

## بررسی آزمایشگاهی اثر جانمایی حفره‌های متوالی برداشت مصالح رودخانه‌ای بر رسوبگذاری درون حفره‌ها

حامد حق‌نظر<sup>۱</sup>، رامین امینی<sup>۲</sup> و مجتبی صانعی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، <sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود و <sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۹

### چکیده

بررسی نحوه برداشت‌ها، حجم و میزان برداشت مصالح شن و ماسه از بستر و حاشیه رودخانه‌ها نشان می‌دهد که مشکلات متعدد و فراوانی به لحاظ تغییر شکل هندسی و طبیعی رودخانه‌ها، افزایش طغیان آب و سیلابی شدن رودخانه‌ها و همچنین، خطرات زیست محیطی و اکولوژیکی به وجود خواهند آورد. لذا، اعمال مدیریت صحیح و مناسب در برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها می‌تواند در احیاء رودخانه آثار مثبت فراوانی داشته باشد. در این پژوهش، با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی اثر جانمایی دو حفره متوالی برداشت مصالح رودخانه‌ای در قالب فاصله حفره‌ها از هم و همچنین، فاصله حفره‌ها از دیواره به منظور رسوبگذاری و احیای حفره‌ها برای مدیریت برداشت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دورتر شدن حفره پایین دست تا ۱۶ برابر عمق جریان، بر پرشدگی و سرعت مهاجرت حفره بالادست تاثیر محسوسی ندارد. از طرفی، برداشت نزدیک دیواره کانال (به فاصله ۲۰ درصد عرض کانال) باعث کاهش ۲۵ درصدی حجم پرشده و کاهش ۳۷ درصدی سرعت مهاجرت لبه بالایی حفره بالاست می‌شود. مقدار پرشدگی برای حفره پایین دست با افزایش فاصله حفره‌ها از هم کاهش می‌یابد، اما میزان کاهش به فاصله حفره پایین دست از دیواره بستگی دارد. از طرفی، با دو برابر شدن فاصله بین حفره‌ها، سرعت مهاجرت حفره پایین دست ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. برداشت در مرکز کانال و در صورتی که حفره‌ها در فاصله نزدیک به هم قرار داشته باشند، شرایط مطلوب تری به لحاظ پرشدگی و سرعت مهاجرت برای حفره‌های بالادست و پایین دست ایجاد می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** جانمایی حفره، حفره برداشت، رسوبگذاری، سرعت مهاجرت، مصالح رودخانه‌ای

### مقدمه

ماسه از بستر و حاشیه رودخانه‌ها نشان می‌دهد که مشکلات متعدد و فراوانی به لحاظ تغییر شکل هندسی و طبیعی رودخانه‌ها، افزایش طغیان آب و سیلابی شدن رودخانه‌ها و همچنین، خطرات زیست محیطی و اکولوژیکی (تخریب زیستگاه پرندگان، جانوران و ماهیان در رودخانه‌ها) به وجود خواهند آورد. لذا، اعمال مدیریت صحیح و مناسب در برداشت شن و

با توسعه جوامع بشری و رشد و توسعه صنعت و به تبع آن تقاضای استفاده از شن و ماسه، مصالح رودخانه‌ای به عنوان مواد اولیه مصالح ساختمانی و عملیات عمرانی مورد توجه قرار گرفته است. بررسی نحوه برداشت‌ها، حجم و میزان برداشت مصالح شن و

Selangor مالزی با نمونه‌برداری از چهار منبع برداشت شن و ماسه از این رودخانه و با مدل ریاضی انتقال رسوب به این نتیجه رسیدند که برداشت شن و ماسه، بار بستر در محل برداشت را کاهش و علاوه بر آن قدرت حمل جریان در پایین‌دست را افزایش و فرسایش بالادست و کناره رودخانه را در پی داشته، میزان گل آلودگی و اندازه و نوع رسوبات انتقالی را نیز تغییر داده است. Amiri Tokaldany و Azizian (۲۰۱۱) به بررسی تعیین مکان‌های مناسب برداشت مصالح رودخانه‌ای با استفاده از مدل ریاضی HEC – RAS.04 پرداختند. این مطالعه با برداشت میدانی رودخانه صفارود و تعریف دو سناریو در اثر برداشت بر مورفولوژی رودخانه که یکی برداشت مصالح از بستر رودخانه با عمق‌های یک، دو و سه متر و دیگری برداشت مصالح از کناره‌های رودخانه با عرض ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متر می‌باشد، انجام دادند. نتایج مدل در تعیین تنش برشی برای سیلاب دو و پنج ساله نشان داد که تاثیر تعمیق بیشتر از تاثیر تعریض بوده، تنش برشی شدیدتری ایجاد می‌کند. Azar Ghafouri و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی با عنوان اثرات ناشی از حفره برداشت مصالح شن و ماسه بر پروفیل بستر رودخانه در شرایط آزمایشگاهی تغییرات زمانی و مکانی حفره برداشت را تحت شرایط مختلف جریان بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که در اثر برداشت شن و ماسه با گذشت زمان، جریان سبب می‌شود که رسوبات از بالادست حفره برداشته شده، با رسوبگذاری در دیوار بالادست و فرسایش در دیوار پایین‌دست در طول رودخانه منتقل شود. Li و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی و عددی جابه‌جایی حفره برداشت مصالح پرداختند. آزمایش‌ها در دو حالت آب زلال و بستر متحرک با حفره برداشت با مقطع مثلثی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط آب زلال حفره جابه‌جا نشده، بلکه زاویه قرارگیری مصالح به‌دلیل فرسایش لبه بالادست و پایین‌دست کاهش یافته، سبب پرشدن قعر حفره می‌شود. در شرایط بستر متحرک شیب بالادست به سمت عقب فرسایش پیدا کرده، اما به‌دلیل ورود بار بستر، شیب بالادست حفره پر شده، در زاویه قرارگیری استقرار مصالح قرار می‌گیرد. اما در پایین‌دست فرسایش اتفاق می‌افتد.

ماسه از رودخانه‌ها می‌تواند در احیاء رودخانه آثار مثبت فراوانی داشته باشد. Lee و همکاران (۱۹۹۳) به بررسی آزمایشگاهی مهاجرت حفره برداشت مستطیلی با دانه‌بندی یکنواخت پرداختند. ایشان تغییر شکل و مهاجرت حفره مستطیلی را به دو مرحله تقسیم کردند. مرحله اول از ابتدای شروع آزمایش تا لحظه‌ای است که مرز بالادست حفره برداشت شده به انتهای پائین‌دست حفره اولیه می‌رسد و از این زمان مرحله دوم شروع می‌شود. مرحله اول را دوره انتقال نامیدند که در طول این دوره بیشینه عمق آبستگي کم و بیش ثابت می‌ماند و مرحله دوم را دوره پخشیدگی نامیدند که در این مرحله بیشینه عمق آبستگي با گذشت زمان شروع به کاهش می‌کند. ایشان دریافتند که بیشینه عمق آبستگي در انتهای دوره انتقال رخ می‌دهد. Salehi Neishabouri و Farhadzadeh (۲۰۰۲) به بررسی آزمایشگاهی جابه‌جایی حفره ناشی از برداشت شن و ماسه در بستر از کانال مستقیم پرداختند. ایشان تاثیر طول و عرض حفره را بر سرعت مهاجرت حفره بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش طول حفره باعث کاهش و افزایش عرض آن باعث افزایش سرعت حرکت حفره می‌شود. همچنین، افزایش طول و عرض حفره باعث کاهش نرخ پرشدن حفره می‌شود که در این میان تأثیر طول عمده‌تر به‌نظر می‌رسد. Hashemi و Boudaghpour (۲۰۰۸) در مطالعه میدانی رودخانه چشمه کیله در شمال ایران، اثرات زیست‌محیطی برداشت بی‌رویه شن و ماسه از این رودخانه را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که برداشت شن و ماسه سبب ته‌نشست رس و لای شده، سبب می‌شود، لایه نفوذناپذیر ایجاد شود و این امر از نشت آب به سفره‌های آب زیرزمینی جلوگیری می‌کند. Bruce Melton (۲۰۰۹) به بررسی میدانی اثرات برداشت شن و ماسه از رودخانه Rio Tigris کاستاریکا پرداخت. ایشان به این نتیجه رسیدند که برداشت مصالح از رودخانه پایداری رودخانه را به‌دلیل از بین بردن لایه آرمور به هم می‌زند، همچنین، تعریض بستر رودخانه به واسطه برداشت شن و ماسه سبب افزایش سرعت جریان شده و فرسایش بستر را به همراه خواهد داشت. Ashraf و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی میدانی در رودخانه

