

مقاله علمی- پژوهشی

بررسی آبستگي موضعي پايين دست دريچه‌هاي كشويي موازي

بابک محمودی<sup>۱</sup>، محمد همتی<sup>۲\*</sup>، مهدی یاسی<sup>۳</sup>، سجاد احمد حمیدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴

چکیده

آبستگي موضعي پاياب سازه‌هاي هيدروليكي از اهميت زيادي برخوردار است. در مجراهاي عريض به دليل سختي در مانور دريچه‌ها، ملاحظات اقتصادي و سهولت در جابجايي، به جاي استفاده از يك دريچه منفرد، ممكن است چند دريچه وظيفه انتقال آب و تنظيم سطح آب در بالادست را به عهده داشته باشند. بهره‌برداري از دريچه‌هاي موازي به دليل گرفتگي يا خراب بودن برخي از دريچه‌ها، سناريوهاي مختلفی را در عمل مي‌تواند به وجود بياورد. هدف تحقيق حاضر مطالعه آزمايشگاهي تاثير پارامترهاي بهره‌برداري‌هاي مختلف، نسبت تنگ‌شدگي و طول ديوارهاي جداکننده بر توسعه آبستگي در پايين دست حوضچه آرامش دريچه‌هاي كشويي موازي مي‌باشد. در تحقيق حاضر، سه دريچه كشويي موازي با پنج سناريوي مختلف بهره‌برداري مورد بررسي قرار گرفت. نتايج تحقيق حاضر نشان داد كه ابعاد حفره آبستگي موضعي تابعي از بهره‌برداري متقارن و نامتقارن از دريچه‌ها مي‌باشد. با کاهش نسبت عرض دريچه‌هاي باز به عرض كانال، ابعاد حفره آبستگي نسبت به حالت پرش هيدروليكي كلاسيك، افزايش يافت. حداكثر عمق آبستگي در سناريوهاي بهره‌برداري متقارن (B) و نامتقارن (A) نسبت به سناريوي ABC به ترتيب ۱۲۰ و ۴۳ درصد افزايش يافت. افزايش طول ديوارهاي جداکننده مي‌تواند يك گزينه مناسب جهت كنترل ابعاد حفره آبستگي در بهره‌برداري‌هاي مختلف باشد. افزايش ۲۰ درصد طول ديوارهاي جداکننده باعث کاهش حداكثر عمق آبستگي به ميزان ۶۸ درصد در عدد فرود حداكثر (N/۶) و ۱۲۲ درصد در عدد فرود حداقل (۴/۵) در سناريوي B گرديد. اين درصدها براي سناريو A به ترتيب برابر ۱۷ و ۵۸ مي‌باشد. علاوه بر آن، روابطي جهت تخمين ابعاد حفره آبستگي در بهره‌برداري متقارن و نامتقارن از دريچه‌هاي موازي ارائه گرديد.

واژه‌هاي كليدي: آبستگي موضعي، حداكثر عمق آبستگي، دريچه‌هاي موازي، دريچه كشويي، ديوارهاي جداکننده

مقدمه

توسعه آن با زمان از ديرباز مورد توجه مهندسان هيدروليک بوده است. حفاظت بستر رودخانه در پايين دست، يکي از موارد مهمي است که در طراحي سازه‌هاي هيدروليکي مورد توجه مي‌باشد. حفاظت بستر عمليات‌هاي پر هزينه بوده و عمق پي سازه و طول حفاظت بستر رودخانه بستگي به مشخصات آبستگي دارد. جريان در محل وقوع آبستگي يک فرايند دوفازي آب و رسوب است؛ بنا بر اين اين پديده متأثر از مشخصات جريان، مشخصات بستر (رسوب) و زمان مي‌باشد. به همين دليل محققين مختلف به بررسي تاثير موارد مذکور بر آبستگي موضعي پرداخته‌اند.

دريچه‌هاي كشويي يکي از کاربردي‌ترين سازه‌هاي آبي مي‌باشند که برای تنظيم سطح آب و تخليه رسوبات در بندهاي انحرافي و تأمين سطح آب مناسب و اندازه‌گيري جريان در كانال‌هاي آبرساني مورد استفاده قرار مي‌گيرند. در مجراهاي عريض به دليل سختي در مانور دريچه‌ها، ملاحظات اقتصادي و سهولت در جابجايي، به جاي استفاده از يك دريچه منفرد، ممكن است مجموعه‌اي از چند دريچه به جاي يك دريچه، وظيفه انتقال آب و تنظيم سطح آب در بالادست

آبستگي موضعي پديده‌اي است که به دليل ناکافي بودن استهلاک انرژی و تشكيل جريان‌هاي گردابي، در پايين دست سازه‌هاي هيدروليکي نظير دريچه‌ها، سرريزها، حوضچه‌هاي آرامش و سازه‌هاي مشابه به وجود مي‌آيد. اين اتفاق باعث گودشدن بستر رودخانه مي‌گردد و ممكن است مخاطرات جدي را براي سازه مجاور به همراه داشته باشد. از اين رو بررسي آبستگي موضعي و نحوه

۱- دانشجوي دکتری سازه‌هاي آبي، دانشکده کشاورزي، دانشگاه اروميه، اروميه،

ایران

۲- دانشيار گروه مهندسي آب، دانشکده کشاورزي، دانشگاه اروميه، اروميه، ايران

۳- دانشيار گروه مهندسي آبياري و آباداني، دانشکدگان کشاورزي و منابع طبيعي، دانشگاه تهران، کرج، ايران

۴- دانشيار مهندسي عمران، فيزيک و مهندسي، دانشگاه اسلپيري راک، پنسيلوانيا، امريکا

\*-نويسنده مسئول:

(Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.5.5.0

می‌یابد.

سابقه مطالعاتی انجام‌شده در بازه آبخستگی موضعی توسط محققان مختلف می‌تواند به چند بخش کلی تقسیم‌بندی گردد. برخی از محققان به مطالعه و بررسی هندسه حفره آبخستگی در زمان‌های مختلف پرداخته‌اند و برخی دیگر عوامل مؤثر بر توسعه حفره را مورد بررسی قرار داده‌اند. برخی محققان نظیر حمیدی‌فر و همکاران (۱۳۸۹)، فرهودی و اسمیت، کاترجی و همکاران، دی و سرکار، خلیلی شایان و فرهودی و فرهودی و امین‌پور به بررسی تشابه پروفیل‌های آبخستگی پرداخته‌اند. مطابق گزارشات موجود اگر پروفیل‌های آبخستگی به صورت مناسب بی‌بعد شوند، شکل حفره از نظر هندسه مشابه و مستقل از زمان و اندازه ذرات رسوبی خواهد بود (Farhoudi and Smith, 1985; Chatterjee et al., 1994; Dey and Sarkar, 2006; Khalili shayan and Farhoudi, 2015; Aminpour and Farhoudi, 2017). برخی محققان دیگر نظیر درگاهی و ایوتو و همکاران هیچ‌گونه تشابهی بین نیمرخ‌های آبخستگی مشاهده نکردند (Dargahi, 2003; Oliveto et al., 2011).

بررسی توسعه آبخستگی موضعی با زمان از موارد دیگر مورد توجه محققین مختلف بوده است. برای اولین بار بروز رس تغییرات زمانی آبخستگی ایجادشده مصب رودخانه‌ها در اثر ایجاد جزر و مد را بررسی کرد و یک رابطه توانی برای تغییرات زمانی عمق آبخستگی ارائه کرد (Breusers, 1966). فرهودی و اسمیت آبخستگی موضعی پایین-دست سرریز اوجی شکل را مورد بررسی قرار دادند و فرم رابطه ارائه‌شده توسط بروز رس برای تأثیر مقیاس زمان بر حداکثر عمق آبخستگی را تأیید کردند (Farhoudi and Smith, 1985). کاترجی و همکاران پدیده آبخستگی و انتقال رسوب را در پایین‌دست دریاچه‌های کشویی مستغرق را بررسی کرده و نشان دادند که مشخصات آبخستگی را می‌توان به وسیله‌ی زمان تعادل، محل بیشترین عمق آبخستگی و فاصله‌ی نقطه‌ی بالای تلماسه از کف‌بند از انتهای حوضچه آرامش، بیان نمود. سپس رابطه‌ای برای تعیین حداکثر عمق آبخستگی در زمان تعادل و حجم آبخستگی با زمان به صورت رابطه توانی ارائه کردند (Chatterjee et al., 1994). درگاهی حفره‌ی آبخستگی را پایین یک حوضچه‌ی مستهلک کننده پایاب سرریزها بررسی کرد. وی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی خود نشان داد که بیشترین عمق آبخستگی و میزان انتقال رسوب را می‌توان با استفاده از روابط ساده‌ی توانی که هندسه‌ی آبخستگی را به پارامترهای کنترل‌کننده مرتبط می‌سازند، پیش‌بینی کرد (Dargahi, 2003). دی و سرکار توسعه حفره آبخستگی را با رسوبات غیر چسبنده و دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت بررسی کردند. آن‌ها تغییرات زمانی عمق آبخستگی در هر لحظه  $t$  نسبت به عمق آبخستگی پیشینه را به صورت یک مقیاس توانی بیان کرده و نشان دادند که مقیاس زمانی

