

سورة الاخلاص



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

**مدیریت بهره برداری و برداشت مصالح رودخانه ای با توجه به آورد رسوب
رودخانه به روش آزمایشگاهی و عددی**

نگارنده: حامد حق نظر

اساتید راهنما:

دکتر رامین امینی

دکتر مجتبی صانعی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۲۴۲۱/ع
تاریخ: ۹۲/۱۲/۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

ویرایش:

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای: حامد حق نظر..... دانشجوی دکتری رشته..... مهندسی عمران-سازه های هیدرولیکی... به شماره دانشجویی..... ۹۲۱۶۲۹۵..... ورودی..... مهر..... ماه سال..... ۱۳۹۲..... در تاریخ..... ۹۶/۱۱/۰۳..... از رساله نظری / عملی خود با عنوان: مدیریت بهره برداری و برداشت مصالح رودخانه ای با توجه به آورد رسوب رودخانه به روش آزمایشگاهی و عددی دفاع و با اخذ نمره..... به درجه:..... نائل گردید.

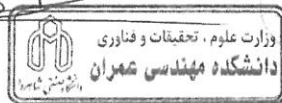
☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر رامین امینی	استاد راهنما اول	دانشیار	
۲	دکتر محبتی صائمی	استاد راهنما دوم	دانشیار	
۳	دکتر خسرو حسینی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۴	دکتر سمید امامقلی زاده	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۵	دکتر امیرعباس عابدینی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۶	دکتر مهدی عجمی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای..... حامد حق نظر..... بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: احمدی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به عرق نام پدر، به اشک چشم مادر...

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم...

به آرام ترین نگاه زندگیم، چشمان مادرم...

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را

سپاس نتوانم بگویم

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم،

نسیم گونه، غبار خستگیان را بزدايد

بوسه بر دستان پر مهرتان

تشکر و قدردانی:

خالصانه‌ترین سپاس نثار استاد راهنمای پژوهش‌م، جناب آقای دکتر رامین امینی که در مقطع دکتری تخصصی از راهنمایی‌های ارزنده و حمایت‌هایشان بهره‌مند بودم و در کمال فروتنی مرا در انجام این رساله هدایت نمودند.

با نهایت تشکر و قدردانی از استاد راهنمای گرامی و بزرگواریم جناب آقای دکتر مجتبی صانعی، که دلسوزانه و با حمایت‌های بی دریغشان، بنده را در انجام این رساله یاری کرده و با در اختیار قرار دادن تجربیات علمی خود، مرا در پیشبرد رساله یاری نمودند.

از خانواده عزیزم که همواره پشتیبان من بوده‌اند تشکر نموده و از خداوند متعال سلامت و طول عمر را برای آنها خواستارم.

حامد حق نظر

زمستان ۹۶

تعهد نامه

اینجانب حامد حق نظر دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی عمران-گرایش مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده ی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدیریت بهره برداری و برداشت مصالح رودخانه ای با توجه به آورد رسوب رودخانه به روش آزمایشگاهی و عددی تحت راهنمایی دکتر رامین امینی و دکتر مجتبی صانعی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

در تحقیق حاضر با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و عددی، مدیریت بهره‌برداری و برداشت مصالح رودخانه‌ای با توجه به آورد رودخانه برای احیای بهتر حفره‌های برداشت مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا متغیرهای شکل برداشت، فاصله بین حفره‌ها، فاصله حفره‌ها از دیواره و عمق برداشت ارزیابی گردید. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، مستقیم با مقطع مستطیل شکل و به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر بود و از مصالح با متوسط قطر ۱ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین برای مدلسازی عددی از نرم افزار CCHE2D بهره گرفته شد. نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان می‌دهد که دورتر شدن حفره پایین‌دست، تاثیری بر حجم پرشده حفره بالادست ندارد اما برداشت نزدیک دیواره کانال موجب کاهش ۲۵ درصدی حجم پرشده حفره بالادست نسبت به برداشت در مرکز کانال می‌شود که مستقل از شکل برداشت می‌باشد. در شرایط برداشت در راستای طول کانال، با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی حفره پایین‌دست کاهش یافته که مستقل از فاصله حفره تا دیواره است اما در شرایط برداشت در راستای عرض کانال و در مرکز کانال، با افزایش فاصله بین حفره‌ها، حجم پرشده حفره پایین‌دست افزایش می‌یابد و در برداشت نزدیک دیواره کاهش خواهد یافت. با افزایش نسبت طول به عرض حفره از میزان پرشدگی و پیشروی حفره به سمت پایین دست کاسته شده و ماکزیمم عمق حفره افزایش می‌یابد. دو برابر کردن نسبت طول به عرض حفره سبب کاهش حدود ۳۰ درصد از حجم پرشده خواهد شد. از طرفی برای نسبت‌های طول به عرض حفره کوچکتر از ۱/۲، حفره کاملاً پر می‌شود و شکل برداشت بی‌تاثیر است. با تغییر عمق حفره با حجم ثابت اولیه، تغییری در حجم پرشده حفره بالادست و پایین‌دست اتفاق نمی‌افتد اما با کاهش عمق حفره با حجم متغیر، حجم پرشده حفره پایین‌دست در حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی می‌توان نتیجه گرفت که برداشت در راستای عرض کانال به مراتب بهتر از برداشت در راستای طول کانال است و هر چه نسبت طول به عرض حفره کمتر باشد پرشدگی بهتر بوده و فاصله نقاط برداشت کاهش می‌یابد که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. در صورتی که برداشت در راستای طول انجام شود باید سعی شود که برداشت بصورت سطحی و در عمق‌های کمتر صورت پذیرد.