استاندارد توزیع اندازه مصالح ( $\sigma_g$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و لزجت سینماتیکی سیال ( $\nu$ )، با انتخاب حجم نهایی حفره در انتهای آزمایش ( $V$ ) به عنوان متغیر وابسته، رابطه (۱) به دست می آید.

$$V = f(B, S_0, L, S, V_0, l, b, C_s, U, U_c, y, d_{50}, S_g, n, r, r_s, g) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $g$  و  $\nu$  به عنوان متغیرهای تکراری، شکل کلی رابطه بالا را با استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام، می توان به صورت رابطه (۲) نوشت.

$$\frac{V}{y^3} = f\left(\frac{B}{y}, S_0, \frac{L}{y}, \frac{l}{y}, \frac{b}{y}, C_s, \frac{S}{y}, \frac{V_0}{y^3}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{U_c}{\sqrt{gy}}, \frac{d_{50}}{y}, \sigma_g, \frac{g^2 y^2}{\nu}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (2)$$

با توجه به این که شیب کانال، وزن مخصوص رسوبات، ضریب یکنواختی مصالح، غلظت رسوب ورودی، متوسط قطر مصالح، طول و عرض حفره ها و همچنین، عمق جریان ثابت است، در نتیجه پارامترهای بدون بعد  $\frac{U}{\sqrt{gy}}$ ،  $\frac{U_c}{\sqrt{gy}}$ ،  $\frac{d_{50}}{y}$ ،  $C_s$ ،  $\frac{\rho_s}{\rho}$ ،  $S_0$ ،  $\sigma_g$  حذف می شوند. همچنین، با ترکیب  $\frac{U}{\sqrt{gy}}$  و  $\frac{\nu}{g^{1/2} y^{3/2}}$  پارامتر بی بعد  $\frac{Uy}{\nu}$  به دست آمده، با توجه به آشفتگی بودن جریان، می توان از اثرات عدد رینولدز صرف نظر کرد. با ترکیب  $\frac{U}{\sqrt{gy}}$  و  $\frac{U_c}{\sqrt{gy}}$  پارامتر بی بعد  $\frac{u}{u_c}$  حاصل می شود که این نسبت ثابت و در تمام آزمایش ها ۱/۲ در نظر گرفته شده است و از اعداد بی بعد حذف می شود. با ترکیب سازی پارامترهای بدون بعد موجود، شکل نهایی تحلیل ابعادی برای بررسی فرسایش و رسوبگذاری حفره برداشت مصالح مطابق رابطه (۳) به دست آمد.

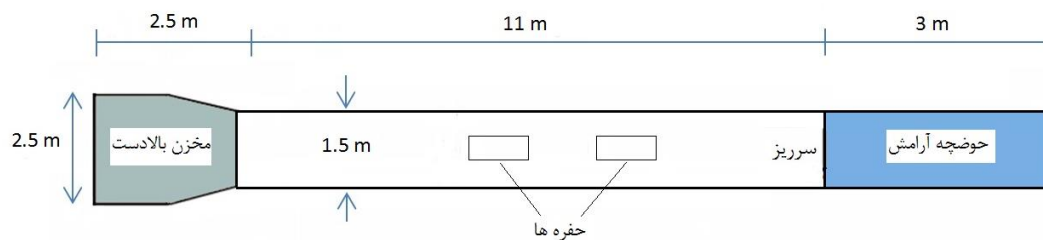
$$\frac{V}{V_0} = f\left(\frac{L}{y}, \frac{S}{B}\right) \quad (3)$$

آزمایش ها در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۱ متر و عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر انجام شد (شکل ۱). متوسط قطر مصالح یک میلی متر و ضریب یکنواختی آن ۱/۴۶ می باشد. طول، عرض و ارتفاع حفره ها به ترتیب ۴۶، ۳۶ و ۹/۵ سانتی متر در نظر گرفته شد و عمق جریان به وسیله عمق سنج مکانیکی و سرریز بادبزی برابر شش سانتی متر برقرار شد.

Madyise (۲۰۱۳) به بررسی میدانی رودخانه های منطقه Gaborone در آفریقای جنوبی پرداخت. ایشان با نمونه برداری میدانی از سه ناحیه مختلف برداشت مصالح، طول، عرض، عمق و سایر مشخصات حفره را برداشت کرد و معایب و مزایای برداشت شن و ماسه را بر محیط زیست و اکولوژی این منطقه بیان کرد. ایشان به این نتیجه رسیدند که تخریب دیواره رودخانه و فرسایش آن بیشترین تاثیر منفی ناشی از برداشت مصالح از رودخانه است. Jang و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار حفره برداشت مصالح در کانال به این نتیجه رسیدند که رسوبات بالادست در حفره نشست کرده، حفره با شیب ثابت به پایین دست مهاجرت می کند. ایشان نشان دادند که با افزایش سرعت مهاجرت حفره، عمق حفره کاهش می یابد و همچنین، سرعت مهاجرت به رسوب ورودی بستگی دارد. با توجه به مطالعات گذشته، ضرورت تعیین میزان پرشدگی و همچنین، محل مناسب برای پرشدن بهتر حفره مشخص بوده که نقش مهمی در زمان بندی برداشت و همچنین، بازگشت رودخانه به شرایط پایدار را دارد. لذا، در این تحقیق با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی، اثر جانمایی حفره های متوالی برداشت مصالح رودخانه ای به منظور پرشدگی و احیای آن ها برای مدیریت برداشت مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش ها

به منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر فرسایش و رسوبگذاری حفره برداشت مصالح، تحلیل ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شد. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارتند از: عرض کانال ( $B$ )، شیب طولی مجرا ( $S_0$ )، فاصله حفره ها از هم ( $L$ )، فاصله حفره از دیواره ( $S$ )، حجم اولیه حفره قبل از آزمایش ( $V_0$ )، طول حفره ( $l$ )، عرض حفره ( $b$ )، سرعت متوسط جریان در مقطع قبل از حفره ( $U$ )، سرعت آستانه حرکت مصالح بستر ( $U_c$ )، عمق جریان ( $y$ )، قطر متوسط مصالح ( $d_{50}$ )، غلظت رسوب ورودی ( $C_s$ )، وزن مخصوص رسوبات ( $\rho_s$ )، انحراف



شکل ۱- تصویر پلان کانال آزمایشگاهی

حفره‌ها در بستر کانال است. به‌منظور دقت بیشتر هر آزمایش دو بار انجام شده، میانگین دو آزمایش به‌عنوان معرف نتایج برای آن حالت استفاده شده و در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شد.