را به عهده داشته باشد (Bijankhan and Kouchakzadeh, 2015). بهره‌برداری از دریچه‌های موازی به دلیل گرفتگی یا خراب بودن برخی از دریچه‌ها، سناریوهای مختلفی را در عمل می‌تواند به وجود بیاورد. سناریوهای مختلف بهره‌برداری از دریچه‌های موازی موجب به وجود آمدن جهش متقارن و نامتقارن می‌گردد. بیشتر مطالعات انجام‌شده بر روی دریچه‌های موازی در ارتباط با بررسی ضرایب آبدی دریچه‌ها و الگوی جهش هیدرولیکی نامتقارن بوده است. سویدا مطالعه گسترده‌ای در خصوص شرایط جریان در پایین-دست دریچه‌های موازی انجام داد. او با بررسی جریان‌های برگشتی و روبه‌جلو در پایین‌دست دریچه‌ها، به این نتیجه رسید که جریان برگشتی در حالت بهره‌برداری نامتقارن از دریچه‌ها وجود خواهد داشت (Saudia., 2013). سویدا واسنجی مجموعه دریچه‌های کشویی در شرایط جریان مستغرق را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد با ثابت ماندن سایر پارامترهای مؤثر، میزان آنگذری مجموعه دریچه‌ها در شرایط عملکرد نامتقارن دریچه‌ها نسبت به عملکرد متقارن افزایش یافت (Saudia., 2014). مطالعاتی نظیر بی-جن خان و کوچک‌زاده و اسکورزینی الگوی جهش هیدرولیکی و مشخصات جریان را در کانال‌های با بازشدگی ناگهانی مورد بررسی قرار داده و الگوی نامتقارن بودن جهش هیدرولیکی پایین‌دست را تأیید کردند (Bijankhan and Kouchakzadeh, 2015; Scorzini et al., 2016).

صفر زاده و طالاری (۱۳۹۶) ضمن بررسی علل تخریب حوضچه‌های پایین‌دست سد میل مغان متشکل از مجموعه دریچه‌های قطاعی موازی، بیان کردند بهره‌برداری نامتقارن دریچه‌ها باعث خروج پرش هیدرولیکی از حوضچه آرامش و تشدید شرایط نامطلوب در پایین‌دست سد می‌شود. بر این مبنا آنان پیشنهاد کردند بهره‌برداری از دریچه‌های موازی به صورت متقارن در دو وجه انجام شود. خلیلی شایان و همکاران (۱۳۹۹) طول جهش هیدرولیکی را در جریان‌های متقارن و نامتقارن را برای تعداد سه دریچه موازی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طول توسعه‌یافتگی جهش هیدرولیکی در حالت جریان نامتقارن بیشتر از جریان متقارن بوده و تابعی از طول دیواره‌های جداکننده و سناریوهای باز و بسته بودن دریچه‌ها می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان داد در حالت عملکرد صرف دریچه میانی و در شرایطی که طول دیواره‌های جداکننده از ۳۸ درصد طول پرش هیدرولیکی کلاسیک کمتر باشد، نبود تقارن پرش هیدرولیکی، تشدید می‌شود. در طول‌های کمتر دیواره‌های جداکننده، مقدار نبود تقارن پرش هیدرولیکی ناشی از عملکرد دریچه میانی نسبت به عملکرد دریچه کناری، بیشتر بوده که در نتیجه طول توسعه‌یافتگی بیشتر و عمق ثانویه کمتری را به دنبال دارد. با افزایش طول دیواره‌های جداکننده، طول توسعه‌یافتگی پرش هیدرولیکی ناشی از عملکرد دریچه کناری بیشتر شده و نسبت عمق‌های ثانویه کاهش

بازشدگی دریاچه‌ها و با تغییر عمق آب در بالادست دریاچه‌ها اتفاق افتاد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دستگاه دبی سنج صوتی مدل UFM610P ساخت شرکت Krohne با دقت  $\pm 2\%$  درصد مقدار اندازه‌گیری شده، در ورودی استفاده شد. به‌منظور برداشت توپوگرافی نهایی بستر از متر لیزری با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر استفاده گردید. شکل ۱ نمایی شماتیک از فلوام آزمایشگاهی و پلان از دریاچه‌های موازی و جدول ۱ سناریوهای باز و بسته بودن دریاچه‌های موازی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

برقراری شرایط هیدرولیکی نظیر عدد فرود موردنظر و عمق پایاب موردنیاز جهت برقراری جریان آزاد از دریاچه‌ها، با تنظیم دبی و سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها به‌صورت متقارن و نامتقارن انجام گردید. برای هر سناریو بازشدگی دریاچه‌ها، دبی به نوعی تنظیم شد که عمق لازم در بالادست دریاچه‌ها برای تنظیم عدد فرود موردنظر تأمین شود. به‌منظور کنترل آبشستگی ناخواسته در ورود اولیه جریان آب در جعبه رسوب، ابتدا کانال پر از آب شده و به آرامی سناریوی موردنظر تنظیم گردید. نیمرخ‌های آبشستگی در سناریوهای مختلف توسط دوربین عکاسی تراز شده حداقل در زمان‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ ساعت و در برخی موارد زمان ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت برداشت گردید. عکس‌های برداشت‌شده با استفاده از نرم‌افزار Grapher 18.1 رقومی سازی شد. برای هر یک از سناریوهای جدول ۱ آزمایش شاهد انجام شده و تعادل آبشستگی با زمان موردبررسی قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های شاهد ۱۲ ساعته، برای سناریوهای بازشدگی متقارن سه و دو دریاچه زمان آزمایش حداقل ۸ ساعت و برای سناریوهای بازشدگی متقارن دریاچه وسط و سناریوهای نامتقارن، زمان آزمایش حداقل ۶ ساعت به تعادل رسیدن حداکثر عمق آبشستگی به میزان بالای ۹۰ درصد حداکثر آبشستگی ممکن، ملاک ارزیابی قرار گرفت. عدم دستیابی به تعادل کامل دینامیکی بستر آبشستگی قبلاً توسط بالاچاندر و همکاران (۲۰۰۰)، در نتیجه آزمایش در مدت‌زمان ۹۶ ساعت گزارش شده است (Balachandar et al, 2000).

### تحلیل ابعادی

بعد از بررسی‌های صورت گرفته، پارامترهای مؤثر بر پدیده مکانیسم آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌های کشویی موازی عبارت‌اند از:

$$f(y_m, x_m, x_s, V) = f \left( \begin{matrix} y_1, y_2, y_t, v_1, g, b, \\ B, w, L, L_w, b_w, D_{50}, \\ \rho_s, \varphi, \sigma_g, C_u, F.S, \rho, \mu, t \end{matrix} \right) \quad (1)$$