کلید واژه: حفره برداشت، پرشدگی، مدیریت برداشت، مصالح رودخانه‌ای

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه و کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۱-۲- روش های استخراج شن و ماسه از رودخانه ها ۴
- ۱-۳- اثرات ناشی از برداشت مصالح در رودخانه ها ۶
- ۱-۳-۱- فرسایش بستر و دیواره رودخانه ۷
- ۱-۳-۲- رسوبگذاری ۱۰
- ۱-۳-۳- تأثیرات ناشی از موقعیت محل استخراج در رودخانه ۱۰
- ۱-۴- ضرورت انجام تحقیق ۱۱
- ۱-۵- نوآوری تحقیق ۱۲
- ۱-۶- اهداف تحقیق ۱۲
- ۱-۷- ساختار پایان نامه ۱۳

فصل ۲- مروری بر تحقیقات گذشته

- ۲-۱- مقدمه ۱۶
- ۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده داخلی ۱۶
- ۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده خارج از کشور ۲۴

فصل ۳- مواد و روش ها

- ۳-۱- مقدمه ۳۴
- ۳-۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده ۳۴
- ۳-۱-۲- فلوم آزمایشگاهی ۳۴
- ۳-۲-۲- مصالح بستر ۳۸
- ۳-۲-۳- صاف کننده سطح بستر ۳۹
- ۳-۲-۴- عمق سنج نقطه های ۴۰
- ۳-۲-۵- دستگاه برداشت رقوم بستر ۴۱
- ۳-۳- آنالیز ابعادی ۴۱
- ۳-۴- مقدمات آزمایش ها ۴۴
- ۳-۵- نحوه تعیین سرعت آستانه حرکت مصالح (U_c) و میزان تزریق رسوب ۴۷

۴۷	نحوه انجام آزمایشات اصلی
۴۸	خطاهای آزمایشگاهی
۴۸	خطای سیستماتیک
۴۹	خطای انسانی
۴۹	مدل عددی CCHE2D
۵۰	معادلات حاکم

فصل ۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی و عددی

۵۶	مقدمه
۵۷	نتایج در شرایط برداشت در راستای طول کانال ($l/b = 1/28$)
۸۲	نتایج در شرایط برداشت در راستای عرض کانال ($l/b = 0/78$)
۱۰۷	صحت سنجی مدل عددی
۱۰۷	آزمایش تعیین توزیع سرعت
۱۰۹	مدلسازی توزیع سرعت توسط نرم افزار CCHE2D
۱۱۵	مدلسازی انتقال رسوب توسط نرم افزار CCHE2D
۱۲۳	بررسی تاثیر شکل برداشت (l/b) بر پرشدگی حفره ها
۱۲۶	بررسی تاثیر فاصله بین حفره ها (L/y) بر پرشدگی حفره
۱۲۷	نسبت $l/b = 1/28$
۱۳۰	نسبت $l/b = 0/78$
۱۳۳	نسبت $l/b = 0/59$
۱۳۷	بررسی تاثیر عمق برداشت (H/y) بر پرشدگی حفره
۱۳۸	تاثیر عمق برداشت با حجم اولیه ثابت در پرشدگی حفره ها
۱۴۳	تاثیر عمق برداشت با حجم اولیه متغیر در پرشدگی حفره ها