برای ایجاد حفره در کانال از قالب فلزی استفاده شده و دو حفره در راستای جریان با نسبت‌های مختلف  $\frac{L}{y}$  و  $\frac{S}{B}$  مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. شکل ۲، نشان دهنده قالب‌های فلزی برای تعبیه



شکل ۲- قالب فلزی برای تعبیه حفره‌ها قبل از شروع آزمایش

دبی جریان در این لحظه معادل  $28/66$  لیتر بر ثانیه ثبت شد. با توجه به مشخصات هیدرولیکی کانال اعم از عمق و عرض، سرعت آستانه حرکت معادل  $0/318$  متر بر ثانیه به‌دست آمد. با توجه به نسبت  $\frac{u}{u_c} = 1/2$  دبی آزمایش‌های اصلی  $34/4$  لیتر بر ثانیه محاسبه شد. پس از این مرحله، در آزمایشی دیگر، حوضچه‌ای در پایین‌دست کانال روی بستر ایجاد شد تا پس از صاف کردن بستر و غرقاب شدن کانال و تنظیم شرایط آزمایشگاهی در عمق و دبی آزمایش‌ها، مصالح فرسایش یافته از بستر، در آن ته‌نشین شود. پس از مدت زمان آزمایش (۶۰ دقیقه) مقادیر رسوب درون حوضچه جمع‌آوری، خشک و توزین شده و مشخص شد که در هر دقیقه حدوداً  $280$  گرم رسوب از مقطع این کانال عبور می‌کند. این مقدار به‌عنوان تزریق رسوب در طول آزمایش به سامانه اعمال شد. برای انجام آزمایش‌های اصلی، در ابتدا با استفاده از

قبل از انجام آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت مصالح بستر و همچنین، میزان تزریق رسوب از بالادست مشخص شود. روابط تجربی متعددی برای تعیین سرعت آستانه حرکت مصالح وجود دارد، اما به‌دلیل این‌که این روابط برای شرایط خاصی استخراج شده، قابل تعمیم به همه موارد نیست، لذا، به‌منظور صحت و دقت بیشتر، آزمایش آستانه حرکت در کانال مذکور انجام شد. بدین‌گونه که بستر کاملاً صاف و هموار شده، پس از باز کردن پمپ و غرقاب شدن کانال با استفاده از سرریز بادبزی در پایین‌دست، عمق جریان برابر شش سانتی‌متر برقرار شد. سپس، دبی به آهستگی افزایش پیدا کرده، عمق جریان روی دریچه ثابت نگه داشته شد. در دبی مشخصی و در عمق ثابت شش سانتی‌متر مصالح بستر شروع به حرکت کردند. این لحظه به‌عنوان آستانه حرکت انتخاب شده، با قرائت ارتفاع آب روی سرریز مستطیلی پایین‌دست،

و دریچه پروانه‌ای برابر عمق شش سانتی‌متر برقرار شده، از این مرحله آزمایش آغاز شد. زمان آزمایش ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شده و تغییرات بستر در خط مرکزی هر حفره در پایان آزمایش به وسیله دستگاه پروفایلر در ۱۹ نقطه طولی برداشت شده تا میزان مهاجرت حفره‌ها و تغییرات آن برای رسوب‌گذاری مشخص شود. پس از پایان آزمایش، به منظور تعیین میزان پرشدگی، حفره‌ها در راستای طولی و عرضی شبکه‌بندی شده و توپوگرافی بستر برداشت شده است.

صاف‌کننده بستر، سطح کانال هموار شده و حفره در خط مرکزی کانال حفر شده و به وسیله قالب شکل می‌گیرد، سپس، مجدداً با استفاده از صاف‌کننده، بستر کانال کاملاً هموار و به وسیله تراز کنترل می‌شود. پس از این مرحله پمپ روشن شده و جریان به آرامی وارد کانال شده، به گونه‌ای که هیچ‌گونه فرسایش بستر ایجاد نشود. پس از غرقاب کردن کانال شیر پمپ بیشتر باز شده تا دبی افزایش یابد. سپس قالب فلزی که داخل حفره قرار گرفته به آرامی برداشته می‌شود. سپس، دبی کانال روی ۳۴/۴ لیتر بر ثانیه تنظیم شده

جدول ۱- مشخصات جانمایی حفره‌ها در آزمایش‌ها

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$L/y$	۸	۱۲	۱۶	۸	۱۲	۱۶	۸	۱۲	۱۶
$\frac{S}{B}$ (درصد)	۵۰	۵۰	۵۰	۳۵	۳۵	۳۵	۲۰	۲۰	۲۰

### نتایج و بحث

با شروع آزمایش، مصالح از بالادست به دلیل افزایش عمق و کاهش سرعت جریان داخل حفره، رسوب‌گذاری شده، در شیب بالادست و کف حفره نشست می‌کنند و باعث مهاجرت شیب بالادست حفره به سمت پایین دست می‌شوند. همچنین، مصالح از لبه پایین دست حفره، فرسایش می‌یابند و به پایین دست حرکت می‌کنند که این امر نیز به علت کاهش ناگهانی عمق و افزایش سرعت اتفاق می‌افتد. در حالات  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{S}{B} = 35$  درصد، حفره در راستای جریان به سمت پایین دست مهاجرت می‌کند، اما در  $\frac{S}{B} = 20$  درصد، نحوه پرشدگی کاملاً متفاوت بوده، حفره به صورت مورب حرکت می‌کند که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل ۳، پرشدگی حفره‌های بالادست و پایین دست در  $\frac{L}{y} = 8$  را نشان می‌دهد.

**حفره بالادست:** با توجه به شکل ۴، می‌توان دریافت که دورتر شدن حفره پایین دست در هر نسبت  $\frac{S}{B}$ ، تاثیری بر میزان پرشدگی حفره بالادست ندارد و این امر مستقل از جانمایی حفره نسبت به دیواره است. زیرا حفره پایین دست نقشی در پرشدگی حفره بالادست نداشته، تغذیه رسوب برای آن از طریق بالادست کانال انجام می‌شود. اما، شکل ۴- ج نشان می‌دهد که دیواره کاملاً بر میزان پر شدن اثر گذاشته

و باعث کاهش پرشدگی می‌شود و این امر در همه نسبت‌های  $\frac{L}{y}$  صادق است.

