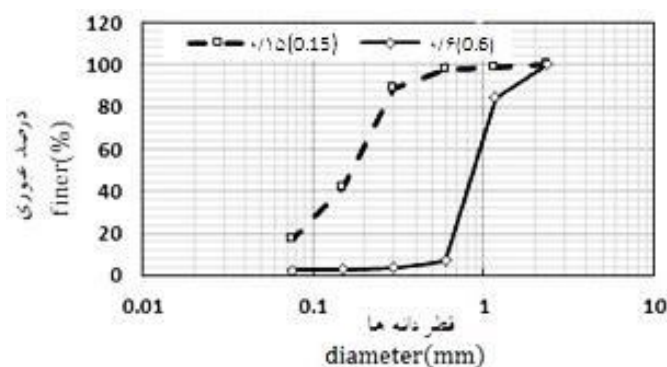
سرعت نسبی جریان (بدون بعد)	$y_n(cm)$ عمق نرمال روی کف‌بند	$h_n(cm)$ ارتفاع بازشدگی دریچه	$L(cm)$ طول گودال	$B(cm)$ عرض گودال	$H(cm)$ ارتفاع گودال
0.83	2.2	0.6	22	30	4,8,12
0.89	2.8	1	22	30	4,8,12
0.94	3.3	1.25	22	30	4,8,12
1	4	1.5	22	30	4,8,12

اگر بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد مصالح به صورت غیریکنواخت محسوب می‌شود (شفاعی بجزستانی ۲۰۰۵) و نشریه ۵۴۹ ((۲۰۱۱)) (۷ و ۱۶).

(۱)

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0.5}$$

مشخصات ذرات رسوبی تشکیل‌دهنده بستر: شکل ۵ منحنی دانه‌بندی را برای دو دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری نشان می‌دهد. انحراف معیار هندسی اندازه دانه‌ها با توجه به رابطه ۱ مقدار انحراف معیار هندسی برای مصالح با قطر متوسط ۰/۱۵ میلی‌متر و ۰/۶ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱/۹۳ و ۱/۳۷ می‌باشد. با لحاظ نمودن این رابطه، اگر انحراف معیار استاندارد هندسی کوچک‌تر از ۱/۵ باشد مصالح به صورت یکنواخت و



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده بستر. برای اقطار متوسط ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری.

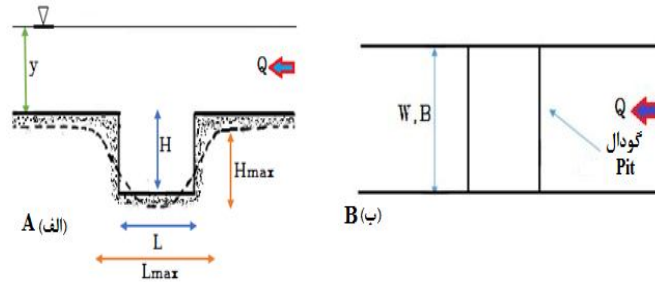
Figure 5. Gradation curves for the bed materials with Median diameters of the 0.15, 0.6 mm.

هندسی گودال شامل H, L, B و مشخصات هیدرولیکی شامل $g, \gamma, V, u_{*cr}, \phi$ و مشخصات مربوط به آب و رسوب شامل $\gamma_w, \gamma_s, D, \nu$ می‌باشد. که B عرض گودال ایجاد شده، L طول گودال، H ارتفاع گودال، g شتاب گرانش، γ عمق جریان،

آنالیز ابعادی: برای بیان موقعیت‌ها و ابعاد گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه، حداکثر عمق و طول آبستنگی به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شد. متغیرهای مستقل نیز عبارتند از: مشخصات

متغیرهای استفاده شده در آنالیز ابعادی بوده و برای محاسبه ماکزیمم عمق آبستگي H_{max} تابعی به صورت زیر (رابطه ۲) تعریف شد:

$$H_{max} = f_1(H, L, B, y, V, g, u_{*cr}, \phi, D, \gamma_s, \gamma_w, \nu, t) \quad (2)$$



شکل ۶- نمایی شماتیک از گودال ایجاد شده: (الف) نما از روبرو، (ب) نما از بالا.

Figure 6. A schematic view of the created pit holes. (A) Side view, (B) Top view.

آزمایش‌ها، می‌توان از هر دو عبارت فوق چشم‌پوشی کرد (رابطه ۵):

$$\frac{H_{max}}{H} = f_5\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, Fr^2, \frac{u_{*cr}}{V}, \phi, \frac{D}{y}\right) \quad (5)$$

و با روشی مشابه برای حداکثر طول (L_{max}) خواهیم داشت (رابطه ۶):

$$\frac{L_{max}}{H} = f_6\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, Fr^2, \frac{u_{*cr}}{V}, \phi, \frac{D}{y}\right) \quad (6)$$

نتایج و بحث

نمای سه‌بعدی انتقال گودال ایجاد شده برای دبی‌های مختلف در پژوهش حاضر مطابق الگوی زیر ارائه شده است (شکل ۷).