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۴۸	مقدمه
۱۴۸	جمع بندی و نتیجه گیری
۱۵۱	پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- برداشت بیرویه شن و ماسه از رودخانه Sungai Kulim در مالزی ۴
- شکل ۲-۱- استخراج مصالح الف) حفره مرطوب رودخانه شلمانرود استان گیلان، ب) حفره خشک رودخانه پلرود استان گیلان ۵
- شکل ۳-۱- استخراج مصالح از سیلاب دشت رودخانه Rio Tigre کاستاریکا ۶
- شکل ۴-۱- تغییرات بستر آبراهه تحت اثر پدیده Head Cuting ۹
- شکل ۱-۲- پیشروی حفره برداشت مصالح با گذشت زمان ۲۲
- شکل ۲-۲- تغییرات بستر حفره در شرایط الف) آب زلال، ب) بستر متحرک ۲۸
- شکل ۳-۲- درصد معایب برداشت شن و ماسه در رودخانه های منطقه Gaborone آفریقای جنوبی ۲۹
- شکل ۴-۲- شکاف ۳/۵ متری در اثر برداشت مصالح رودخانه ای ۳۱
- شکل ۱-۳- نمایی از کانال مورد آزمایش ۳۵
- شکل ۲-۳- نمایی از مخزن بالادست کانال ۳۵
- شکل ۳-۳- حوضچه آرامش و تله‌انداز رسوب در انتهای کانال ۳۶
- شکل ۴-۳- تکیه گاه ریلی و اربه روی آن ۳۶
- شکل ۵-۳- نمایی از سرریز بادبزنی در انتهای کانال ۳۷
- شکل ۶-۳- سرریز مستطیلی نصب شده در حوضچه آرامش به منظور اندازه گیری دبی جریان ۳۸
- شکل ۷-۳- منحنی دانه بندی آزمایش ها ۳۸
- شکل ۸-۳- صاف کننده بستر مورد استفاده در کانال ۳۹
- شکل ۹-۳- نمایی از عمق سنج نقطه ای ۴۰
- شکل ۱۰-۳- دستگاه پروفایلر الف) نمایشگر ولتاژ، ب) خط کش مجهز به سنسور ۴۱
- شکل ۱۱-۳- شکل شماتیک پلان کانال و مشخصات هندسی حفره ها در نسبت $l/b = 1/28$ ۴۴
- شکل ۱۲-۳- شکل شماتیک پلان کانال و مشخصات هندسی حفره ها در نسبت $l/b = 0/78$ ۴۴

شکل ۳-۱۳: شکل شماتیک حفره ها الف) شکل سه بعدی حفره با $l/b = 1/28$ ب) شکل سه بعدی حفره با $l/b = 0/78$	۴۵
شکل ۳-۱۴- نمایش الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم جریان.....	۵۳
شکل ۴-۱- نقاط برداشت الف) برداشت در راستای طول ب) برداشت در راستای عرض.....	۵۷
شکل ۴-۲- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۵۸
شکل ۴-۳- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۵۹
شکل ۴-۴- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۶۰
شکل ۴-۵- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۶۲
شکل ۴-۶- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۶۳
شکل ۴-۷- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 50\%$	۶۴
شکل ۴-۸- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۶۵
شکل ۴-۹- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۶۶
شکل ۴-۱۰- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۶۷
شکل ۴-۱۱- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۶۸
شکل ۴-۱۲- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۶۹
شکل ۴-۱۳- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 35\%$	۷۰
شکل ۴-۱۴- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$	۷۱
شکل ۴-۱۵- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$	۷۲

شکل ۴-۱۶- حفرة بالادست در انتهای آزمایش با مشخصات $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$ و $8 =$

۷۳ L/y

شکل ۴-۱۷- تغییرات سه بعدی حفرة بالادست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$ ۷۴

شکل ۴-۱۸- الگوی انتقال رسوب در حفرة پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و 20%

۷۵ $S/B =$

شکل ۴-۱۹- تغییرات دو بعدی حفرة پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$

۷۶

شکل ۴-۲۰- تغییرات سه بعدی حفرة پایین دست در $l/b = 1/28$ و $S/B = 20\%$ ۷۷

شکل ۴-۲۱- تاثیر فاصله بین حفرهها بر پرشدگی آن ها در $l/b = 1/28$ (الف) حفرة بالادست