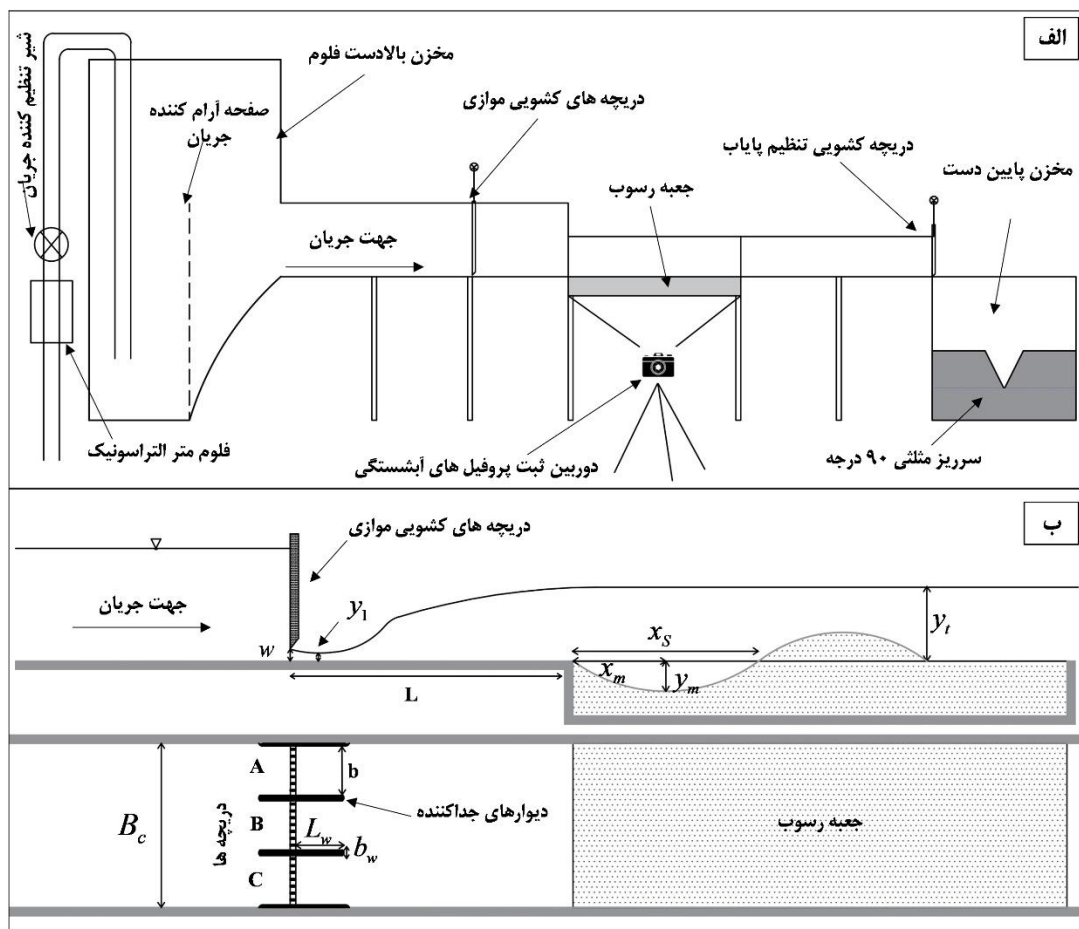
آبشستگی با افزایش عدد فرود ذرات به‌صورت خطی اضافه می‌شود (Dey and Sarkar, 2006). خلیلی شایان و فرهودی فرآیند توسعه زمانی آبشستگی موضعی در پایین‌دست دریاچه کشویی حوضچه آرامش افقی و شیب کف معکوس را موردبررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر شیب حوضچه آرامش بر ضریب و توان رابطه توانی مقیاس زمانی آبشستگی موردبررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش میزان شیب حوضچه آرامش، ضریب و توان رابطه توانی پیش‌بینی کننده عمق حفره با زمان کاهش می‌یابد (KhaliliShayan and Farhoudi, 2015). امین پور و فرهودی فرآیند توسعه زمانی آبشستگی موضعی در پایین‌دست حوضچه آرامش سرریز پلکانی را موردبررسی قرار دادند و ضرایب رابطه توانی بروز رس را واسنجی کردند. در بخش دیگر از تحقیق‌های صورت گرفته توسط محققین مختلف، تأثیر پارامترهای مختلف بر آبشستگی موضعی بررسی شده است (Aminpour and Farhoudi, 2017).

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر بهره‌برداری‌های مختلف از دریاچه‌های کشویی موازی بر آبشستگی موضعی پایاب حوضچه آرامش، عوامل نوع بهره‌برداری (متقارن یا نامتقارن)، بررسی اثر عرض نسبی (نسبت عرض دریاچه‌های باز به عرض کانال) و بررسی تأثیر طول دیوارهای جداکننده بر ابعاد و حجم آبشستگی موردبررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه اکثر تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با بررسی آبشستگی موضعی برای جت‌های متقارن بوده است، نتایج این تحقیق تفاوت سناریوهای بهره‌برداری دریاچه‌های موازی بر آبشستگی موضعی را نشان می‌دهد.

### مواد و روش‌ها

#### تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام کار

برای انجام آزمایش‌های موردنیاز این تحقیق، از فلوام آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه مدل فیزیکی دکتر فرهودی در گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه استفاده شده است. عرض کانال استفاده‌شده در این تحقیق برابر  $0.6$  متر و طول آن  $8$  متر می‌باشد. این فلوام دارای یک جعبه رسوب به طول  $1/8$  متر، عمق  $0.2$  سانتی‌متر و عرض  $0.6$  سانتی‌متر می‌باشد که در فاصله  $4$  متری از ابتدای فلوام جاگذاری شده است. به منظور بررسی تأثیر بهره‌برداری‌های مختلف از دریاچه‌های کشویی موازی بر آبشستگی موضعی پایاب حوضچه آرامش، عوامل نوع بهره‌برداری (متقارن یا نامتقارن)، سه عدد دریاچه کشویی با عرض برابر  $17$  سانتی‌متر ساخته‌شده و در فاصله  $1$  متر بالادست جعبه رسوب (طول حوضچه آرامش نوع اول USBR) جانمایی گردید. به‌منظور بررسی تأثیر دیوار جداکننده بر آبشستگی موضعی در پایاب دریاچه‌های کشویی از دیوارهای جداکننده به طول‌های  $10$ ،  $20$  و  $30$  سانتی‌متر استفاده گردید. در این تحقیق تغییر عدد فرود با ثابت ماندن



شکل ۱- (الف) نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی؛ (ب) پلان از دریچه های موازی

جدول ۱- سناریوهای باز و بسته بودن دریچه های موازی

عرض نسبی ( $e = b/B_c$ )	وضعیت جت پایین دست	سناریوی باز بودن دریچه ها	ردیف
۰/۸۵۰	مقارن	A+B+C	۱
۰/۵۶۷	مقارن	A+C	۲
۰/۲۸۳	مقارن	B	۳
۰/۵۶۷	نامقارن	A+B	۴
۰/۲۸۳	نامقارن	A	۵

رسوبی،  $\rho$  وزن مخصوص آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی آب،  $t$  زمان،  $y_m$  حداکثر عمق آبشستگی،  $x_m$  فاصله حداکثر عمق آبشستگی از حوضچه آرامش،  $x_s$  طول حفره آبشستگی و  $V$  حجم آبشستگی می باشد. با استفاده از نظریه پای-باکینگهام پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه ۲ تعریف شد.

که در آن،  $y_1$  عمق اولیه جهش،  $y_2$  عمق ثانویه جهش،  $y_t$  عمق پایاب،  $v_1$  سرعت در مقطع تنگ شدگی،  $g$  شتاب ثقل،  $b$  عرض دریچه ها،  $B$  عرض کانال،  $w$  باز شدگی دریچه یا دریچه ها،  $L$  طول حوضچه آرامش،  $L_w$  طول دیوار جداکننده،  $b_w$  عرض دیوار جداکننده،  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی،  $\rho_s$  جرم حجمی ذرات رسوبی،  $\phi$  زاویه ایستایی ذرات رسوبی،  $\sigma g$  انحراف معیار هندسی ذرات (رابطه ۳)،  $Cu$  ضریب یکنواختی ذرات (رابطه ۴)،  $F.S$  ضریب شکل ذرات

جدول ۳- محدوده داده‌های آزمایشگاهی

پارامتر	Fr <sub>1</sub>	b/B <sub>c</sub>	L <sub>w</sub> /L
دامنه تغییرات	۴/۵-۸/۶	۰/۲۸۳-۰/۸۵۰	۰/۱-۰/۳

### نتایج و بحث

#### بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ابعاد حفره آبستنگی

با توجه به نتایج شکل ۲ یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در آبستنگی پایین دست دریچه‌های موازی، نحوه بهره‌برداری از دریچه‌ها می‌باشد. به منظور شرح تأثیر بهره‌برداری‌های مختلف از دریچه‌های کشویی موازی بر آبستنگی موضعی پایاب حوضچه آرامش، عوامل نوع بهره‌برداری (مقارن یا نامقارن)، بررسی اثر نسبت تنگ‌شدگی- $(e=b/B_c)$  و بررسی تأثیر طول دیوارهای جداکننده بر ابعاد و حجم آبستنگی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر عرض نسبی- $(e=b/B_c)$ ، آزمایش‌های مورد نظر برای بهره‌برداری‌های مختلف در نسبت طول دیواره جداکننده به طول حوضچه آرامش برابر ۰/۱ انجام گردید ( $L_w/L=0/1$ ). به منظور تعیین بهترین و بدترین بهره‌برداری‌های ممکن از دریچه‌ها، نتایج آبستنگی بهره‌برداری مختلف با حالت ایده-آل طراحی حوضچه آرامش (سناریوی ABC) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمایشگاهی (شکل ۲) در سناریوهای بهره-برداری متقارن (ABC, AC و B) و نامتقارن (A و B)، با کاهش نسبت عرض دریچه‌های باز به عرض کانال (e) مقدار حداکثر عمق آبستنگی افزایش پیدا می‌کند که آهنگ این افزایش در سناریوی B نسبت به دیگر سناریوها شدیدتر می‌باشد. حداکثر آبستنگی ممکن در سناریوهای A و B به‌طور میانگین در بازه عدد فرود مورد مطالعه (۴/۵ تا ۸/۶)، با ثابت بودن تمامی پارامترهای دیگر، به ترتیب ۶۶/۷ و ۱۵۶/۷ درصد بیشتر نسبت به سناریوی ABC حاصل شد. در شرایط عملکرد یک دریچه از چند دریچه و به‌ویژه شرایط عملکرد صرف دریچه کناری (سناریوی A) یا دریچه میانی (سناریوی B)، میدانی از جریان‌های برگشتی و ترکیب آن با جریان‌های رو به جلو در مقطع پایاب حوضچه آرامش شکل می‌گیرد که نتیجه آن توسعه حفره آبستنگی موضعی با ابعاد قابل توجه در مقایسه با ابعاد حفره آبستنگی ناشی از پرش هیدرولیکی کلاسیک (سناریوی ABC) می‌باشد. تفاوت‌های موجود در حداکثر عمق آبستنگی (شکل ۲-الف) در سناریوهای مختلف بهره‌برداری از دریچه‌های موازی، می‌تواند با تفاوت‌های موجود در توسعه جهش هیدرولیکی قابل بیان باشد. الگو-های مختلف توسعه جهش هیدرولیکی در پایاب دریچه‌های کشویی موجب توسعه حفره آبستنگی با عمق و ابعاد (شکل ۲-ب و ۲-ج) مختلف گردیده است که در نتیجه حجم انتقال رسوب (شکل ۲-د) در سناریوهای A, B و AB بیشتر از سناریوی ABC می‌باشد. سناریوی B با توجه به حداکثر بودن عمق و حجم آبستنگی و همچنین