V سرعت جریان، u_{*cr} سرعت برشی بحرانی ذرات رسوبی، ϕ زاویه ایستایی مصالح داخل آب، γ_w وزن مخصوص آب، γ_s وزن مخصوص ذرات رسوبی، D قطر ذرات رسوبی و ν لزجت سینماتیکی آب و t زمان آزمایش می‌باشد. شکل ۶، نشان‌دهنده

عمق آبستگي (H_{max}) پس از رسیدن به زمان تعادل تابعی از t نیست بنابراین قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد و خواهیم داشت (رابطه ۳):

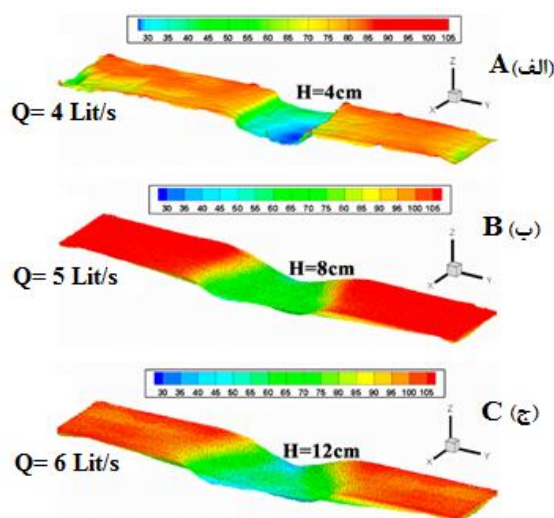
$$H_{max} = f_2(H, L, B, y, V, g, u_{*cr}, \phi, D, \gamma_s, \gamma_w, \nu) \quad (3)$$

با استفاده از روش پی باکینگهام و کمیت‌های بدون بعد خواهیم داشت (رابطه ۴):

$$(4)$$

$$\frac{H_{max}}{H} = f_4\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{V^2}{gy}, \frac{u_{*cr}}{V}, \phi, \frac{D}{y}, \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G_s, \frac{Vy}{\nu}\right)$$

عبارت $\frac{Vy}{\nu}$ معادل عدد بی‌بعد رینولدز بوده و در همه آزمایش‌ها جریان به صورت آشفته می‌باشد و از طرفی دیگر با توجه به ثابت بودن مقدار G_s در تمام



شکل ۷- نمای سه‌بعدی از انتقال گودال‌های ایجاد شده در دبی‌های مختلف.

Figure 7. Three-dimensional view of the observed pit migration at different discharges.

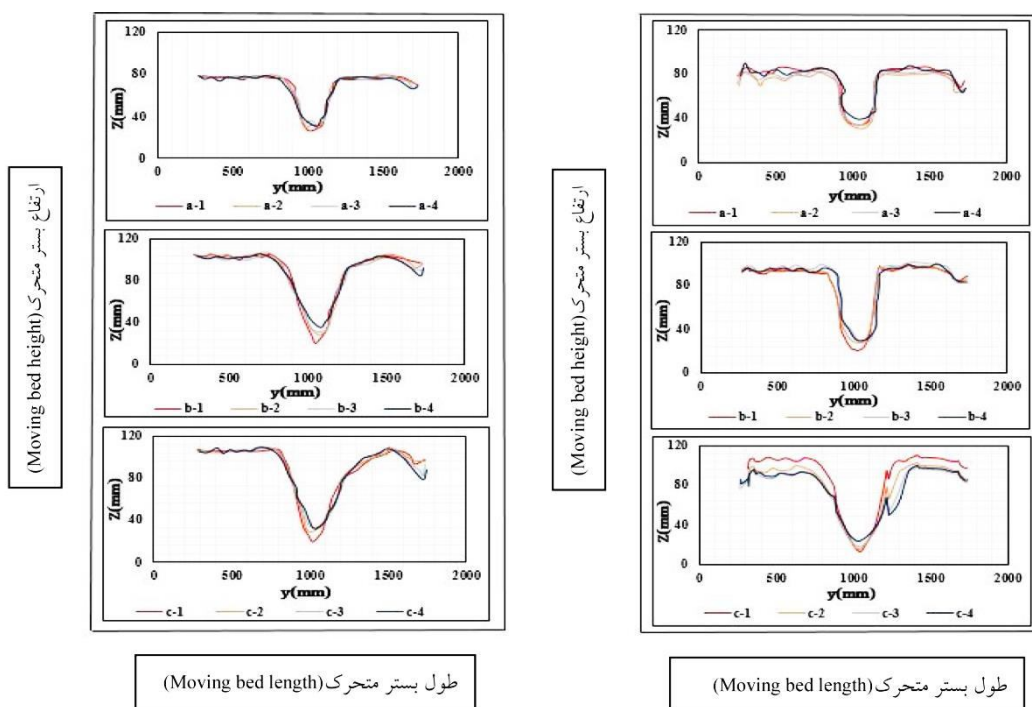
اعمال دریچه در ارتفاع گودال‌های مختلف در دبی حداکثر ۶ لیتر بر ثانیه برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری می‌باشد.

مشاهده می‌گردد که در $H=4\text{cm}$ میزان انتقال گودال برای هر دو دانه‌بندی مذکور از (a-1) شروع شده و با گذشت زمان افزایش یافته که در (a-4) این مقدار به ماکزیمم می‌رسد و از این مرحله به بعد و پس از برقراری تعادل بین رسوب ورودی و خروجی، گودال دچار تغییر نمی‌شود. با دو برابر کردن عمق گودال در همان دبی ۶ لیتر بر ثانیه مشاهده می‌گردد که میزان انتقال گودال نسبت به حالت اولیه، بیشتر شده و جریان آب قابلیت حمل ذرات رسوبی بیشتری را دارد که این تغییرات برای هر دو دانه‌بندی در قسمت‌های (b-1) تا (b-4) نشان داده شده است. همچنین با افزایش ارتفاع گودال به سه برابر حالت اولیه مشاهده می‌گردد که در دبی حداکثر با بیش‌ترین عمق گودال ($H=12\text{cm}$) میزان انتقال گودال نسبت به دو مرحله قبلی بیشتر بوده که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین دبی و عمق گودال می‌باشد. همچنین با توجه به رابطه انرژی مخصوص در محل گودال، عمق