(ب) حفرة پایین دست ۷۹

شکل ۴-۲۲- تاثیر فاصله حفرة ها از دیواره بر پرشدگی آنها در $l/b = 1/28$

(الف) حفرة بالادست (ب) حفرة پایین دست ۸۱

شکل ۴-۲۳- تاثیر فاصله تک حفرة از دیواره در $l/b = 1/28$ بر مقدار پرشدگی ۸۲

شکل ۴-۲۴- الگوی انتقال رسوب در حفرة بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $50\% =$

۸۳ S/B

شکل ۴-۲۵- تغییرات دو بعدی حفرة بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 50\%$ ۸۴

شکل ۴-۲۶- تغییرات سه بعدی حفرة بالادست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 50\%$ ۸۵

شکل ۴-۲۷- الگوی انتقال رسوب در حفرة پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و 50%

۸۷ $S/B =$

شکل ۴-۲۸- تغییرات دو بعدی حفرة پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 50\%$ ۸۸

شکل ۴-۲۹- تغییرات سه بعدی حفرة پایین دست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 50\%$ ۸۹

شکل ۴-۳۰- الگوی انتقال رسوب در حفرة بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $35\% =$

۹۰ S/B

شکل ۴-۳۱- تغییرات دو بعدی حفرة بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 35\%$

۹۱

شکل ۴-۳۲- تغییرات سه بعدی حفرة بالادست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 35\%$ ۹۲

- شکل ۴-۳۳- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 35\%$ ۹۳
- شکل ۴-۳۴- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 35\%$ ۹۴
- شکل ۴-۳۵- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 35\%$ ۹۵
- شکل ۴-۳۶- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۹۶
- شکل ۴-۳۷- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۹۷
- شکل ۴-۳۸- تغییرات سه بعدی حفره بالا دست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۹۸
- شکل ۴-۳۹- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۹۹
- شکل ۴-۴۰- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۱۰۰
- شکل ۴-۴۱- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $l/b = 0/78$ و $S/B = 20\%$ ۱۰۱
- شکل ۴-۴۲- تاثیر فاصله بین حفره ها بر پرشدگی آن ها در $l/b = 0/78$ (الف) حفره بالادست (ب) حفره پایین دست ۱۰۴
- شکل ۴-۴۳- تاثیر فاصله حفره ها از دیواره بر پرشدگی آن ها در $l/b = 0/78$ (الف) حفره بالادست (ب) حفره پایین دست ۱۰۵
- شکل ۴-۴۴- تاثیر فاصله تک حفره از دیواره در $l/b = 0/78$ بر مقدار پرشدگی ۱۰۶
- شکل ۴-۴۵- دستگاه سرعت سنج Electro Magnetic ۱۰۸
- شکل ۴-۴۶- شبکهبندی حفره ها و اطراف آنها به منظور برداشت سرعت ۱۰۸
- شکل ۴-۴۷- نتایج توزیع سرعت جریان اندازه گیری شده در آزمایشگاه (الف) مولفه طولی (ب) مولفه عرضی ۱۰۹

شکل ۴-۴۸- مدل رقومی و شبکه بندی شده حفره ها ۱۱۰

شکل ۴-۴۹- الف) نتایج برآیند سرعت در راستای محور مرکزی حفره ها برای سه نوع شبکه بندی ب) تاثیر زبری بر نتایج سرعت طولی جریان در راستای خط مرکزی حفره ها..... ۱۱۲

شکل ۴-۵۰- نتایج توزیع سرعت جریان محاسبه شده در مدل عددی الف) مولفه طولی ب) مولفه عرضی ۱۱۳

شکل ۴-۵۱- مقایسه کمی تغییرات سرعت محاسبه شده توسط مدل و اندازه گیری شده در آزمایشگاه الف) مولفه طولی ب) مولفه عرضی ۱۱۴

شکل ۴-۵۲- تغییرات بستر حفره بالادست در راستای طول با $l/b = 1/28$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 16$ ۱۱۶

شکل ۴-۵۳- تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 16$ الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل عددی ۱۱۶

شکل ۴-۵۴- تغییرات بستر حفره پایین دست در راستای طول با $l/b = 1/28$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 16$ ۱۱۷

شکل ۴-۵۵- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 16$ الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل عددی ۱۱۷

شکل ۴-۵۶- میزان پرشدگی حفره ها در مدل آزمایشگاهی و عددی برای $l/b = 1/28$ ، $S/B = 50\%$ الف) حفره بالادست ب) حفره پایین دست ۱۱۹