شکل ۵، تغییرات دو بعدی حفره بالادست را در پلان نشان می‌دهد. در  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{S}{B} = 35$  درصد، بالادست حفره پس از گذشت زمان به حالت دایره‌ای تبدیل می‌شود و این نشان‌دهنده این است که میزان رسوبگذاری در کنج‌ها بیشتر از ضلع‌های حفره است. این امر به علت الگوی جریان اطراف حفره اتفاق می‌افتد، زیرا جریان با نزدیک‌تر شدن به حفره از گوشه‌ها به داخل حفره کشیده می‌شود. در پایین دست حالت کشیدگی اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد، فرسایش در ضلع‌ها بیشتر از فرسایش در کنج‌ها است. اما در  $\frac{S}{B} = 20$  درصد نحوه پرشدگی کاملاً متفاوت بوده، حفره به صورت مورب حرکت می‌کند. این امر به دلیل جانمایی حفره و قرارگیری نزدیک دیواره اتفاق می‌افتد. در واقع حفره، جریانی که از بالادست کانال وارد می‌شود را به سمت خود می‌کشد که به این پدیده تسخیر جریان به وسیله حفره گفته می‌شود و سبب می‌شود، جریان از سمت راست حفره وارد حفره شود. این جریان به دیواره برخورد کرده و منحرف می‌شود و این انحراف سبب مهاجرت مورب حفره خواهد شد.



(الف-۲)



(الف-۱)



(ب-۲)



(ب-۱)

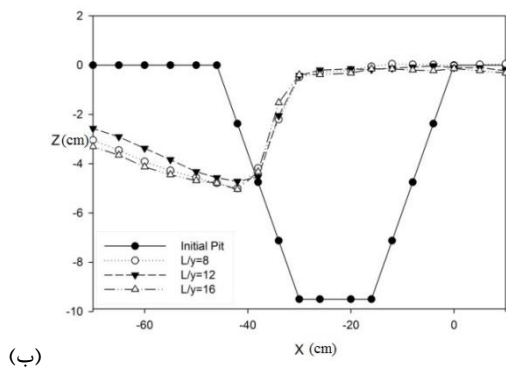


(ج-۲)

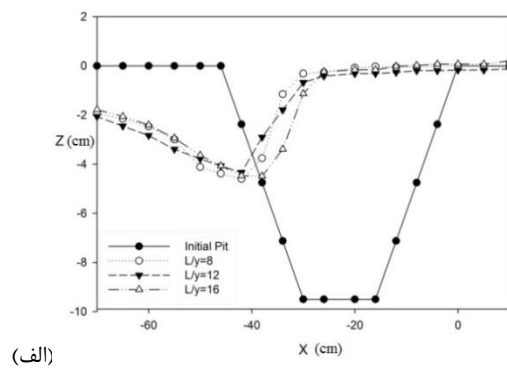


(ج-۱)

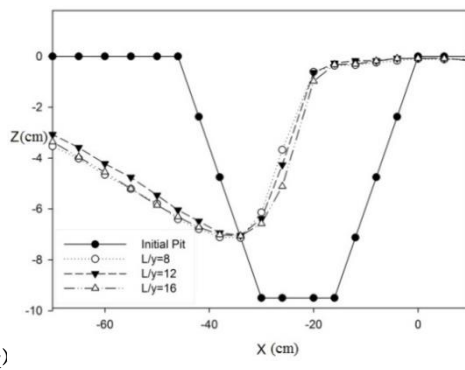
شکل ۳- پرشدگی حفره‌ها در  $\frac{L}{y} = 8$  (جهت جریان از راست به چپ)، الف-۱) حفره بالادست و  $\frac{S}{B} = 50$  الف-۲) حفره پایین دست و  $\frac{S}{B} = 50$  ب-۱) حفره بالادست و  $\frac{S}{B} = 35$  ب-۲) حفره پایین دست و  $\frac{S}{B} = 35$  ج-۱) حفره بالادست و  $\frac{S}{B} = 20$  ج-۲) حفره پایین دست و  $\frac{S}{B} = 20$



(ب)

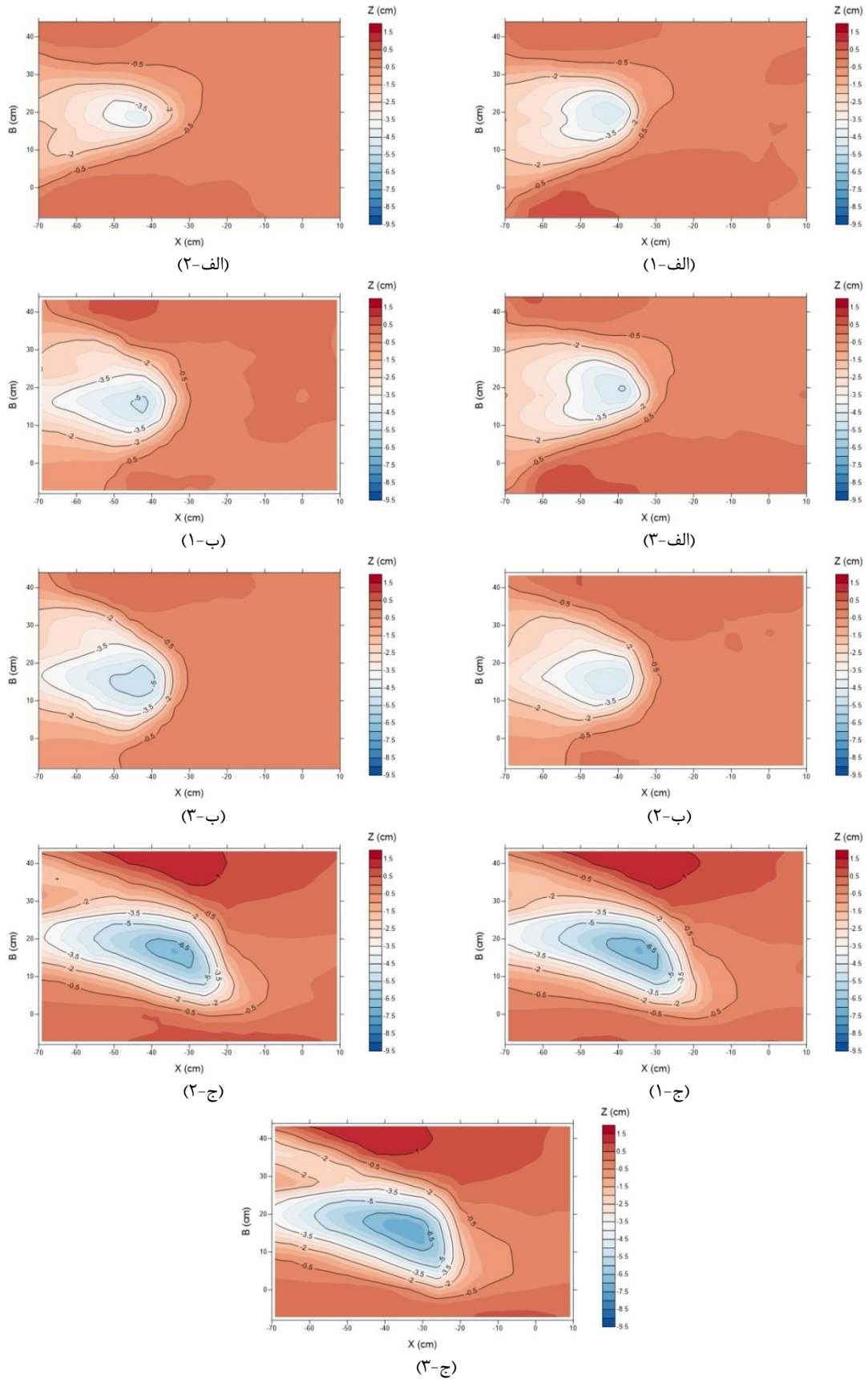


(الف)



(ج)