$$f \left( \frac{y_1}{w}, \frac{y_2}{w}, \frac{y_t}{w}, \frac{b}{B}, \frac{L_w}{L}, \frac{y_m}{w}, \frac{X_m}{w}, \frac{X_s}{w}, Fr_1, Re, \frac{t}{t_0}, \frac{V}{B_c w^2}, \frac{D_{50}}{w}, \frac{\rho_s}{\rho}, \varphi, \sigma_g, Cu, FS \right) = 0 \quad (2)$$

جدول ۲ توزیع اندازه ذرات رسوب مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات رادکیوی نشان داد، اگر انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma_g$ ) از ۱/۳ کوچک‌تر باشد، اثر غیریکنواختی دانه‌ها در آبستنگی ناچیز است. همچنین بر اساس تحقیقات داس اگر ضریب یکنواختی ذرات (Cu) کوچک‌تر از ۴ باشد نشان از یکنواختی ذرات رسوب است (Raudkivi, 1998; Das, 1983).

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84.1}}{D_{15.9}}} \quad (3)$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

جدول ۲- مشخصات رسوب استفاده شده در آزمایش‌ها

Cu	$\sigma_g$	D <sub>84</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>15.9</sub>	D <sub>10</sub>
۱/۶۲	۱/۲۹	۱/۷۴	۱/۵۴	۱/۴	۱/۲۲	۱/۰۵	۰/۹۵

با توجه به جدول ۲ و یکنواختی توزیع ذرات، از اثر شکل ذرات رسوبی و به ثابت بودن برخی از پارامترها نظیر زاویه استایی رسوبات، قطر متوسط ذرات و جرم حجمی ذرات، می‌توان از چنین پارامترهایی صرف نظر کرد.

آزمایش‌ها برای شرایطی از عمق پایاب انجام شد که جریان خروجی از دریچه یا دریچه‌ها به‌صورت جریان آزاد باشد، بنابراین پارامتر عمق پایاب نیز از تحلیل‌ها حذف گردید. علاوه بر آن جریان در تمامی آزمایش‌ها، متلاطم کامل بود و از تأثیر عدد رینولدز نیز چشم‌پوشی شد. بعد از حذف پارامترهای ثابت و ساده‌سازی، پارامترهای بدون بعد با استفاده از نظریه پای-باکینگهام به‌صورت رابطه ۵ تعریف می‌گردد.

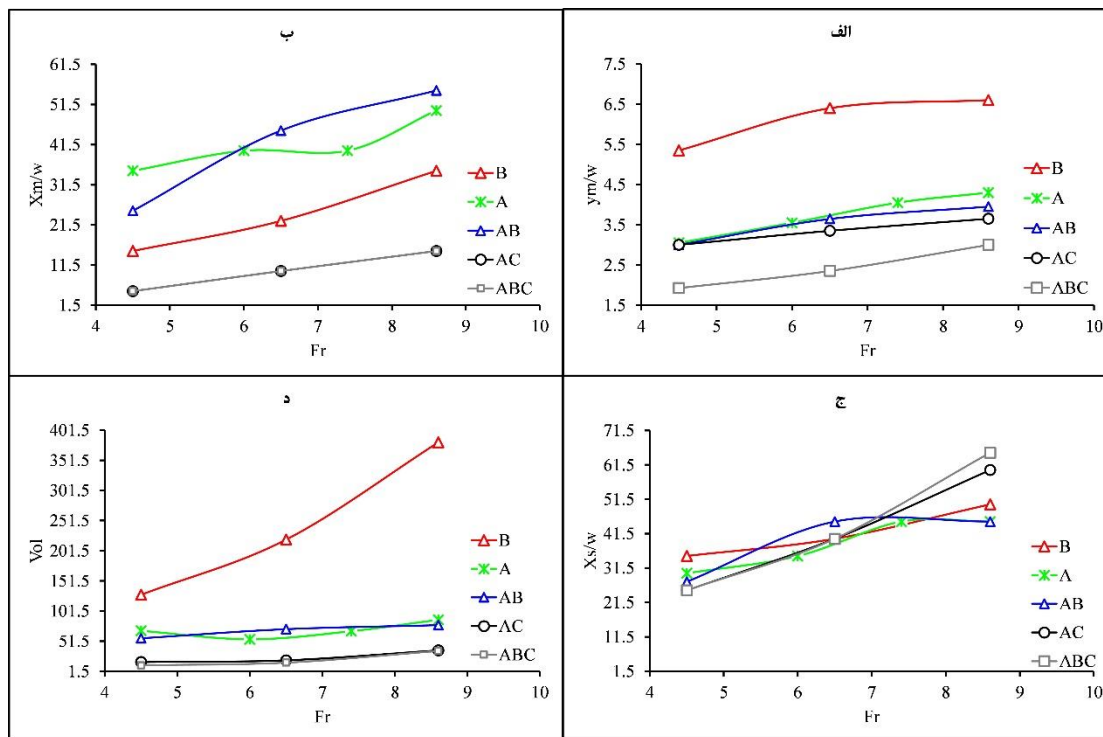
با توجه به تحلیل آزمایش‌ها در زمان توسعه آبستنگی، پارامتر زمان از بررسی‌ها حذف گردید.

$$\frac{y_m}{w}, \frac{x_m}{w}, \frac{x_s}{w}, \frac{V}{B_c w^2} = f \left( Fr_1, \frac{b}{B_c}, \frac{L_w}{L} \right) \quad (5)$$

در ادامه عبارت  $V/B_c w^2$  به اختصار Vol در نظر گرفته شده است. محدوده داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ آورده شده است.

می‌تواند با توجه به نتایج تحقیق خلیلی شایان و همکاران (۱۳۹۹)، افزایش عدم تقارن پرش هیدرولیکی ناشی از عملکرد دریاچه میانی نسبت به سناریوهای دیگر باشد.

نزدیک‌تر بودن حداکثر عمق آبستگي به حوضچه آرامش، بحرانی-ترین سناریو ممکن در شرایط ثابت بودن شرایط پارامترهای دیگر مؤثر بر آبستگي، نسبت به دیگر سناریوها می‌باشد. دلیل این امر



شکل ۲- نمودارهای تغییرات ابعاد حفره آبستگي و حجم آن با تغییر عرض نسبی (e=b/Bc) در بهره‌برداری‌های متقارن و نامتقارن برای  $L_w/L=0.1$

رسوب انتقالی می‌گردد. جدول ۴ نتایج بررسی اثر طول دیوارهای جداکننده در بهره‌برداری‌های مختلف متقارن و نامتقارن، به‌صورت درصد کاهش یا افزایش حداکثر عمق آبستگي و حجم حفره آبستگي نسبت به سناریوی ABC را نشان می‌دهد. سناریوهای بحرانی بهره‌برداری متقارن و نامتقارن از دریاچه‌ها در آبستگي موضعی پایاب دریاچه‌های کشویی به ترتیب سناریوی B و A می‌باشد. استفاده از دریاچه میانی (سناریوی B) با نسبت طول دیوار جداکننده  $L_w/L=0.1$  موجب افزایش ۱۲۰ درصدی حداکثر عمق آبستگي نسبت به نتایج آبستگي بهره‌برداری دریاچه‌ها در حالت ایده‌آل طراحی حوضچه آرامش (سناریوی ABC) در عدد فرود حداکثر (۸/۶) گردید. با افزایش طول دیوارهای جداکننده (۸/۳)  $(L_w/L=0.1)$  حداکثر عمق آبستگي ۶۸ درصد کاهش پیدا کرد. از طرفی در عدد فرود حداقل (۴/۵) در  $L_w/L=0.1$  حداکثر عمق آبستگي ۱۷۸ درصد بیشتر از حداکثر عمق آبستگي در سناریوی ABC به‌دست‌آمده و افزایش ۲۰ درصدی طول دیوارهای جداکننده موجب کاهش ۱۲۲ درصدی حداکثر عمق آبستگي گردید. استفاده از دریاچه کناری (سناریوی A) با نسبت طول دیوار جداکننده  $L_w/L=0.1$

یکی از تفاوت‌های موجود در الگوی جریان جهش متقارن و جهش نامتقارن ایجادشده در پایاب دریاچه‌های کشویی موازی، وجود جریان‌های روبه‌جلو در پایین‌دست دریاچه‌های باز و وجود ناحیه مردگی جریان در پایین‌دست دریاچه‌های بسته می‌باشد. همچنین وجود جریان‌های برگشتی در پایین‌دست دریاچه‌های بسته می‌باشد که این عامل موجب به وجود آمدن جریان‌های گردابی می‌گردد. این الگوهای جریان در مطالعات بی جن خان و همکاران، سویدا و مصطفی و همکاران تأیید شده است (Bijankhan et al., 2014; Sauida, 2014; Mostafa et al., 2009).