شکل ۴-۵۷- تغییرات بستر حفره بالادست در $l/b = 0.78$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 8$ ۱۱۹

شکل ۴-۵۸- تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 0.78$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 8$ الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل عددی ۱۲۰

شکل ۴-۵۹- تغییرات بستر حفره پایین دست در $l/b = 0.78$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 8$ ۱۲۰

شکل ۴-۶۰- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0.78$ ، $S/B = 50\%$ ، $L/y = 8$ الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل عددی ۱۲۱

شکل ۴-۶۱- میزان پرشدگی حفره ها در مدل آزمایشگاهی و عددی برای $l/b = 0.78$ ، $S/B = 50\%$ الف) حفره بالادست ب) حفره پایین دست ۱۲۲

- شکل ۴-۶۲- پلان حفره ها به همراه ابعاد آنها ۱۲۳
- شکل ۴-۶۳- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره در $S/B = 50\%$ (الف) ۱۲۴
- شکل ۴-۶۴- تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن در $S/B = 50\%$ (الف) $l/b = 0.59$ ، $l/b = 0.78$ (ب) ، $l/b = 1.28$ (ج) ، $l/b = 1.68$ (د) ۱۲۵
- شکل ۴-۶۵- تاثیر شکل برداشت (نسبت طول به عرض حفره) بر میزان پرشدگی ۱۲۶
- شکل ۴-۶۶- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $l/b = 1.28$ ۱۲۸
- شکل ۴-۶۷- توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1.28$ و $S/B = 50\%$ ۱۳۰
- شکل ۴-۶۸- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $l/b = 0.78$ و $S/B = 50\%$ ۱۳۱
- شکل ۴-۶۹- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0.78$ و $S/B = 50\%$ ۱۳۳
- شکل ۴-۷۰- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $l/b = 0.59$ و $S/B = 50\%$ ۱۳۴
- شکل ۴-۷۱- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 0.59$ و $S/B = 50\%$ ۱۳۵
- شکل ۴-۷۲- تاثیر فاصله بین حفره ها بر حجم پرشدگی حفره پایین دست را برای مقادیر مختلف l/b ۱۳۷
- شکل ۴-۷۳- تاثیر متقابل شکل برداشت بر فاصله برداشت ۱۳۷
- شکل ۴-۷۴- مشخصات ابعاد حفره ها در حالت حجم اولیه ثابت ۱۳۸
- شکل ۴-۷۵- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره بالادست در $l/b = 1.28$ و $S/B = 50\%$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1.25$ (ب) $H/y = 1.42$ (ج) ۱۳۹

شکل ۷۶-۴- تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و 50%
 $S/B =$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1/25$ ، (ب) $H/y = 1/42$ ، (ج) $H/y = 1/59$
 ۱۴۰

شکل ۷۷-۴- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $1/28$
 $l/b =$ و 50% $S/B =$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1/25$ ، (ب) $H/y = 1/42$ ، (ج)
 $H/y = 1/59$ ۱۴۱

شکل ۷۸-۴- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و 50%
 $S/B =$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1/25$ ، (ب) $H/y = 1/42$ ، (ج) $H/y = 1/59$
 ۱۴۲

شکل ۷۹-۴- تاثیر عمق حفره با حجم اولیه ثابت بر مقدار پرشدگی حفره های بالادست و
 پایین دست در $l/b = 1/28$ و 50% $S/B =$ و $L/y = 16$ ۱۴۲

شکل ۸۰-۴- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $1/28$
 $l/b =$ و 50% $S/B =$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1/25$ ، (ب) $H/y = 1/42$ ، (ج)
 $H/y = 1/59$ ۱۴۴

شکل ۸۱-۴- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $l/b = 1/28$ و 50%
 $S/B =$ و $L/y = 16$ (الف) $H/y = 1/25$ ، (ب) $H/y = 1/42$ ، (ج) $H/y = 1/59$
 ۱۴۴