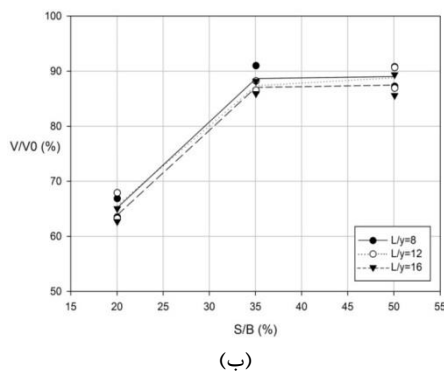
شکل ۴- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست در زمان ۶۰ دقیقه، الف)  $\frac{S}{B} = 50$ ، ب)  $\frac{S}{B} = 35$  و ج)  $\frac{S}{B} = 20$  (جهت جریان از راست به چپ)



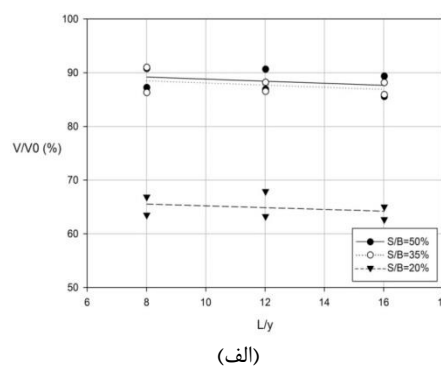
شکل ۵- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن، الف-۱)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (الف-۲)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (الف-۳)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 16$  (ب-۱)  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (ب-۲)  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (ب-۳)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (ج-۱)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (ج-۲)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 16$  (جهت جریان از راست به چپ)

هر دو گوشه وارد حفره می‌شود. شکل ۶- ب نیز این مطلب را تایید می‌کند و با حرکت حفره بالادست از سمت دیواره به مرکز کانال میزان پرشدن آن افزایش می‌یابد، اما از  $\frac{S}{B}=50$  الی  $\frac{S}{B}=35$  درصد میزان پرشدگی تغییر چندانی نمی‌کند. این امر نشان می‌دهد که دیواره کانال اثر قابل توجهی در کاهش حجم پرشدگی دارد. اما هرچه حفره پایین‌دست به حفره بالادست نزدیک‌تر یا دورتر باشد، به لحاظ مقدار حجم پرشده تفاوت چندانی نمی‌کند. در واقع افزایش یا کاهش فاصله بین حفره‌ها بر اثر جانمایی از دیواره تاثیری ندارد.

جدول ۲ نتایج پرشدگی حفره بالادست را در حالات مختلف نشان می‌دهد.



تأثیر فاصله بین حفره‌ها و همچنین، جانمایی نسبت به دیواره در تغییرات حجم حفره بالادست در قالب بهترین برآزش از نقاط در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶- الف، مشاهده می‌شود که دورتر شدن حفره پایین‌دست، تأثیر آنچنانی بر حجم پرشدگی حفره بالادست ندارد. همچنین، میزان پرشدگی حفره بالادست برای  $\frac{S}{B}=50$  و  $\frac{S}{B}=35$  درصد تقریباً یکسان بوده، اما در  $\frac{S}{B}=20$  درصد به میزان ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین هرچقدر حفره به سمت دیواره منتقل شود، حجم پرشدگی کاهش محسوسی می‌یابد و این امر به دلیل عملکرد متفاوت جریان در این حالت اتفاق می‌افتد، زیرا جریان در این حالت فقط از گوشه سمت راست حفره رسوب را به درون حفره منتقل می‌کند، اما در  $\frac{S}{B}=50$  و  $\frac{S}{B}=35$  درصد جریان از



شکل ۶- میزان پرشدگی حفره بالادست (الف) تأثیر فاصله بین حفره‌ها و (ب) تأثیر جانمایی حفره‌ها نسبت به دیواره

جدول ۲- مقادیر درصد پرشدگی حفره بالادست

L/y=16	L/y=12	L/y=8	
۶۳/۸۴	۶۵/۵۷	۶۵/۱۸	S/B=20%
۸۷/۰۵	۸۷/۳۸	۸۸/۶۳	S/B=35%
۸۷/۴۷	۸۸/۷۹	۸۹/۰۲	S/B=50%

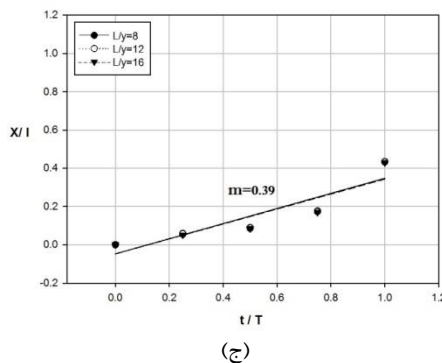
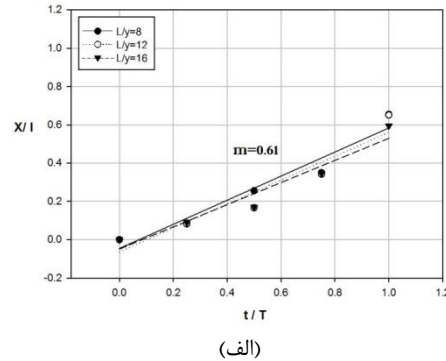
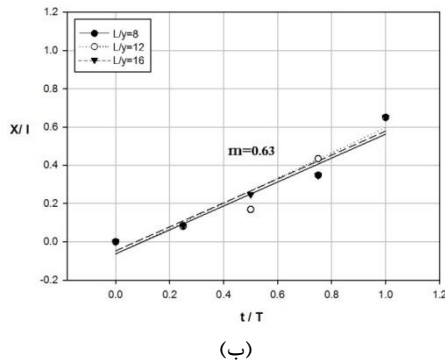
پیشانی حفره به سمت پایین‌دست است. بدین صورت که اگر شیب نمودار (m) برابر یک باشد، یعنی در زمان ۶۰ دقیقه آزمایش، مرز بالادست حفره به مرز پایین‌دست رسیده و طول کل حفره پر شده است. اگر  $m < 1$  باشد، بدین معنی است که مهاجرت حفره در زمان آزمایش کم بوده و حفره کامل پر نشده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش فاصله حفره‌ها سرعت مهاجرت تغییر محسوسی نمی‌کند و

مهاجرت حفره به سمت پایین‌دست به‌طور کلی موجب محو شدن حفره می‌شود و برای احیای حفره مطلوب است. لذا، مهاجرت حفره‌ها نیز برای تعیین مکان مناسب برداشت حائز اهمیت است. شکل ۷، نمودار مکان-زمان پیشانی حفره بالادست را نشان می‌دهد. بعد طول مهاجرت با طول حفره و بعد زمان مهاجرت با زمان نهایی آزمایش، بی‌بعد شده است و شیب هر کدام از نمودارها بیانگر سرعت مهاجرت



توجه به شکل ۷، می‌توان دریافت که برداشت مصالح در نزدیکی دیواره باعث کاهش ۳۷ درصدی سرعت مهاجرت نسبت به برداشت از مرکز کانال می‌شود.