با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان، گودال با رسوب‌گذاری در بالادست و فرسایش در پایین‌دست همراه خواهد بود. بدین نحو که در اثر برداشت رسوب از بستر، شیب در بازه برداشت افزایش یافته و باعث افزایش تنش برشی در بالادست می‌شود. در نهایت رسوبات به صورت بار بستر حرکت کرده و موقعی که به گودال می‌رسند، از آن‌جایی که سرعت آب کاهش و عمق آب افزایش می‌یابد، جریان آب توانایی حمل رسوبات بزرگ‌تر و سنگین‌تر را نداشته، به همین دلیل رسوبات بزرگ‌تر در قسمت بالادست ته‌نشین می‌شوند. چنانچه میزان رسوبی که همراه جریان آب از محل گودال عبور می‌کند، کم‌تر از ظرفیت حمل رسوب باشد زمانی که به قسمت پایین‌تری می‌رسد مقدار بیشتری از رسوبات را بر می‌دارد که این امر موجب شستگی و از بین رفتن بستر رسوبی در پایین‌دست گودال می‌شود. این پدیده تا جایی ادامه پیدا می‌کند که میزان رسوب ورودی و خروجی در محل گودال به تعادل برسد و از این مرحله به بعد گودال منتقل نمی‌شود. شکل ۸ نشان‌دهنده تغییرات نیم‌رخ طولی در حالت بدون

سمت راست مربوط به دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متری و نمودارهای سمت چپ مربوط به دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری می‌باشد (در این نمودارها Z نمایانگر ارتفاع بستر متحرک و y طول بستر متحرک می‌باشد).

آب افزایش و سرعت جریان کاهش می‌یابد. بنابراین انرژی مخصوص بیش‌ترین تأثیر را از عمق آب بر می‌دارد به این صورت که با افزایش عمق آب، انرژی مخصوص نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۸ نمودارهای



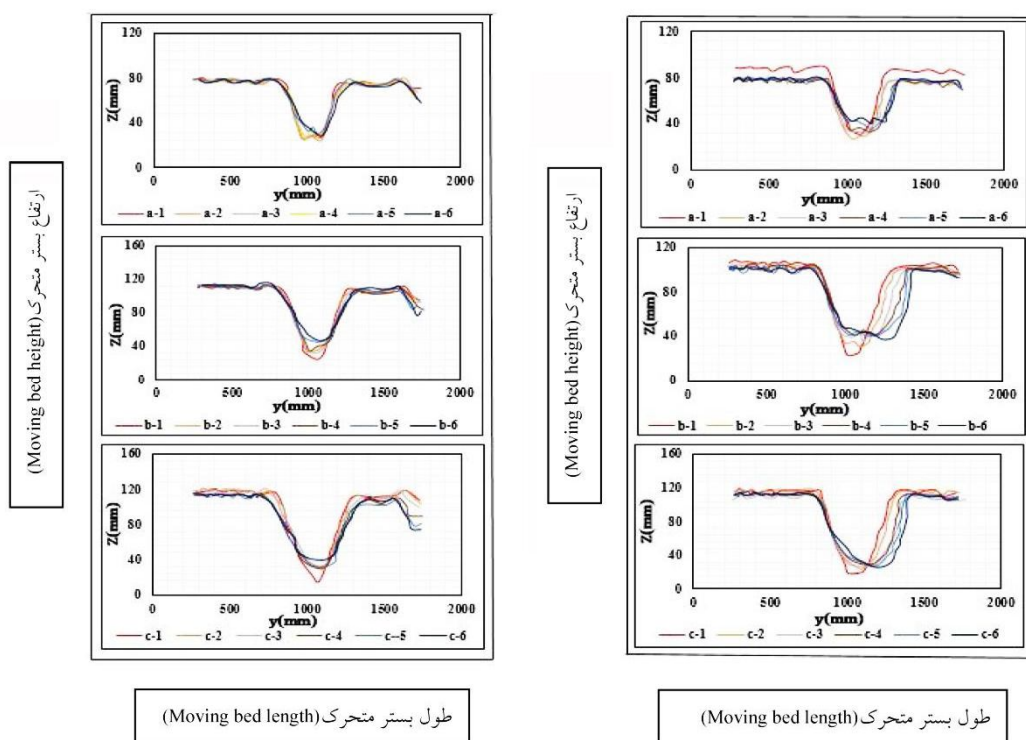
شکل ۸- نیمرخ طولی از انتقال گودال برای دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری.

Figure 8. Longitudinal profile of the pit migration for the grains with median diameters of 0.15 and 0.6 mm.

دریچه زمان تعادل ۱۵ دقیقه ششم (یک و نیم ساعت) است. در حالت با اعمال دریچه به علت پدیده برگشت آب علاوه بر تغییرات رخ داده در پایین دست گودال، در بالادست گودال نیز دچار تغییر خواهد شد. شکل سمت راست مربوط به دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متری و شکل سمت چپ مربوط به دانه بندی ۰/۶ میلی‌متری می‌باشد (در این نمودارها Z نمایانگر ارتفاع بستر متحرک و y طول بستر متحرک می‌باشد).

شکل ۹، نشان‌دهنده تغییرات نیمرخ طولی در حالت با اعمال دریچه در دبی ۶ لیتر بر ثانیه با ارتفاع گودال‌های مختلف برای هر دو دانه‌بندی ذکر شده می‌باشد.

در این نمودارها نیز مشابه اشکال حالت بدون اعمال دریچه، تغییرات حاصل از انتقال گودال از روند یکسانی تبعیت می‌کنند منتهی با یک تغییر محسوس، در حالت بدون اعمال دریچه زمان تعادل ۱۵ دقیقه چهارم (یک ساعت) بود ولی در حالت با اعمال



شکل ۹- نیمرخ طولی از انتقال گودال برای دانه‌بندی ۰/۱۵ و ۰/۸ میلی‌متری.