شکل ۸۲-۴- تاثیر عمق حفره با حجم اولیه متغیر بر مقدار پرشدگی حفره پایین دست در
 $l/b = 1/28$ و 50% $S/B =$ و $L/y = 16$ ۱۴۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- تاثیرات برداشت شن و ماسه از رودخانه‌های هند ۲۶
- جدول ۱-۳- تغییرات پارامترهای مورد آزمایش ۴۶
- جدول ۱-۴- میزان پرشدگی حفره بالادست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $l/b = 1/28$ ۷۷
- جدول ۲-۴- میزان پرشدگی حفره پایین‌دست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $l/b = 1/28$ ۷۸
- جدول ۳-۴- میزان پرشدگی حفره بالادست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $l/b = 0/78$ ۱۰۲
- جدول ۴-۴- میزان پرشدگی حفره پایین‌دست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $l/b = 0/78$ ۱۰۲
- جدول ۵-۴- مشخصات شبکه‌بندی ۱۱۰
- جدول ۶-۴- مقادیر خطا برای حجم پروفیل سطح حفره‌های بالادست و پایین‌دست بر حسب درصد ۱۲۲
- جدول ۷-۴- ابعاد حفره‌ها در سطح و کف ۱۲۳

فصل اول:

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

رودخانه‌ها از دیرباز به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع تأمین آب مورد توجه انسان بوده‌اند، به طوری که تمدن‌های بزرگ برای بهره‌گیری از نعمت آب در حاشیه رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند و از این رو نقشی حیاتی در زندگی بشر ایفا کرده‌اند. در حال حاضر رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهمترین منابع قرضه مصالح سنگی محسوب می‌شوند. برداشت مصالح شن و ماسه‌ای از رودخانه‌ها با توجه به ویژگی‌های مورفولوژی، هیدرولیکی و ظرفیت حمل رسوب آن از یک سو و نحوه برداشت مصالح از سوی دیگر می‌تواند اثرات منفی یا مثبت بر آنها داشته باشد. در بعضی مناطق حجم بسیار زیاد مصالح و به عبارتی برداشت بی‌رویه و بدون رعایت اصول فنی موجب آثار منفی بر سیستم رودخانه و حتی مردم و تاسیسات حاشیه‌ای رودخانه شده است. حفره‌های برداشت در بستر رودخانه‌ها ماحصل این برداشت‌ها هستند که عموماً بر روی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه اثر منفی می‌گذارند به طوری که مشاهده شده است که ضرر و زیان ناشی از برداشت مصالح از رودخانه‌ها به مراتب بیشتر از عواید آن بوده است. لذا در چنین شرایطی ضروری است اثرات این فرآیند مورد توجه قرار گرفته و تمهیدات لازم نیز برای کاهش آن اندیشیده شود. کشور ایران جزو کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود و همین موضوع منجر گردیده که پروژه‌های عمرانی و زیربنایی متعددی در کشور با سرعت بالایی در حال اجرا باشد و بدیهی است تأمین مصالح مورد نیاز این طرح‌ها به عنوان یکی از شاخص‌های مهم و تعیین کننده در هزینه تمام شده، زمان اجرا و کیفیت طرح‌ها به شمار می‌آید. این موضوع باعث گردیده تا صرف اجرای پروژه‌ها به هر طریق ممکن نسبت به تأمین مصالح مناسب و سهل الوصول از هر جای ممکن اقدام گردد. استفاده از شن و ماسه از دیر باز به همراه پیشرفت انسان در عرصه‌های مختلف کاربرد بیشتری یافته است. شن و ماسه به عنوان مصالح ساختمانی در جاده‌ها و بزرگراه‌ها به عنوان مصالح زیراساس، اساس و عملیات روسازی، برای زیرسازی خطوط لوله و در صنایعی نظیر انواع ریخته‌گری، موزاییک سازی و ... نمونه‌هایی از عمده موارد مصرف شن و ماسه به شمار می‌آید که