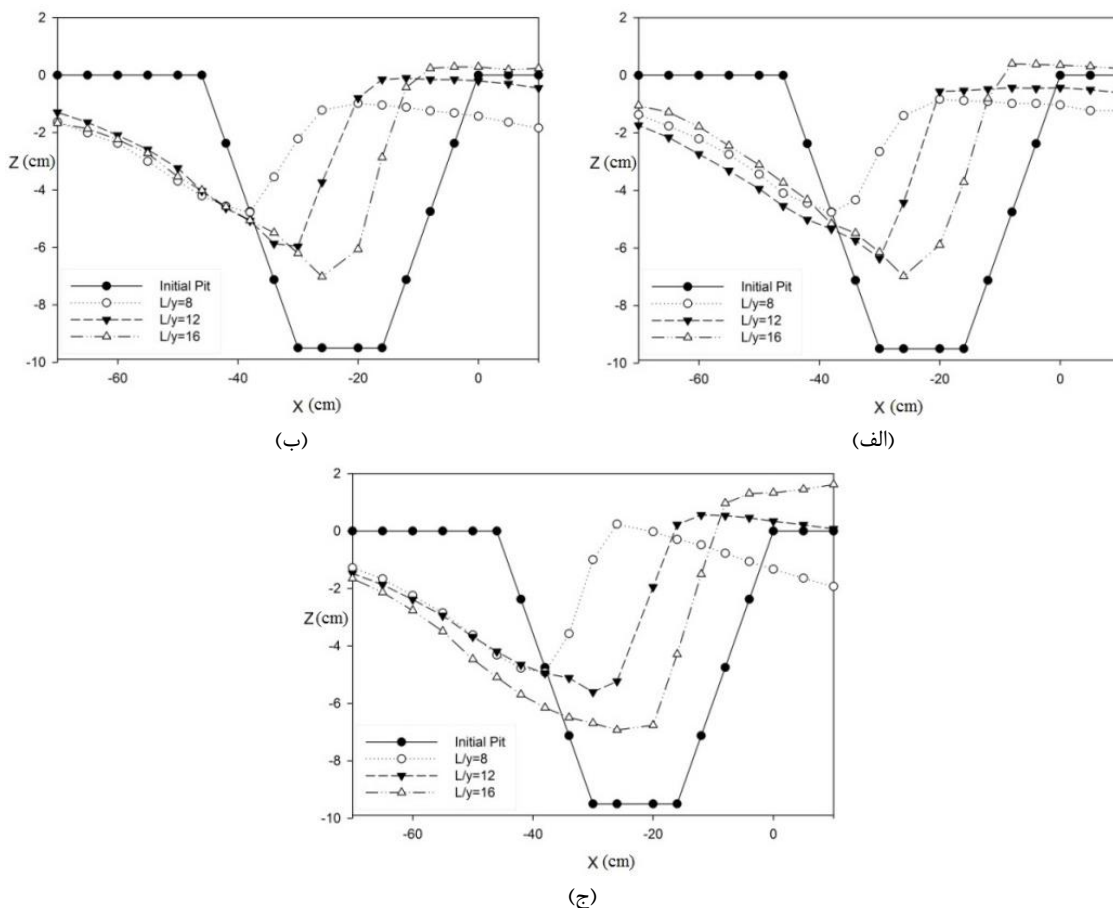
نسبت  $\frac{L}{y}$  بی‌تاثیر است. اما سرعت مهاجرت حفره بالادست در  $\frac{S}{B} = 20$  کمتر از  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{S}{B} = 50$  درصد است و حفره دیرتر به پایین‌دست منتقل می‌شود. با



شکل ۷- نمودار مکان-زمان بی بعد پیشانی حفره بالادست، الف)  $\frac{S}{B} = 50$ ، ب)  $\frac{S}{B} = 35$  و ج)  $\frac{S}{B} = 20$  درصد

$\frac{S}{B} = 35$  درصد با کاهش فاصله بین حفره‌ها، بستر در فاصله بین دو حفره افت زیادی می‌کند و این امر سبب می‌شود که رسوب ورودی به حفره پایین‌دست بیشتر شود. زیرا، حرکت رسوبات فرسایش‌یافته از بالادست به گونه‌ای است که از دو طرف حفره به صورت مورب و واگرا حرکت کرده، با مهاجرت به سمت جلو بر سطح آن افزوده می‌شود، این امر سبب می‌شود، هر چه فاصله حفره پایین‌دست دورتر باشد، مقادیر کمتری از رسوب فرسایش یافته وارد حفره پایین‌دست شود و مقداری از رسوبات فرسایش‌یافته از اطراف حفره پایین‌دست فرار می‌کند. اما در  $\frac{S}{B} = 20$  درصد تراز بستر در سمت راست حفره بیشتر است و این امر سبب می‌شود که پرشدگی حفره‌ها از سمت راست حفره صورت گیرد زیرا به دلیل مهاجرت مورب حفره بالادست به سمت مرکز کانال باعث می‌شود که مصالح بستر در ناحیه سمت راست حفره پایین‌دست قرار بگیرند.

**حفره پایین‌دست:** همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با دورتر شدن حفره پایین‌دست از میزان رسوب‌گذاری درون حفره و مهاجرت حفره به سمت پایین‌دست کاسته می‌شود. این امر به این علت اتفاق می‌افتد که پر شدن حفره پایین‌دست بر مبنای فرسایش حفره بالادست است. وقتی حفره پایین‌دست به بالادست نزدیک باشد، به لحاظ کمی مقدار بیشتری از رسوبات فرسایش یافته از بالادست به حفره پایین‌دست نشست می‌کند و رسوبات زودتر از حفره بالادست به حفره پایین‌دست می‌رسند و باعث مهاجرت بیشتر حفره به سمت پایین‌دست می‌شوند. همچنین، فرسایش حفره بالادست باعث پایین‌افتادگی سطح پر شده در حفره پایین‌دست می‌شود و هرچه حفره به سمت دیواره حرکت کند، بر میزان پایین‌افتادگی افزوده می‌شود که این امر به دلیل اثر دیواره اتفاق می‌افتد. شکل ۹، تغییرات دو بعدی حفره پایین‌دست را در پلان نشان می‌دهد. در  $\frac{S}{B} = 50$  و