جهت افزایش تقارن جهش هیدرولیکی و کاهش جریان‌های برگشتی طول دیوارهای جداکننده افزایش داده شده و اثر افزایش طول دیوارهای جداکننده بر آبستگي موضعی موردبررسی قرار گرفت. شکل‌های ۳ تا ۶ نتایج تغییرات پارامترهای ابعاد حفره آبستگي در بازه عدد فرود  $Fr \leq 4/5$  برای تغییرات طول دیوار-های جداکننده به طول حوضچه آرامش را نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها افزایش طول دیوارهای جداکننده به ازای ثابت بودن دیگر پارامترهای آزمایش، موجب کاهش ابعاد حفره آبستگي و حجم

های بزرگ، طراحی عمق پی سازه بر اساس حداکثر آبستنگی ممکن بوده که در نتیجه آن پایداری سازه تأمین می‌گردد. به‌منظور تعیین ابعاد حفره آبستنگی با استفاده از تحلیل رگرسیونی، روابط در دو بخش بهره‌برداری متقارن و نامتقارن از دریچه‌های کشویی موازی جهت تخمین حداکثر عمق آبستنگی، فاصله حداکثر عمق آبستنگی تا انتهای حوضچه، طول حفره و حجم رسوب انتقال یافته در زمان تعادل ارائه شد. روابط رگرسیونی شماره ۶ تا ۹ برای بهره‌برداری متقارن از دریچه‌ها واسنجی گردیده است. شکل ۷ جهت ارزیابی دقت روابط ۶ تا ۹ برای بهره‌برداری متقارن از دریچه‌های موازی کشویی روابط ارائه شده است.

$$\frac{y_m}{w} = 0.560 (Fr)^{0.444} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{-0.686} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.293} \quad (۶)$$

$$\frac{X_m}{w} = 0.117 (Fr)^{1.446} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{-0.790} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.670} \quad (۷)$$

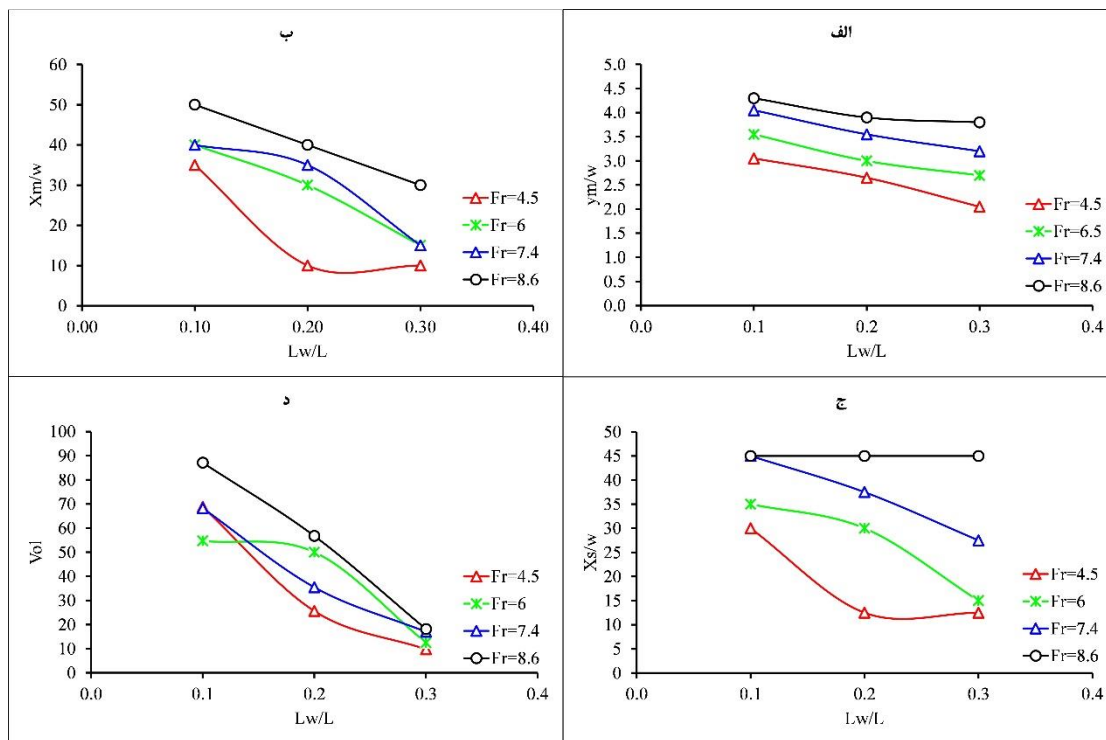
$$\frac{X_s}{w} = 2.619 (Fr)^{1.257} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{0.205} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.241} \quad (۸)$$

$$Vol = \frac{V}{B_c w^2} = 0.034 (Fr)^{1.661} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{-3.064} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.805} \quad (۹)$$

موجب افزایش ۴۳ درصدی حداکثر عمق آبستنگی نسبت به نتایج آبستنگی بهره‌برداری دریچه‌ها در حالت ایده‌آل طراحی حوضچه آرامش (سناریوی ABC) در عدد فرود حداکثر (۸/۶) گردید. با افزایش طول دیوارهای جداکننده ( $L_w/L=0.3$ ) حداکثر عمق آبستنگی ۱۷ درصد کاهش پیدا کرد. از طرفی در عدد فرود حداقل (۴/۵) در  $L_w/L=0.1$  حداکثر عمق آبستنگی ۵۸ درصد بیشتر از حداکثر عمق آبستنگی در سناریوی ABC به دست آمد. با افزایش طول دیوارهای جداکننده ( $L_w/L=0.3$ ) حداکثر عمق آبستنگی ۵۲ درصد کاهش پیدا کرد. با توجه بحرانی‌ترین سناریو بهره‌برداری از دریچه‌های کشویی موازی استفاده از دریچه میانی می‌باشد (جدول ۴). به‌صورت کلی می‌توان گفت، با کاهش ضریب عرض نسبی، کارایی دیوارهای جداکننده در کنترل آبستنگی کاهش یافت. تأثیر افزایش طول دیوارهای جداکننده در کنترل آبستنگی موضعی اضافی ناشی از بهره‌برداری‌های مختلف دریچه‌های موازی در عدد فرود پایین بیشتر از عدد فرود بالا می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده یکی از راه‌های مناسب کنترل جهش هیدرولیکی و به تبع آن کنترل آبستنگی ناشی از بهره‌برداری‌های مختلف دریچه‌های موازی، استفاده از دیوارهای جداکننده می‌باشد.