ضرورت استفاده از این منابع را اجتناب ناپذیر می‌سازد. دو منبع مهم برای تامین این مصالح، معادن شن و ماسه و سایر مصالح رودخانه‌ای می‌باشند. نیاز به فراوری کمتر، سهل الوصول بودن و نزدیکی به جاده های حمل و نقل و محل مصرف منابع شن و ماسه که نهایتا بالا بردن ارزش اقتصادی آن را رقم می‌زند؛ از جمله دلایلی است که استفاده روز افزون از این منابع ارزشمند را به دنبال داشته است. از سوی دیگر نهشته‌های رودخانه‌ای مناسب معمولا نزدیک محل مصرف با جاده های دسترسی، قرار دارند که منجر به کاهش قیمت تمام شده مصالح می‌گردد. این مزایا، جایگاه ویژه‌ای به مصالح رودخانه‌ای داده و به همین دلیل موجب اعمال فشار زیادی بر این منبع طبیعی نسبت به گزینه‌ی معادن شن و ماسه کوهی می‌گردد. برداشت شن و ماسه از رودخانه اگرچه منافع سرشاری را برای عده‌ای محدود (برداشت کنندگان مصالح) فراهم می‌آورد و پروژه‌های عمرانی از آن بهره‌مند می‌گردند، ولی در عین حال اگر در قالب ضوابط فنی و بر طبق دستورالعمل‌های کنترل‌کننده انجام نگیرد، قطعاً موجب آثار منفی در بهم زدن تعادل طبیعی رودخانه، تخریب زمین‌های اطراف، آبریان و زیستگاه‌های پرندگان و جانوران منطقه خواهد شد (شکل ۱-۱). در این رهگذر رودخانه‌ها و مسیل‌ها نیز که از این منظر منابع مطلوب تامین شن و ماسه این طرح‌ها به شمار می‌آیند، شاهد خیل عظیم بهره‌برداری بی‌رویه و غیرفنی و بدون ملاحظه اثرات نامطلوب به هیدرولیک و محیط‌زیست رودخانه شده‌اند. برداشت شن و ماسه از رودخانه که نوعی دخل و تصرف در آن محسوب می‌شود، معمولا آثار منفی فراوان هیدرولیکی، فیزیکی و زیست‌محیطی به جا می‌گذارد و لذا در برخی کشورها برداشت مصالح رودخانه-ای به طور کلی ممنوع و یا بسیار محدود گردیده است که در شرایط فعلی و با توجه به طرح‌های عمرانی متعدد در کشور امکان‌پذیر نیست و متأسفانه به همین دلیل برداشت مصالح از بستر و سیلاب‌دشت رودخانه‌ها از گذشته تاکنون، وضعیت طبیعی بسیاری از رودخانه‌ها را تغییر داده و تبعات نامطلوب فراوانی برجای گذاشته است. برداشت مصالح از رودخانه منجر به تغییر در مشخصه‌های مورفولوژیکی و هیدرولیکی مجرا گردیده که به نوبه خود شرایط زیست محیطی موجود را تحت تاثیر

قرار می‌دهد و باعث از بین رفتن مطلوبیت زیستگاهی رودخانه و محیط پیرامون آن می‌گردد. افزایش مواد معلق رسوبی در مجاری آبی، تغییر در مقدار بار رسوبی، فرسایش رودخانه، افزایش عرض مجرا و به دنبال آن تغییر مسیر رودخانه، کاهش کیفیت آب، از بین رفتن زیستگاه آبزیان، ماندابی شدن آب و از بین رفتن برخی گونه‌های گیاهی و جانوری تنها بخشی از اثرات نامطلوب بهره‌برداری شن و ماسه از رودخانه‌ها به شمار می‌آید. البته چنانچه برداشت شن و ماسه تحت اصول فنی مناسب و مدیریت صحیح صورت گیرد نه تنها تبعات منفی آن به حداقل می‌رسد، بلکه به عنوان مثال می‌توان با برداشت جزایر رسوبی در مسیر جریان، عملکرد رودخانه و پایداری آن را نیز بهبود بخشید.



شکل ۱-۱- برداشت بی‌رویه شن و ماسه از رودخانه Sungai Kulim در مالزی

۱-۲- روش‌های استخراج شن و ماسه از رودخانه‌ها

استخراج شن و ماسه از رودخانه‌ها به دو روش عمده تقسیم شده است [۱]:

۱- استخراج از حفره مرطوب

استخراج از حفره‌هایی که در زیر تراز سطح سفره آب زیرزمینی یا در مجرای رودخانه‌های دائمی قرار دارند را استخراج از حفره مرطوب می‌نامند (شکل ۱-۲-الف).

۲- استخراج از حفره خشک

استخراج از بستر رودخانه‌های فصلی در زمان خشکی آنها و همچنین توده‌های انباشت شده نمایان که با استفاده از تجهیزات مکانیکی انجام می‌شود را روش استخراج خشک می‌گویند (شکل ۱-۲-ب).