Figure 9. Longitudinal profile of the pit migration for grains with median diameters of the 0.15 and 0.6 mm.

$$\frac{L_{\max}}{H} = 20.064 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.723} \cdot \left(\frac{L}{y}\right)^{0.306} \cdot \left(\frac{B}{y}\right)^{0.5035} \quad (\lambda)$$

$$\cdot (Fr)^{-0.784} \cdot \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.442} \cdot (\phi)^{0.715} \cdot \left(\frac{D}{y}\right)^{0.0111}$$

طبق رابطه ۷، $\frac{H_{\max}}{H}$ با پارامترهای بی‌بعد $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ و ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای بی‌بعد $\frac{H}{y}$ ، Fr و $\frac{D}{y}$ رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای بی‌بعد بالا، ϕ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش $\frac{H}{y}$ و بیش‌ترین تأثیر را در کاهش $\frac{H_{\max}}{H}$ دارد. جدول ۲ نشان‌دهنده آنالیز حساسیت پارامترهای بدون بعد رابطه ۷ می‌باشد.

بررسی حداکثر عمق آبستگي گودال: در زیر براساس آنالیز ابعادی و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ۴ دبی مختلف، معادلات تجربی برای حداکثر طول و عمق آبستگي گودال برای سه حالت مختلف (مدل (۱) با دریچه و بدون دریچه برای کل دانه‌بندی‌ها، مدل (۲) بدون دریچه با دو دانه‌بندی مختلف و مدل (۳) با دریچه با دو دانه‌بندی مختلف) ارائه شده است. برای مدل (۱) در حالت کلی (با دریچه و بدون دریچه و تمامی دانه‌بندی‌ها) روابط به‌صورت زیر حاصل شد:

$$\frac{H_{\max}}{H} = 1.707 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.7541} \cdot \left(\frac{L}{y}\right)^{0.333} \cdot \left(\frac{B}{y}\right)^{0.37} \quad (\nu)$$

$$\cdot (Fr)^{-0.1272} \cdot \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.32} \cdot (\phi)^{0.94} \cdot \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.081}$$

جدول ۲- آنالیز حساسیت رابطه (۷).

Table 2. The Sensitivity Analysis of the Eq. 7.

درصد Percent	درصد کاهش پارامتر The percentage of the parameter decrease				درصد افزایش پارامتر The percentage of the parameter increase				پارامترهای بدون بعد Dimensionless parameters
	20%	40%	60%	80%	30%	50%	70%	90%	
	1.180	1.470	1.991	3.366	0.820	0.740	0.671	0.623	$\frac{H}{y}$
	0.930	0.841	0.740	0.585	1.091	1.144	1.163	1.240	$\frac{L}{y}$
	0.921	0.830	0.712	0.551	1.102	1.162	1.222	1.272	$\frac{B}{y}$
$\frac{H_{max}}{H}$	1.028	1.067	1.124	1.227	0.967	0.949	0.935	0.922	Fr
	0.930	0.850	0.746	0.597	1.087	1.138	1.185	1.232	$\frac{u_{*cr}}{V}$
	0.811	0.622	0.423	0.220	1.281	1.464	1.650	1.830	ϕ
	1.018	1.042	1.077	1.140	0.980	0.971	0.960	0.951	$\frac{D}{y}$

$$\frac{H_{max}}{H} = 2.098 \left(\frac{H}{y}\right)^{-1.1245} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.48} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.152} \cdot (Fr)^{-0.0843} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{1.06} \cdot (\phi)^{0.9321} \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.381} \quad (11)$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{H_{max}}{H}$ با پارامترهای بی‌بعد $\frac{u_{*cr}}{V}$ ، $\frac{B}{y}$ ، $\frac{L}{y}$ ، ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای بی‌بعد $\frac{D}{y}$ ، Fr ، $\frac{H}{y}$ رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای ذکر شده در بالا $\frac{u_{*cr}}{V}$ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش $\frac{H_{max}}{H}$ و همچنین $\frac{H}{y}$ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش $\frac{H_{max}}{H}$ داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر $2/98\%$ و $0/23$ برای دانه‌بندی $0/15$ میلی‌متر برای حالت بدون اعمال دریاچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد.

درصد خطای نسبی و خطای RMSE از روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید:

$$Relative\ Error(\%) = \left(\frac{X_{comput} - X_{observ}}{X_{comput}}\right) * 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{comput} - X_{observ})^2}{n}} \quad (10)$$

که در آن‌ها، X_{comput} داده‌های محاسباتی، X_{observ} داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد آزمایش‌ها می‌باشد. با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های محاسباتی از رابطه ۷ درصد خطای نسبی $6/076\%$ و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به $0/122$ می‌رسد که نشان‌دهنده تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی در حالت کلی می‌باشد.

برای مدل (۲) حالت بدون اعمال دریاچه برای دانه‌بندی $0/15$ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{H_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۱ است:

ϕ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش و $\frac{H}{y}$ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش $\frac{H_{max}}{H}$ داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۰/۴۶٪ برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر برای حالت بدون اعمال دریچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی می‌باشد.

برای مدل (۳) حالت با اعمال دریچه برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{H_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۴ است:

$$\frac{H_{max}}{H} = 1.077 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.6443} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.1075} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.098} (Fr)^{-0.037} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{-0.4} (\phi)^{1.015} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.2} \quad (14)$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{H_{max}}{H}$ با پارامترهای $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، ϕ و $\frac{D}{y}$ رابطه مستقیم و با پارامترهای $\frac{H}{y}$ ، Fr و $\frac{u_{*cr}}{V}$ رابطه عکس دارد که از بین پارامترهای بالا، ϕ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش و $\frac{H}{y}$ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش نسبت $\frac{H_{max}}{H}$ داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین درصد خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۰/۳۱ و ۰/۵۳٪ برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر برای حالت با اعمال دریچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی می‌باشد.

شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات $\frac{H_{max}}{H}$ آزمایشگاهی و محاسباتی برای حالت‌های مختلف می‌باشد.

برای حالت با اعمال دریچه برای دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{H_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۲ است:

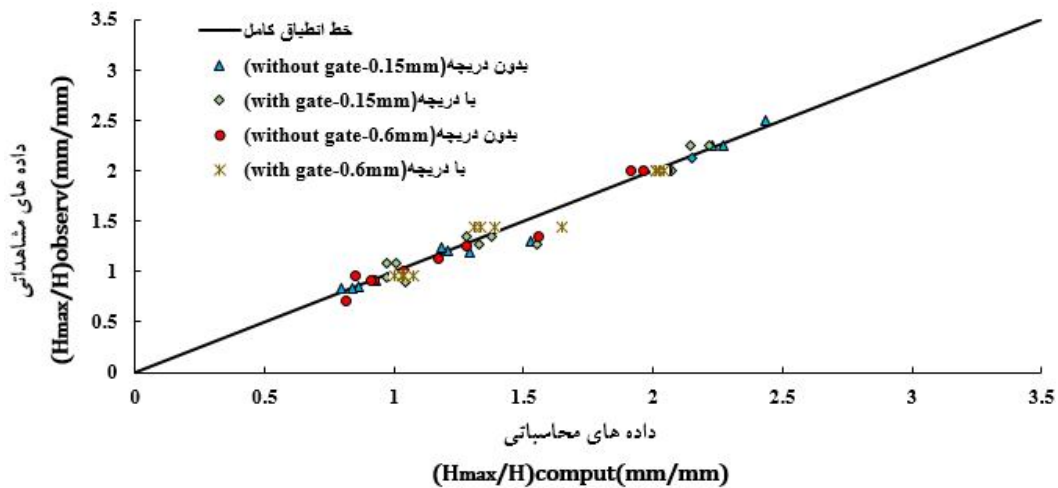
$$\frac{H_{max}}{H} = 1.74 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.7} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.4361} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.46} (\phi)^{0.951} \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.218} (Fr)^{0.0566} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.6033} \quad (12)$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{H_{max}}{H}$ با پارامترهای بی‌بعد $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، Fr ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ و ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای بی‌بعد $\frac{H}{y}$ و $\frac{D}{y}$ رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای بالا، ϕ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش $\frac{H_{max}}{H}$ و همچنین پارامتر $\frac{H}{y}$ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش این نسبت دارد.

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۰/۴۹٪ برای دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متر برای حالت با اعمال دریچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی می‌باشد. برای حالت بدون اعمال دریچه برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{H_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۳ است:

$$\frac{H_{max}}{H} = 1.141 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.9031} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.04633} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.0421} (\phi)^{1.006} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.08} (Fr)^{0.303} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{-0.19781} \quad (13)$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{H_{max}}{H}$ با پارامترهای $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، Fr ، ϕ و $\frac{D}{y}$ رابطه مستقیم و با پارامترهای $\frac{H}{y}$ و $\frac{u_{*cr}}{V}$ رابطه عکس دارد. لازم به ذکر است که



شکل ۱۰- تغییرات $\frac{H_{max}}{H}$ آزمایشگاهی و $\frac{H_{max}}{H}$ محاسباتی.

Figure 10. The depiction of the experimental and computational $\frac{H_{max}}{H}$ parameter versus each other.

عمق آبستگي گودال برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری ارائه گردیده است.

در جدول ۳ درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE به همراه ضریب همبستگی (R^2) برای حالت‌های با و بدون اعمال دریچه در حداکثر

جدول ۳- خطاها و ضرایب همبستگی برای حالت‌های با و بدون دریچه برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری.

Table 3. Relative errors and correlation coefficients with or without end gate flow conditions including grains with 0.15 and 0.6 millimetres median size.

مدل‌ها Models	دانه‌بندی (میلی‌متر) Median grain size (mm)	خطای نسبی (درصد) Relative error (percent)	خطای جذر میانگین مربعات RMSE	ضرایب همبستگی correlation coefficients
بدون دریچه without gate	0.15	2.98	0.23	0.99
با دریچه with gate	0.15	4.99	0.27	0.97
بدون دریچه without gate	0.6	4.66	0.28	0.98
با دریچه with gate	0.6	5.31	0.31	0.97
حالت کلی General model	0.15-0.6	6.076	0.122	0.95

مستقیم و با پارامترهای بی‌بعد $\frac{H}{y}$ و Fr رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای بالا ϕ بیش‌ترین تأثیر را در افزایش و همچنین Fr بیش‌ترین اثر را در کاهش $\frac{L_{max}}{H}$ ایفا می‌کند. جدول ۴ نمایانگر آنالیز حساسیت برای رابطه ۸ می‌باشد.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌گردد که برای حالت بدون اعمال دریچه در گودال در دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری درصد خطای نسبی و خطای RMSE (بدون واحد) کم‌تر و همچنین ضریب همبستگی (R^2) بیش‌تر از حالت با دریچه می‌باشد.