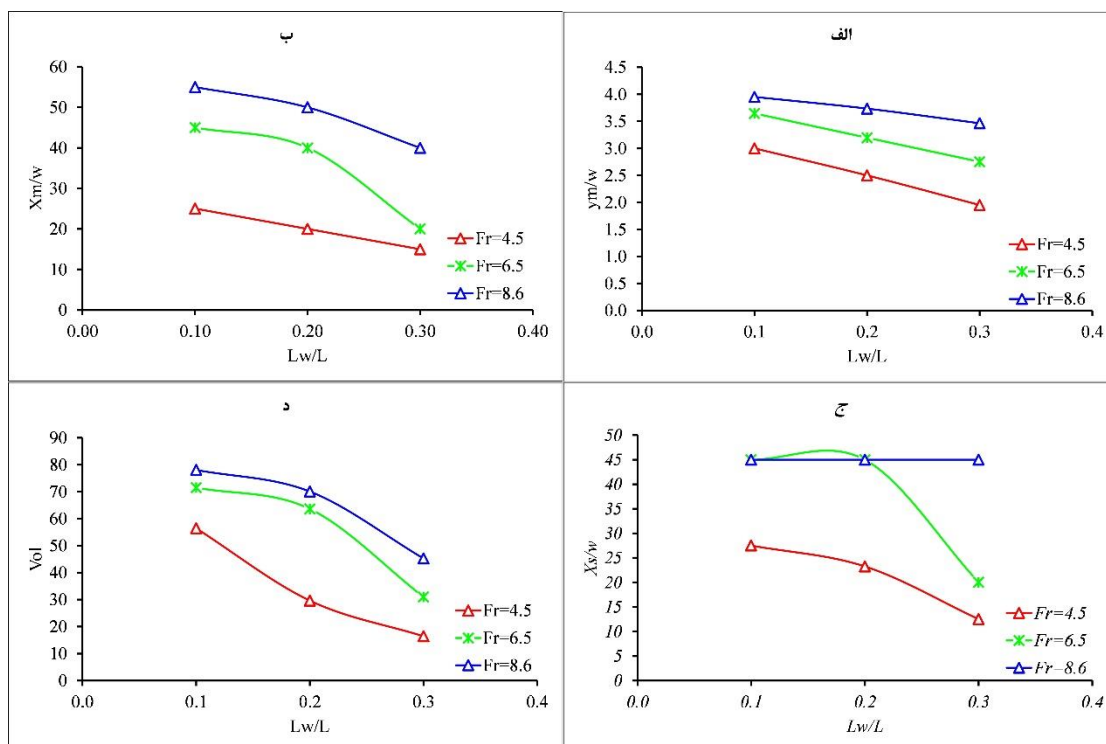
### تعیین ابعاد حفره آبستنگی

یکی از کاربردهای تخمین ابعاد حفره آبستنگی حاصل از سیلاب

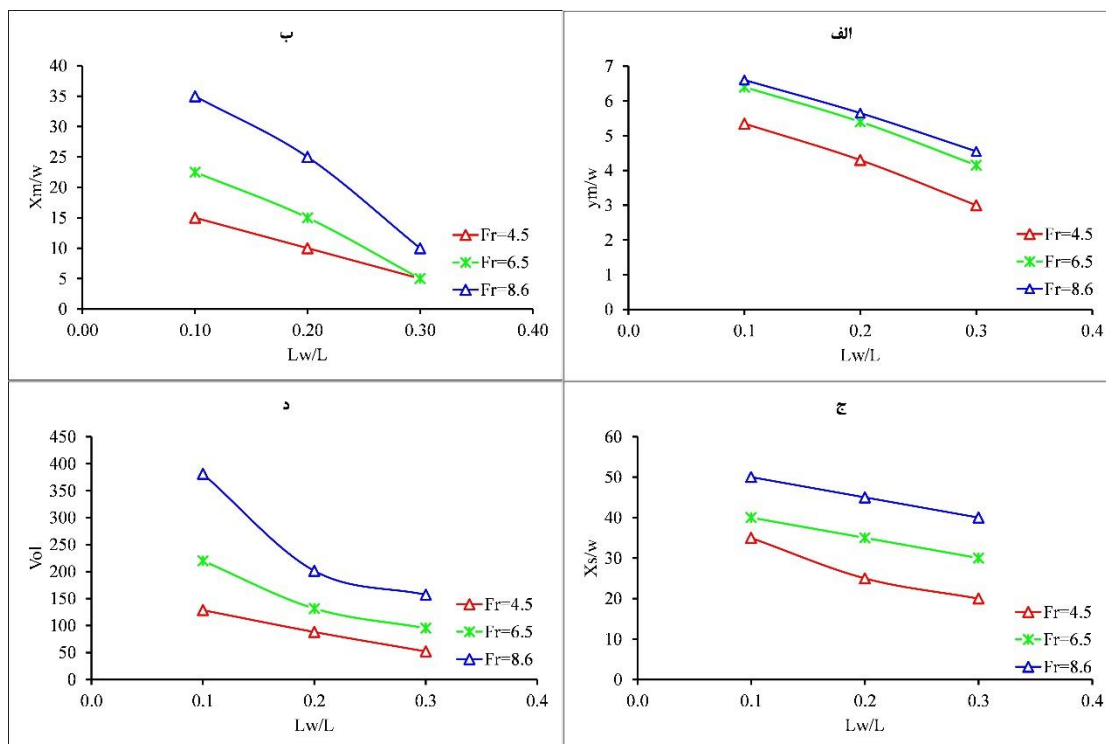


شکل ۳- تغییرات ابعاد حفره آبستنگی و حجم آن در سناریوی بهره‌برداری A



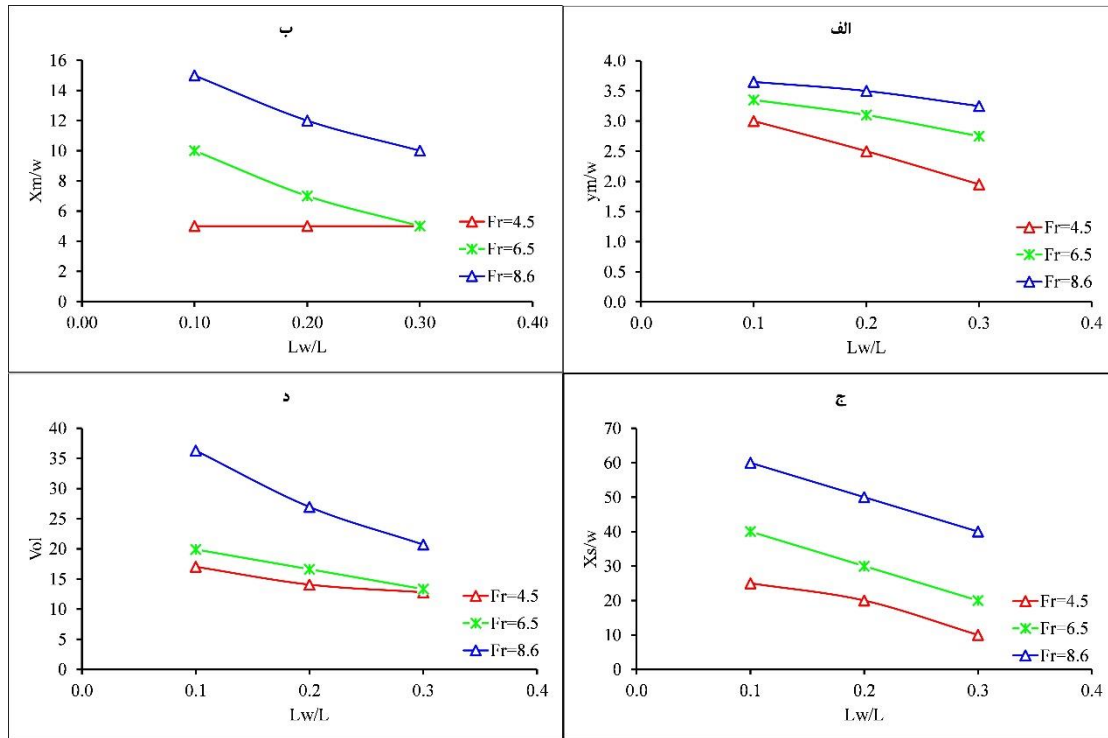


شکل ۴- تغییرات ابعاد حفره آبشستگی و حجم آن در سناریوی بهره‌برداری AB



شکل ۵- تغییرات ابعاد حفره آبشستگی و حجم آن در سناریوی بهره‌برداری B





شکل ۶- تغییرات ابعاد حفره آبشستگی و حجم آن در سناریوی بهره‌برداری AC

جدول ۴- بررسی اثر طول دیوارهای جداکننده بر حداکثر عمق آبشستگی و حجم آبشستگی (%)