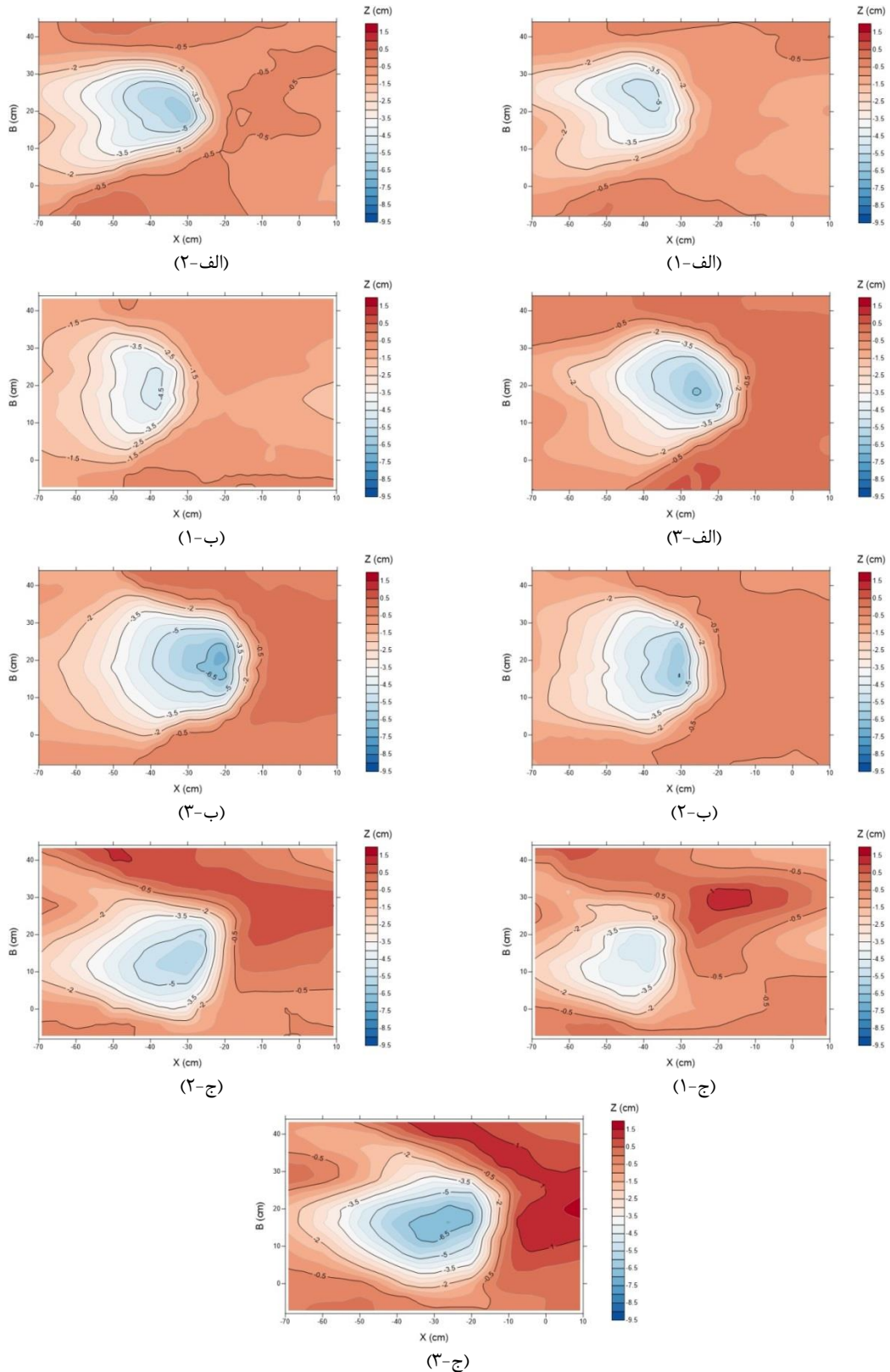
شکل ۸- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست در زمان ۶۰ دقیقه، الف)  $\frac{S}{B} = 50$ ، ب)  $\frac{S}{B} = 35$  و ج)  $\frac{S}{B} = 20$  درصد (جهت جریان از راست به چپ)

درصد با دو حالت دیگر) اما از  $\frac{L}{y} = 14$  به بعد دیواره اثر منفی گذاشته و حجم پر شده کاهش می‌یابد. بنابراین، به دلیل انتخاب فاصله مناسب از دیواره به منظور پرشدگی، باید به فاصله بین حفره‌ها توجه شود.

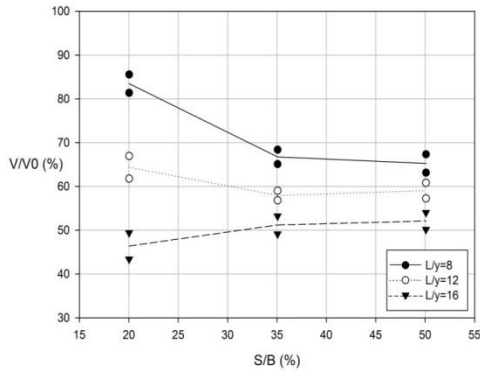
شکل ۱۱ نمودار مکان-زمان پیشانی حفره پایین دست را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین حفره‌ها سرعت مهاجرت حفره پایین دست کاهش می‌یابد و در صورت دو برابر شدن فاصله حفره‌ها از هم، سرعت مهاجرت حفره پایین دست ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. این امر مستقل از جانمایی حفره نسبت به دیواره بوده و در هر سه نسبت  $\frac{S}{B}$  صادق است.

جدول ۳ نتایج پرشدگی حفره پایین دست را در حالات مختلف نشان می‌دهد.

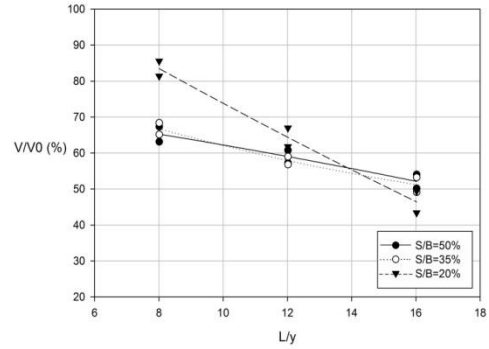
در شکل ۱۰- الف مشاهده می‌شود که در ۵۰، ۳۵،  $\frac{S}{B} = 20$  درصد با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی کاهش می‌یابد و همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، شیب کاهش حجم در  $\frac{S}{B} = 20$  تندتر از دو حالت دیگر است و این امر به دلیل تاثیر دیواره روی جریان و الگوی پرشدگی حفره است. دو برابر شدن فاصله بین حفره‌ها باعث کاهش ۱۵ درصدی حجم پر شده حفره در  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{S}{B} = 35$  درصد و کاهش ۳۵ درصدی حجم پر شده حفره در  $\frac{S}{B} = 20$  خواهد شد، اما این امر دلیلی بر بهتر بودن  $\frac{S}{B} = 50$  الی  $\frac{S}{B} = 35$  نیست، زیرا با توجه به شکل ۱۰- الف و ب، با افزایش فاصله بین حفره بالادست تا پایین دست ۱۲  $\frac{L}{y} \leq 8$  دیواره تاثیری مطلوب بر پرشدگی حفره می‌گذارد و با توجه به شکل ۱۰- الف، این تاثیر مطلوب تا  $\frac{L}{y} = 14$  نیز صادق است (محل تقاطع نمودار  $\frac{S}{B} = 20$



شکل ۹- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن، (الف-۱)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (الف-۲)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (الف-۳)  $\frac{S}{B} = 50$  و  $\frac{L}{y} = 20$  (ب-۱)  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (ب-۲)  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (ب-۳)  $\frac{S}{B} = 35$  و  $\frac{L}{y} = 16$  (ج-۱)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 8$  (ج-۲)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 12$  (ج-۳)  $\frac{S}{B} = 20$  و  $\frac{L}{y} = 16$  درصد (جهت جریان از راست به چپ)



(ب)

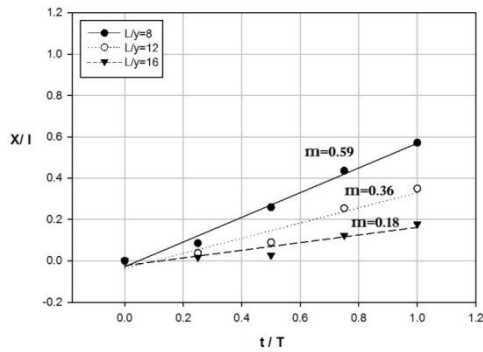


(الف)