بررسی طول آبشستگی گودال: طبق رابطه ۸ $\frac{L_{max}}{H}$

با پارامترهای بی‌بعد $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ ، ϕ و $\frac{D}{y}$ رابطه

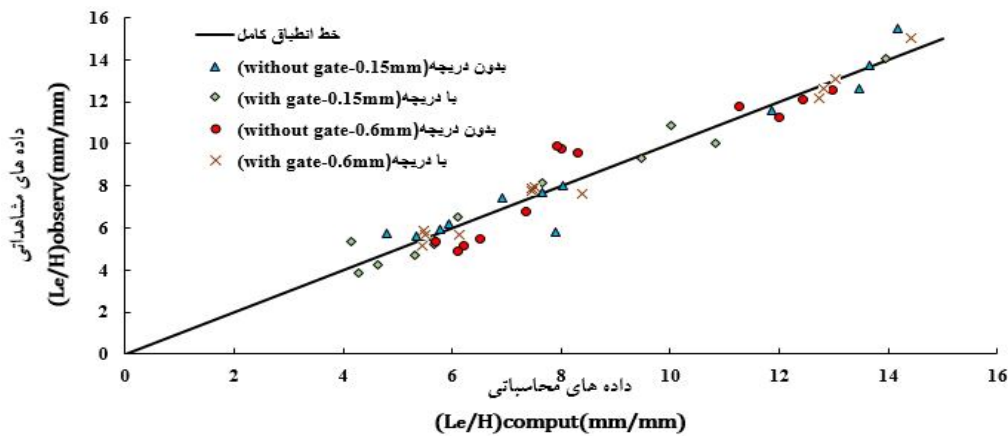
جدول ۴- آنالیز حساسیت رابطه ۸

Table 4. The Sensitivity Analysis of Eq. 8.

درصد Percent	درصد کاهش پارامتر Percent of the parameter decrease				درصد افزایش پارامتر Percent of the parameter increase				پارامترهای بدون بعد Dimensionless parameters
	30%	50%	70%	90%	20%	40%	60%	80%	
	1.294	1.651	2.391	5.281	0.876	0.784	0.712	0.654	$\frac{H}{y}$
	0.897	0.811	0.690	0.490	1.057	1.111	1.155	1.197	$\frac{L}{y}$
	0.836	0.705	0.545	0.314	1.096	1.185	1.270	1.344	$\frac{B}{y}$
$\frac{L_{max}}{H}$	1.323	1.722	2.570	6.081	0.867	0.768	0.692	0.631	Fr
	0.850	0.736	0.587	0.360	1.084	1.160	1.231	1.300	$\frac{u_{*cr}}{V}$
	0.775	0.612	0.423	0.193	1.142	1.272	1.401	1.522	ϕ
	0.996	0.991	0.987	0.975	1.002	1.004	1.005	1.006	$\frac{D}{y}$

و محاسباتی می‌باشد. شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات $\frac{L_{max}}{H}$ آزمایشگاهی و $\frac{L_{max}}{H}$ محاسباتی برای حالت‌های مختلف می‌باشد.

با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های محاسباتی درصد خطای نسبی ۱۳/۰۶۴٪ و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ۱/۲۱ خواهد رسید که نشان‌دهنده تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۱- تغییرات $\frac{L_{max}}{H}$ آزمایشگاهی و $\frac{L_{max}}{H}$ محاسباتی.

Figure 11. The depiction of the experimental and computational $\frac{L_{max}}{H}$ parameter versus each other.

برای حالت با اعمال دریچه برای دانه بندی ۰/۱۵ میلی متری نسبت بی بعد $\frac{L_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۶ است:

$$\frac{L_{max}}{H} = 6.0165 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.944} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.841} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.936} (Fr)^{-2.304} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{3.4250} (\phi)^{0.8081} \left(\frac{D}{y}\right)^{-1.5485} \quad (16)$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{L_{max}}{H}$ با $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ و ϕ رابطه مستقیم و با $\frac{H}{y}$ ، Fr و $\frac{D}{y}$ رابطه عکس دارد. از بین این پارامترها $\frac{u_{*cr}}{V}$ بیشترین تأثیر را در افزایش Fr و بیشترین تأثیر را در کاهش $\frac{L_{max}}{H}$ داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین درصد خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۸/۱۲٪ و ۰/۵۴ برای دانه بندی ۰/۱۵ میلی متر برای حالت با اعمال دریچه می باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و داده های محاسباتی می باشد.

برای حالت بدون اعمال دریچه برای دانه بندی ۰/۱۵ میلی متری نسبت بی بعد $\frac{L_{max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۵ است:

$$\frac{L_{max}}{H} = 1.0914 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.522} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.366} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.358} (Fr)^{-0.222} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{-1.313} (\phi)^{1.001} \left(\frac{D}{y}\right)^{0.42671} \quad (15)$$

با توجه به رابطه بالا، نسبت $\frac{L_{max}}{H}$ با پارامترهای $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، ϕ و $\frac{D}{y}$ رابطه مستقیم و با پارامترهای $\frac{H}{y}$ ، Fr و $\frac{u_{*cr}}{V}$ رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای بی بعد بالا، ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش $\frac{L_{max}}{H}$ و پارامتر $\frac{u_{*cr}}{V}$ بیشترین تأثیر را در کاهش این نسبت داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۷/۴۲٪ و ۰/۸۲ برای دانه بندی ۰/۱۵ میلی متر برای حالت بدون اعمال دریچه می باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و محاسباتی می باشد.

$$\frac{L_{\max}}{H} = 3.6873 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.7657} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.6507} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.7096} \quad (18)$$

$$\cdot (Fr)^{-1.024} \cdot \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.8696} \cdot (\phi)^{0.88834} \cdot \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.52114}$$

با توجه به رابطه بالا، $\frac{L_{\max}}{H}$ با $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ و ϕ رابطه مستقیم و با Fr ، $\frac{H}{y}$ و $\frac{D}{y}$ رابطه عکس دارد. لازم به ذکر است که ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش و Fr بیشترین تأثیر را در کاهش ϕ داشته است.