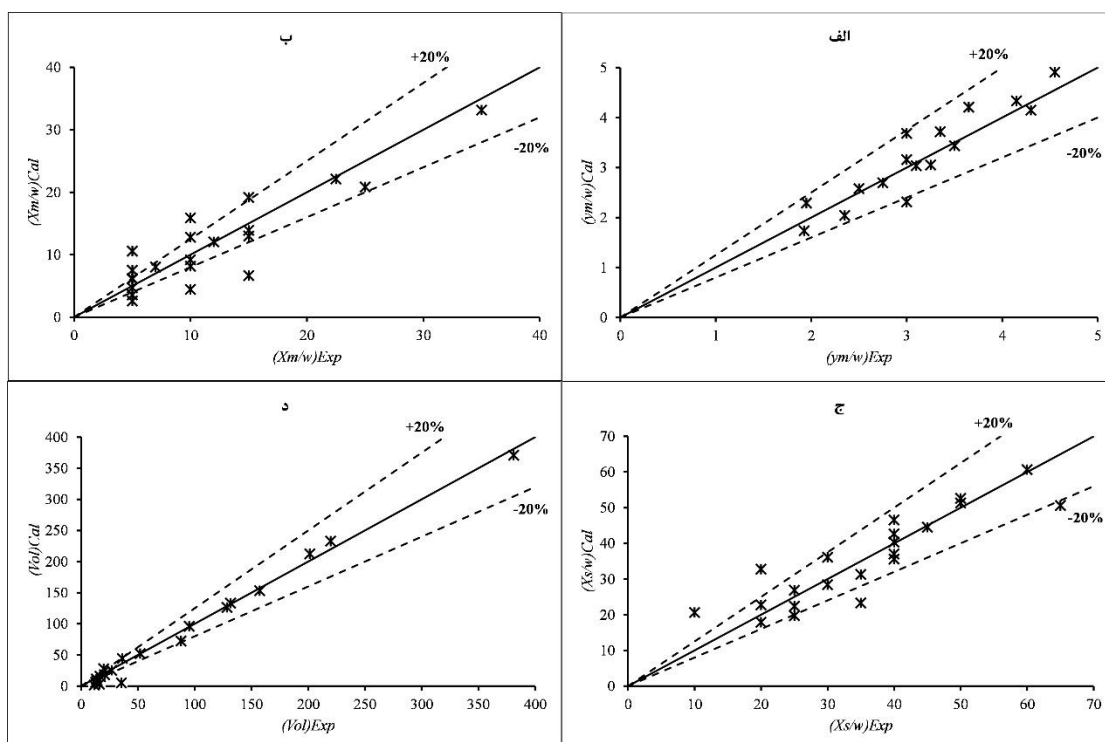
Fr=ξ/ο	Fr=λ/ϕ	[(y <sub>m</sub> ) <sub>x</sub> - (y <sub>m</sub> ) <sub>ABC</sub> / (y <sub>m</sub> ) <sub>ABC</sub> ] × 100		L <sub>w</sub> /L	b/B <sub>c</sub>	سناریوهای بهره‌برداری
		Fr=ξ/ο	Fr=λ/ϕ			
۴۹۱/۷	۱۴۵/۴	۵۸/۴	۴۳/۳	۰/۱		
۱۲۰/۳	۵۹/۹	۳۷/۷	۳۰/۰	۰/۲	۰/۲۸۳	A
۱۶/۰	۴۸/۹	۶/۵	۲۶/۷	۰/۳		
۱۰۰۶/۰	۹۷۴/۳	۱۷۸	۱۲۰	۰/۱		
۶۵۷/۲	۴۶۷/۷	۱۳۳	۸۸	۰/۲	۰/۲۸۳	B
۳۴۷/۸	۳۴۳/۱	۵۶	۵۲	۰/۳		
۳۸۵/۱	۱۲۰/۰	۵۵/۸	۳۱/۷	۰/۱		
۱۵۴/۸	۹۷/۵	۲۹/۹	۲۴/۵	۰/۲	۰/۵۶۷	AB
۴۱/۳	۲۷/۵	۱/۳	۱۵/۵	۰/۳		
۴۶/۴	۲/۳	۵۵/۸	۲۱/۷	۰/۱		
۲۱/۰	-۲۴/۱	۲۹/۹	۱۶/۷	۰/۲	۰/۵۶۷	AC
۱۰/۱	-۴۱/۷	۱/۳	۸/۳	۰/۳		

همچنین روابط رگرسیونی شماره ۱۰ تا ۱۳ برای بهره‌برداری نامتقارن از دریاچه‌ها واسنجی گردید. شکل ۸ جهت ارزیابی دقت روابط برای بهره‌برداری نامتقارن از دریاچه‌های موازی کشویی روابط ارائه شده است.

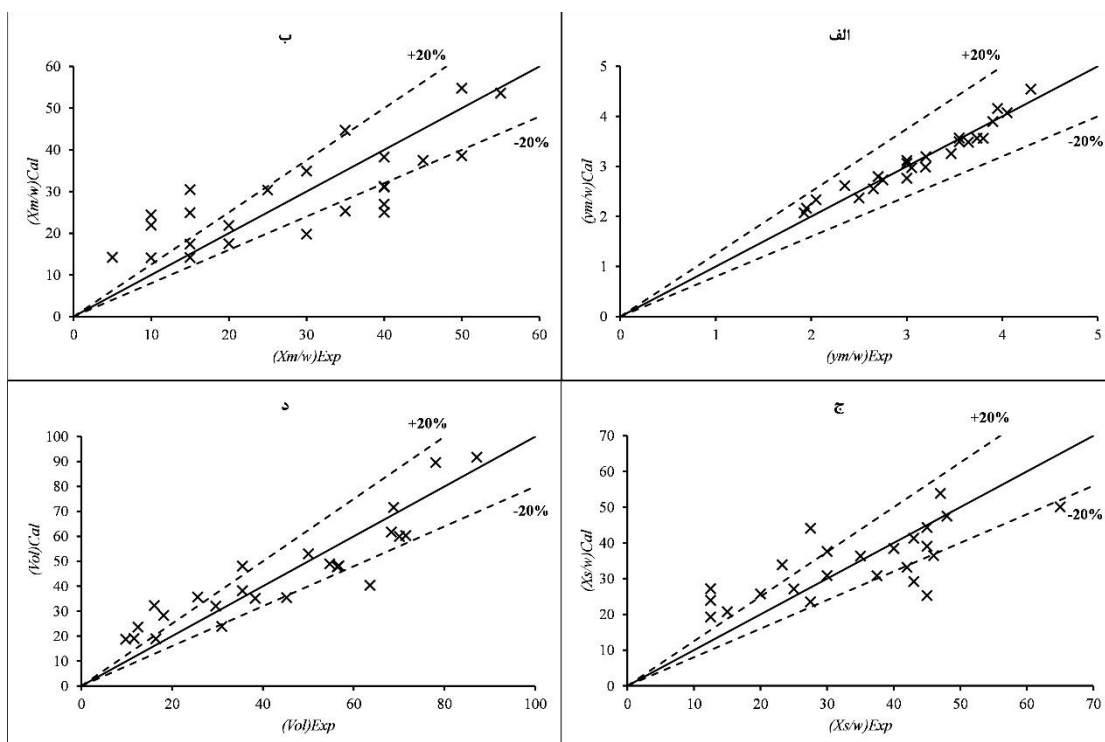
$$\frac{X_m}{w} = 1.305 (Fr)^{1.176} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{0.008} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.517} \quad (11)$$

$$\frac{X_s}{w} = 5.542 (Fr)^{0.945} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{0.312} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.181} \quad (12)$$

$$\frac{y_m}{w} = 0.604 (Fr)^{0.631} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{-0.107} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.222} \quad (10)$$



شکل ۷- ارزیابی دقت روابط تخمین ابعاد حفره آبستگي در بهره‌برداري متقارن (الف-رابطه ۶، ب-رابطه ۷، ج-رابطه ۸ و د-رابطه ۹)



شکل ۸- ارزیابی دقت روابط تخمین ابعاد حفره آبستگي در بهره‌برداري نامتقارن (الف-رابطه ۱۰، ب-رابطه ۱۱، ج-رابطه ۱۲ و د-رابطه ۱۳)

جدول ۵- بررسی روابط ارائه‌شده جهت تخمین ابعاد حفره آبستنگی با پارامترهای آماری

رابطه ۱۲	رابطه ۱۱	رابطه ۱۰	رابطه ۹	رابطه ۸	رابطه ۷	رابطه ۶	رابطه ۵	پارامترهای آماری
۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۹	۰/۹۸	۰/۷۹	۰/۸	۰/۹۴	R <sup>2</sup>
۲۹/۴	۲۸/۷	۴۱/۶	۴/۸	۲۳/۱۲	۱۷/۹۷	۲۸/۶۸	۸/۳۲	MARE
۲۳/۲	۱۹/۷	۱۵/۵	۰/۳	۳۰/۲۰	۱۴/۴۱	۸/۳۳	۰/۶۹	ME

(ABC، AC و B) و نامتقارن (AB و A)، با کاهش نسبت عرض دریچه‌های باز به عرض کانال، مقدار حداکثر عمق آبستنگی افزایش پیدا می‌کند که آهنگ این افزایش در سناریوی B نسبت به دیگر سناریوها شدیدتر می‌باشد.