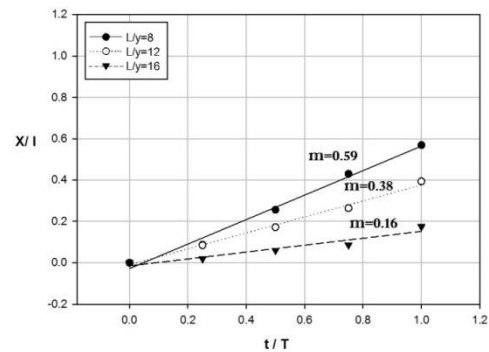
شکل ۱۰- میزان پرشدگی حفره پایین‌دست، الف) تاثیر فاصله بین حفره‌ها و ب) تاثیر جانمایی حفره‌ها نسبت به دیواره

جدول ۳- مقادیر درصد پرشدگی حفره پایین‌دست

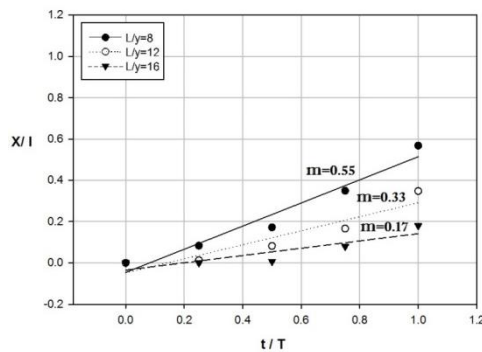
L/y=16	L/y=12	L/y=8	
۴۶/۳۷	۶۴/۱۸	۸۳/۲۶	S/B=20%
۵۰/۸۹	۵۸/۲	۶۶/۵	S/B=35%
۵۲/۰۸	۵۹/۰۳	۶۴/۹۴	S/B=50%



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۱- نمودار مکان-زمان بی‌بعد پیشانی حفره پایین‌دست، الف)  $\frac{S}{B} = 50$ ، ب)  $\frac{S}{B} = 35$  و ج)  $\frac{S}{B} = 20$  درصد

آن، شرایط بهتری را ایجاد می‌کند. از طرفی، در حالتی که مصالح در فواصل نزدیک به هم برداشت شود، برداشت مصالح در نزدیکی دیواره حجم پرشده حفره

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که هر چقدر مصالح در فاصله نزدیک‌تر به هم برداشت شود، به لحاظ حجم پر شده حفره و سرعت مهاجرت

۲- با افزایش فاصله بین حفره‌ها، از میزان رسوبگذاری درون حفره و مهاجرت حفره پایین دست کاسته می‌شود.

۳- با نزدیک شدن حفره‌ها به سمت دیواره از حجم پرشدگی حفره بالادست کاسته می‌شود، به طوری که کاهش حجم در جابه‌جایی حفره از مرکز کانال تا نزدیک دیواره ۲۵ درصد است.

۴- اگر حفره‌ها در فاصله‌ای تا ۱۴ برابر عمق جریان نسبت به یکدیگر قرار بگیرند، دیواره بر پرشدگی حفره پایین دست تاثیر مطلوب می‌گذارد، اما در فاصله‌های بیشتر از ۱۴ برابر عمق جریان، دیواره اثر منفی گذاشته و باعث کاهش حجم پرشدگی حفره پایین دست می‌شود.

۵- برای حفره بالادست، فاصله بین حفره‌ها تاثیری بر سرعت مهاجرت حفره ندارد. اما دیواره تاثیر منفی داشته، باعث کاهش ۳۷ درصدی سرعت مهاجرت می‌شود.

۶- برای حفره پایین دست، با دو برابر شدن فاصله بین حفره‌ها سرعت مهاجرت ۷۰ درصد کاهش می‌یابد و این امر مستقل از جانمایی حفره نسبت به دیواره است. بنابراین، اگر برداشت در محور مرکزی کانال و در صورتی که حفره‌ها در فاصله‌ای تا هشت برابر عمق جریان نسبت به یکدیگر قرار داشته باشند، شرایط مطلوب تری به لحاظ پرشدگی و سرعت مهاجرت ایجاد می‌کند.

پایین دست را ۱۵ درصد افزایش داده (شکل ۱۰- الف) اما حجم پر شده حفره بالادست را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد (شکل ۶- الف). از طرفی، برداشت مصالح در نزدیکی دیواره موجب کاهش ۳۷ درصدی سرعت مهاجرت حفره بالادست شده و سرعت مهاجرت حفره پایین دست تغییر محسوسی نمی‌یابد. بنابراین، برداشت در مرکز کانال و در صورتی که حفره‌ها در فاصله نزدیک به هم قرار داشته باشند، شرایط مطلوب تری به لحاظ پرشدگی و سرعت مهاجرت ایجاد می‌کند. نتایج حاصله از این پژوهش می‌تواند در مدیریت بهره‌برداری و برداشت مصالح رودخانه‌ای به لحاظ مکان‌یابی مناسب و دستیابی به احیای زودتر حفره‌ها در مهندسی رودخانه موثر باشد. البته پژوهش حاضر، در شرایط هیدرولیکی ثابت انجام شده است و می‌توان در ادامه این پژوهش، تغییرات عدد فرود، عمق جریان، دانه‌بندی مصالح بستر، اثر غیر یکنواختی مصالح و غیره را در پرشدگی حفره‌ها مورد بررسی قرار داد.

#### نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر جانمایی حفره‌های متوالی برداشت مصالح در قالب فاصله بین حفره‌ها و فاصله حفره‌ها از دیواره بر میزان رسوبگذاری درون حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد:

۱- جابه‌جایی حفره پایین دست بر شکل پرشدن حفره بالادست و همچنین، حجم پرشدگی آن تاثیر محسوسی ندارد.

#### منابع مورد استفاده

1. Amiri Tokaldany, E. and A. Azizian. 2011. Determining appropriate locations for bed material extraction using the HEC-RAS.04 numerical model. 5th National Conference on Civil Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran (in Persian).
2. Ashraf, M.A., S.A. Jamil Maah, M. Yusoff, I.A. Wajid and K. Mahmood. 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. Boudaghpour, S., S.A. Hashemi Monfared. 2008. Environmental effects of irregular extracting of gravel from river beds. WSEAS Transactions on Environment and Development, 4(5): 22-34.
4. Bruce Melton, P.E. 2009. In-stream gravel mining impacts and environmental degradation feedback associated with gravel mining on the Rio Tigre of the OSA Peninsula, Costa Rica and the proposed ADI Jimenez gravel mining concession. Melton Engineering Services Austin 8103, Kirkham Austin, Texas 78736, 26 pages.
5. Ghafouri Azar, M., M.H. Davoudi and E. Amiri. 2011. Effects of gravel and sand mining pits on the river bed profile. 6th National Conference on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (in Persian).
6. Jang, C., Y. Shimizua and G.H. Lee. 2015. Numerical simulation of the fluvial processes in the channels by sediment mining KSCE. Journal of Civil Engineering, 19(3): 771-778.

7. Lee, H.Y., D.T. Fu and M.H. Song. 1993. Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(1).
8. Li, J., M. Qi and Y. Jin. 2013. Experimental and numerical investigation of riverbed evolution in post-damaged conditions. *Proceeding of 2013 IAHR World Congress, China*.
9. Madyise, T. 2013. Case study on environmental impacts of sand mining and gravel extraction for urban development in Gaborone. *MSc Thesis, University of South Africa*, 125 pages.
10. Salehi Neishabouri, S.A.A. and A. Farhadzadeh. 2002. Effects of mining pit geometry on pit migration and bed longitudinal profile variation. *Advances in Hydraulics and Water Engineering, 13th IAHR-APD Congress, Singapore*.