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۴/۷۵٪ و ۰/۵ برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر برای حالت با اعمال دریچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی می‌باشد. در جدول ۵ درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE به همراه ضریب همبستگی (R^2) برای حالت‌های با و بدون اعمال دریچه در حداکثر طول آبهستگی برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری ارائه گردیده است.

برای حالت بدون اعمال دریچه برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{L_{\max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۷ است:

$$\frac{L_{\max}}{H} = 2.1542 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.65} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.398} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.432257} \quad (17)$$

$$\cdot (Fr)^{0.7261} \cdot \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.172} \cdot (\phi)^{0.9342} \cdot \left(\frac{D}{y}\right)^{-0.3042}$$

با توجه به رابطه ۱۷، $\frac{L_{\max}}{H}$ با پارامترهای بی‌بعد $\frac{L}{y}$ ، $\frac{B}{y}$ ، Fr ، $\frac{u_{*cr}}{V}$ و ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای $\frac{H}{y}$ و $\frac{D}{y}$ رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای بالا، ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش و $\frac{H}{y}$ بیشترین تأثیر را در کاهش $\frac{L_{\max}}{H}$ داشته است. درصد خطای نسبی و همچنین درصد خطای RMSE (بدون واحد) به ترتیب برابر ۱۲/۳۴٪ و ۰/۸۶ برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر برای حالت بدون اعمال دریچه می‌باشد که نشانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی می‌باشد. برای حالت با اعمال دریچه برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری نسبت بی‌بعد $\frac{L_{\max}}{H}$ به صورت رابطه ۱۸ است:

جدول ۵- خطاها و ضرایب همبستگی برای حالت‌های با و بدون دریچه در حداکثر طول آبهستگی گودال برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری.

Table 5. Errors and correlation coefficients for with and without gate conditions at maximum pit scour length including the grains with 0.15 and 0.6 millimetres median diameters.

مدل‌ها Models	دانه بندی (میلی‌متر) Grain median size (mm)	خطای نسبی (درصد) Relative error (percent)	خطای جذر میانگین مربعات RMSE	ضرایب همبستگی correlation coefficients
با دریچه with gate	0.15	8.12	0.54	0.96
بدون دریچه without gate	0.6	12.34	0.86	0.86
با دریچه with gate	0.6	4.75	0.50	0.98
حالت کلی General model	0.15-0.6	13.06	1.21	0.87

دانه‌بندی‌های مذکور به همراه نمایی سه‌بعدی از گودال‌ها در شرایط مختلف به ترتیب توسط نرم‌افزارهای Excel و Tec-plot 360 ارائه گردید. ثابت شد که کم‌ترین درصد خطا برای حداکثر عمق آبشستگی مربوط به دانه‌بندی ۰/۱۵ میلی‌متری در حالت بدون اعمال دریچه با درصد خطای نسبی ۲/۹۸٪ و خطای RMSE (بدون واحد)، ۰/۲۳ می‌باشد. کم‌ترین درصد خطا برای حداکثر طول آبشستگی نیز مربوط به دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متری برای حالت با اعمال دریچه با درصد خطای نسبی ۴/۷۵٪ و خطای RMSE (بدون واحد)، ۰/۵ می‌باشد. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش ارتفاع گودال‌ها از ۱۲ به ۴ سانتی‌متر و همچنین با ایجاد جریان ثانویه در داخل گودال‌ها، نسبت بی‌بعد ارتفاع گودال به عمق جریان $(\frac{H}{y})$ کاهش و برعکس طول و عرض گودال به عمق جریان $(\frac{L}{y})$ و $(\frac{B}{y})$ افزایش می‌یابد. در ضمن مشخص گردید که با افزایش تنش برشی و عدد فرود نسبت سرعت برشی بحرانی به سرعت جریان $(\frac{u_{*cr}}{V})$ افزایش خواهد یافت. رابطه‌های ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شدند که نتایج رضایت‌بخش بود.

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد که کم‌ترین درصد خطای نسبی و خطای RMSE (بدون واحد) و همچنین بیش‌ترین ضریب همبستگی (R^2) مربوط به حالت با اعمال دریچه به ترتیب برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای با ابعاد و سرعت‌های نسبی جریان مختلف در شرایط با و بدون اعمال دریچه در دانه‌بندی‌های یکنواخت و غیریکنواخت (۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری) پرداخته شد. معادلات تجربی برای حداکثر طول و عمق آبشستگی برای گودال مستطیلی شکل در هر دو حالت با و بدون اعمال دریچه برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر ارائه گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حداکثر طول و عمق آبشستگی گودال با زاویه ایستایی مصالح داخل آب (ϕ) رابطه مستقیم و با نسبت بی‌بعد ارتفاع گودال به عمق جریان $(\frac{H}{y})$ رابطه عکس دارد. همچنین آنالیز حساسیت برای نشان دادن اثر پارامترهای بی‌بعد در کاهش و افزایش حداکثر عمق و طول آبشستگی بیان گردید. در ضمن نیمرخ طولی از انتقال گودال در هر دو حالت برای

منابع

1. Amini, A. 2001. Field and Experimental investigation of the displacement of the material pit. Master's Thesis. Tarbiat Modares University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
2. Ashraf, M.A., Maah, M.J., Yusoff, I., Wajid, A., and Mahmood, K. 2011. Sand mining effects, causes and concerns: A case study from Bestari Jaya, Selangor, Peninsular Malaysia. Scientific Research and Essays, 6: 6. 1216-1231.
3. Cantelli, A., and Muto, T. 2014. Multiple knick points in an alluvial river generated by a single instantaneous drop in base level: experimental investigation. Earth Surface Dynamics, 2: 1. 271.
4. Chen, D. 2011. Modeling channel response to in stream gravel mining, Sediment Transport-Flow and Morphological Processes, 250p.
5. Farhadzadeh, A. 2000. Investigate the displacement of the pit caused by the removal of sand in a bed of a canal. Master's Thesis. Tarbiat Modares University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)