در تحقیق حاضر طول دیوارهای جداکننده به‌عنوان یک پارامتر متغیر جهت کنترل ابعاد حفره آبستنگی موضعی اضافی نسبت به سناریو ABC استفاده گردید. نتایج نشان داد که طول دیوارهای جداکننده یک پارامتر مهم و تأثیرگذار در توسعه ابعاد حفره آبستنگی موضعی در سناریوهای بهره‌برداری مختلف از دریچه‌های موازی می‌باشد. با افزایش طول دیوارهای جداکننده ابعاد حفره آبستنگی در سناریوهای مختلف کاهش پیدا کرد. تأثیر طول دیوارهای جداکننده پایین‌دست دریچه‌های کشویی موازی در کنترل ابعاد حفره آبستنگی موضعی اضافی ناشی از بهره‌برداری‌های مختلف دریچه‌های کشویی موازی در ضریب عرض نسبی ۰/۵۶۷ (سناریوهای بهره‌برداری متقارن AC و بهره‌برداری نامتقارن AB) بیشتر از ضریب عرض نسبی برابر با ۰/۲۸۳ (سناریوهای بهره‌برداری متقارن B و بهره‌برداری نامتقارن A) می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که بحرانی‌ترین سناریوهای ممکن از نظر توسعه حفره ابعاد حفره آبستنگی، سناریوی B در بهره‌برداری متقارن و سناریوی A در بهره‌برداری نامتقارن می‌باشد که بحرانی‌ترین آن سناریوی B است. با توجه به نتایج حاصل‌شده می‌توان گفت یکی از عوامل تخریب حوضچه‌های آرامش و اختلاط‌های موجود در برآورد آبستنگی موضعی در طراحی و بهره‌برداری، تفاوت‌های موجود در نحوه طراحی این سازه‌ها با جهش کلاسیک متقارن و بهره‌برداری‌های مختلف از دریچه‌های موازی می‌باشد.

### منابع

حمیدی‌فر، ح.، امید، م.ح. و نصرآبادی، م. ۱۳۸۹. آبستنگی موضعی در پایین‌دست دریچه کشویی. نشریه آب و خاک. ۳۴(۴): ۷۳۶-

۷۲۸

صفر زاده، ا.، و باهر طالاری، ط. ۱۳۹۶. بررسی علل تخریب حوضچه‌های پایین‌دست سد میل مغان با استفاده از مدل‌سازی هیدرودینامیک محاسباتی. نشریه هیدرولیک. ۱۱۲(۲): ۱۳-۳۴.

$$Vol = \frac{V}{B_c w^2} = 1.108 (Fr)^{1.433} \left(\frac{b}{B_c}\right)^{0.013} \left(\frac{L_w}{L}\right)^{-0.571} \quad (13)$$

به‌منظور ارزیابی دقت روابط ارائه‌شده از پارامترهای مختلف آماری نظیر، متوسط خطای نسبی (MARE)، حداکثر خطا (ME) و ضریب همبستگی استفاده شد.

$$MARE = 100 \times ABS \left[ \frac{X_{(exp)} - X_{(cal)}}{X_{(exp)}} \right] \quad (14)$$

$$ME = Max [X_{(exp)} - X_{(cal)}] \quad (15)$$

که در آن‌ها X(cal) عبارت از داده محاسبه‌شده از روابط پیشنهادی، X(exp) داده متناظر آزمایشگاهی می‌باشد.

نتایج پارامترهای آماری نشان داد که در بهره‌برداری از دریچه‌های موازی دقت و صحت روابط توسعه داده‌شده جهت تخمین ابعاد حفره آبستنگی برای تخمین پارامتر حداکثر عمق آبستنگی بیشتر از سایر ابعاد حفره آبستنگی می‌باشد. دلیل این امر، تفاوت‌های زیاد رفتار بهره‌برداری‌های مختلف از دریچه‌های موازی در تغییرات ابعاد حفره بخصوص توسعه ابعاد آن در راستای طولی پایاب حوضچه آرامش می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر سناریوهای مختلف بهره‌برداری در توسعه آبستنگی موضعی پایاب حوضچه آرامش دریچه‌های موازی موردبررسی قرار گرفت. بهره‌برداری از دریچه‌ها تحت شرایط‌های مختلف مانند گرفتگی یا خراب بودن آن‌ها ممکن است به‌صورت متقارن یا نامتقارن انجام شود. نتایج تحقیق نشان داد که ابعاد حفره آبستنگی موضعی در پایین‌دست حوضچه آرامش به‌شدت متأثر از نحوه بهره‌برداری از دریچه‌های موازی می‌باشد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، آبستنگی موضعی پایاب حوضچه، تابعی از عدد فرود، عرض نسبی (نسبت عرض دریچه‌های باز به عرض کانال) و طول دیوارهای جداکننده می‌باشد. با افزایش عدد فرود در تمامی سناریوهای بهره‌برداری ابعاد حفره آبستنگی افزایش می‌یابد. در سناریوهای بهره‌برداری متقارن

- spillway. *J. of Hydraulic Res*, 41: 417-426.
- Dey, S. and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(3):246257.
- Farhoudi, J, Smith, KVH. 1982. Time scale for scour downstream of hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 10: 1147-1162.
- Gamal, M. Mostafa, Abdelazim, M. Negm, Osama, K. Saleh and Mohamed F. Sauida. 2009. Flow separation downstream of main barrages. 6 th int. conference on environmental hydrology and 1 st symp coastal and port engineering.
- Oliveto G. Comuniello V. and Balbule T. 2011. Time-dependent local scour downstream of positive-step stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*. 49(1):105-112.
- Raudkivi, A. J. 1998. *Loose boundary hydraulics*. A. A, Balkema. Rotterdam. The Netherlands. 498 p.
- Sauida, M.F., 2013. Reverse flow downstream multi-vent regulators. *Ain Shams Engineering Journal*. 4(2): 207-214.
- Sauida, M.F. 2014. Calibration of submerged multi-sluice gates. *Alexandria Engineering Journal*. 53(3): 663-668.
- Shayan, H.K. and Farhoudi, J. 2015. Local scour profiles downstream of adverse stilling basins. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*. 22(1):1-14
- Scorzini, A.R., Di Bacco, M. and Leopardi, M. 2016. Experimental investigation on a system of crossbeams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2): 06015018.
- خلیلی شایان، ح، فرهودی، ج. و وطن خواه، ع.، ۱۳۹۹. تحلیل نسبت عمق های ثانویه و طول پرش هیدرولیکی واگرایی ناگهانی در شرایط توسعه یافتگی متقارن و نامتقارن. نشریه هیدرولیک. ۹۵-۷۵: (۱)۱۵
- Aminpour, Y., Farhoudi, J. and Shayan, H. 2018. Characteristics and time scale of local scour downstream stepped spillways. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*. 25(2): 532-542.
- Breusers, H. N. C. 1966. Conformity and time scale in two-dimensional local scour. In: *Proceedings of the symposium on model and prototype conformity*. Hydraulics Research Laboratory, Poona, India; 1-8.
- Balachandar, R., Kells, J.A. and Thiessen, R.J. 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27(1):138-150.
- Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S. and Belaud, G. 2014. Parallel jets emerging from multiple gates, distinguishing flow condition. 5<sup>th</sup> international junior researcher and engineer workshop on hydraulic structures.
- Bijankhan, M. and Kouchakzadeh, S. 2015. Free hydraulic jump due to parallel jets. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 141(2): 04014049.
- Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N., & Chatterjee, M. 1994. Local scour due to submerged horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(8): 973-992.
- Das B. M. 1983. *Advance Soil Mechanics*. Hemisphere Publishing Corporation . Washington. 511 p.
- Dargahi, B. 2003. Scour development downstream of a

## Investigation of Local Scour Downstream of the Parallel Sluice Gates

B. Mahmoudi<sup>1</sup>, M. Hemmati<sup>2\*</sup>, M. Yasi<sup>3</sup>, S. A. Hamidi<sup>4</sup>

Received: Jul.26, 2021

Accepted: Jul.06, 2021

### Abstract

Local scour downstream of the hydraulic structures is of great importance. In wide channels, a set of multi gates instead of a single gate may be responsible for transferring water and adjusting upstream water level due to difficulty in gate maneuvering, economic considerations, and ease of movement. Operating parallel sluice gates can create different scenarios owing to clogging or failure in some gates. This study was aimed to assess the effect of different cases of parallel sluice gates operational management, gate opening to channel width ratio, and length of the separator walls on local scour development downstream of parallel sluice gates in different operations. Five operational scenarios were investigated on three parallel sluice gates. The results of the present study showed that the dimensions of the scour hole are a function of the symmetrical and asymmetrical operation of the gates. By reducing the gate opening to channel width ratio, the dimensions of the scour hole increased compared to the classical hydraulic jump mode. Maximum scour depth in the symmetric operational management scenario (B) and the asymmetric scenario (A), increased by 120% and 43%, respectively, compared to the ABC scenario. Increasing the length of the separating walls can be a suitable option to control the dimensions of the scour hole in different operations. Owing to a 20% increase in the length of the separator walls, the maximum scour depth decreased by 68% in the maximum Froude number (8.6) and 122% in the minimum Froude number (4.5) in scenario B. These percentages for scenario A are equal to 17 and 58, respectively. In addition, relations were presented to estimate the dimensions of scour hole in the symmetrical and asymmetrical operation of the parallel gates.

**Keywords:** Local Scour, Maximum Scour Depth, Parallel Gates, Separator Walls, Sluice Gate

1 -Ph.D. Candidate, Department of water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2 -Associate Professor, Department of water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3 - Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4 - Associate Professor, Department of Physics and Engineering, College of Health, Engineering and Science, Slippery Rock University, Pennsylvania, USA

(\*-Corresponding Author Email: m.hemmati@urmia.ac.ir)