6. Grimaud, J.L., Paola, C., and Voller, V. 2016. Experimental migration of knick points: influence of style of base-level fall and bed lithology. *Earth Surface Dynamics*, 4: 1. 11.
7. Guide to local scour calculation methods. 2011. 549 review National Planning and Budget Organization. (In Persian)
8. Jabbari, E., and Farzi, H. 2010. Sand and gravel production and these results in the changing patterns of Razavr River sediment load. *Geographic Research*, 93: 1. 145-160. (In Persian)
9. Lee, H.Y., Fu, D.T., and Song, M.H. 1993. Migration of Rectangular mining pit composed of uniform sediment. *J. Hydr. Engin.* 119: 1. 64-80.
10. Lee, H.Y., and Chen, S.C. 1996. Migration of rectangular mining pit composed of non-uniform sediments. *J. Chine. Inst. Engin.* 19: 2. 255-264.
11. Liangwen, J., Zhangren, L., Qingshu, Y., Shuying, O., and Yaping, L. 2007. Impacts of the large amount of sand mining on riverbed morphology and tidal dynamics in lower reaches and delta of the Dongjiang River. *J. Geograph. Sci.* 17: 2. 197-211.
12. Neyshabouri, S.A.A.S., Farhadzadeh, A., and Amini, A. 2002. Experimental and field study on mining-pit migration. *Inter. J. Sed. Res.* 17: 4. 323-331.
13. Rinaldi, M., Wyzga, B., and Surian, N. 2005. Sediment mining in alluvial channels: Physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21: 7. 805-828.
14. Rezaie, M., Daneshfaraz, R., and Dasineh, M. 2018. Experimental Investigation of the Effect of Clay and Polyacrylamide Cationic Addition on Scouring Reduction of Pier Bridges and pits created by bed material removal. *Hydraulic Press*, 13: 3. 59-70. (In Persian)
15. Sracek, O., Bohdan, K., Martin, M., Vladimír, M., František, V., Zbyněk, V., and Imasiku, N. 2012. Mining-related contamination of surface water and sediments of the Kafue River drainage system in the Copperbelt district, Zambia: An example of a high neutralization capacity system. *J. Geochem. Exp.* 112: 2. 174-188.
16. Shabahi Bajestan, M. 2005. Hydraulic sediment. Shahid Chamran University of Ahvaz Publications.



The experimental investigation of the maximum depth and length of pit holes created by bed material removal under subcritical flow condition

*R. Daneshfaraz¹, J. Chabokpour² and M. Dasineh³

¹Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Maragheh,

²Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Maragheh,

³M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, University of Maragheh

Received: 05.01.2017; Accepted: 01.08.2019

Abstract

Background and Objectives: The removal of sand and gravel from the bed and the banks of the rivers causes change in the hydraulic and hydrology conditions, increased erosion of the bedding and the banks of the river, also the destruction of existing structures along the river. The purpose of the present study is to investigate the maximum depth and length of the created pits migration due to the river material removal.

Materials and Methods: For this research, a rectangular flume with length, width and height of (5, 0.3, 0.45) meters with a constant slope was used. The pit holes with different sizes and under the relative velocities of 0.83, 0.89, 0.94 and 1 have been operated for the state of with or without gate by using two sediments mean dimensions of the 0.15, 0.6 mm. In this study, the duration of the experiments, were fixed to 1 and 1.5 hours respectively for state of with and without gate, that the equilibrium time for both of them was the last 15 minutes. A 3D laser scanner was used to take data from a three-dimensional profile of the bed in both state, after disconnecting water and recording the depth of water in different places. Also, from the side view of the experimental flume, the digital photos were taken to view the conditions of the pits migration at different time intervals. Afterward, using the MATLAB, Tec-Plot 360, Excel and Grapher software tried to rearrange and reconfigured data and drawn graphs were taken. During the experiments, the bedforms at the up and downstream of the Created pits were observed and their temporal variations were recorded.

Results: The results of the experiments showed that with decreasing of the Froude number, pits depth and also by creation of the secondary flow inside the holes, the dimensionless ratio of the $\frac{H}{y}$ decreases and reversely, the dimensionless parameters of the $\frac{L}{y}$ and $\frac{B}{y}$ increases. On the other hand, it was concluded that by increasing the shear stress and Froude number, the dimensionless ratio of the $\frac{u_{*cr}}{V}$ will increase. The longitudinal profiles and 3D view of the pits migration at the all of the Hydraulic and sediment conditions were observed and depicted. At the end, the experimental equations for the maximum of scouring length and depth for the rectangular pit were presented along with the sensitivity analysis. In general, it was shown that the submerged angle of repose of materials (ϕ) has the greatest effect on the increase and $\frac{H}{y}$ has the greatest effect on reducing the length and depth of the scouring pit.

* Corresponding Author; Email: daneshfaraz@yahoo.com

Conclusion: The results of the experiments have been illustrated by presenting the dimensionless relationships for maximum depth and length of the pits for both state of with and without gate in both sediments mean dimensions of the 0.15, 0.6 mm under subcritical flow conditions and showing the maximum and minimum effect of parameters and the use of sensitivity analysis for the obtained relationships. It was proved that the lowest error percent for maximum scour depth was observed in the 0.15 mm mean sediment particles in state of without gate, having the relative error of 2.98% and RMSE of 0.23. Also, the lowest error percent of the maximum scour length is related to a 0.6 mm mean sediment particles with a relative error of 4.75% and an RMSE of 0.5.

Keywords: Angle of repose of sediment particles, Maximum pit depth, Maximum pit length, Pit migration, River