(ب)



(الف)

شکل ۱-۲-استخراج مصالح الف) حفره مرطوب رودخانه سلمان رود استان گیلان، ب) حفره خشک رودخانه پلرود استان گیلان

علاوه بر استخراج شن و ماسه از رودخانه‌ها می‌توان استخراج از حفره‌های مجاور سیلاب دشت‌ها و یا تراس‌های رودخانه‌ای را نام برد که اگر بالاتر از تراز سطح سفره آب زیرزمینی انجام شود حفره ناشی از استخراج خشک و اگر پایین‌تر از تراز سطح سفره آب زیرزمینی باشد حفره مرطوب خواهد بود. جدایی این حفره‌ها از مجرای فعال رودخانه ممکن است فقط در زمان کوتاهی برقرار باشد و در طی

یک تغییر ناگهانی در جریان موجود در هنگام سیلاب یا جابجایی تدریجی مجرا، مجرا به سمت حفره- های شن و ماسه واقع در سیلاب دشت تغییر مسیر دهد. به این دلیل که حفره های واقع در سیلاب دشت می توانند به مجرای فعال متصل شوند در دراز مدت باید به عنوان استخراج های رودخانه ای در نظر گرفته شوند [۱]. (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳- استخراج مصالح از سیلاب دشت رودخانه Rio Tigre کاستاریکا [۲۸]

۱-۳- اثرات ناشی از برداشت مصالح در رودخانه ها

همانطوری که پیشتر اشاره شد بستر رودخانه ها اغلب به عنوان منابع مناسبی برای برداشت شن و ماسه برای بکارگیری آنها در پروژه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرند، ولی با توجه به عوامل مختلفی از قبیل:

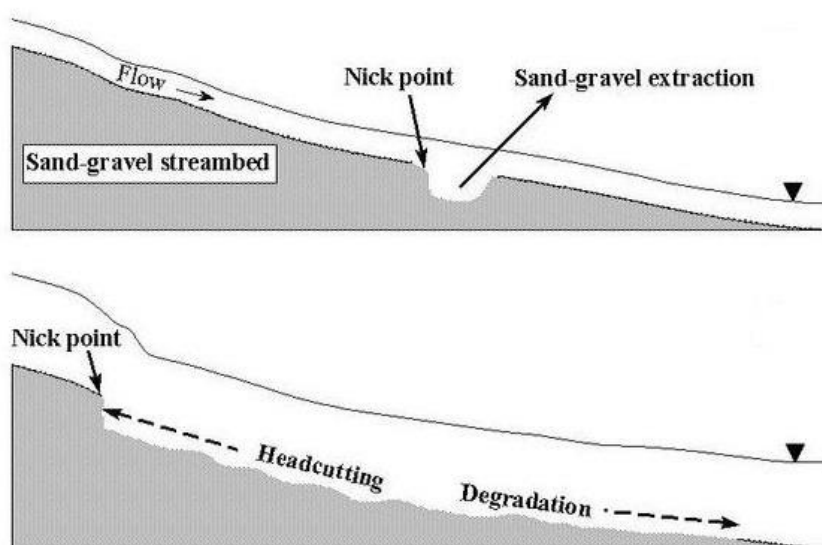
- فصلی که برداشت انجام می شود.
- طول بازه ای که از رودخانه مصالح از آن برداشت می شود.

- موقعیت محدوده پروژه
 - موقعیت توده‌های مصالح انباشت شده
 - روش انجام عملیات برداشت
 - مقدار مصالح برداشت شده
 - میزان پوشش گیاهی که در طی برداشت از بین می‌رود
 - شکل توده های مصالح انباشته شده باقی‌مانده پس از اتمام عملیات برداشت
 - مهارت و امکانات فنی برداشت کنندگان
- برداشت مصالح از بستر رودخانه اثرات گوناگونی از جنبه‌های مختلف هیدرولیکی، مورفولوژی، زیست-محیطی و اقتصادی بر رودخانه و تاسیسات وابسته خواهد داشت. این اثرات محدود به محل استخراج نبوده بلکه کیلومترها بالاتر و پایین و همچنین تا چندین سال پس از آن ظاهر می‌شوند. [۱] در ادامه برخی از پیامدهای مهم برداشت مصالح رودخانه‌ای ذکر می‌شود.

۱-۳-۱- فرسایش بستر و دیواره رودخانه

در برخی از موارد، برداشت مصالح در بستر آبراهه‌ها، ایجاد حوضچه‌هایی است که عمق آن‌ها به نسبت عمق جریان زیاد نیست، لذا هیدرولیک جریان در اطراف آن تغییر اساسی نمی‌کند و فقط موجب تغییر در ظرفیت حمل جریان می‌شوند. اما اگر حجم مصالح برداشتی از رودخانه آنقدر زیاد باشد که باعث ایجاد آبشارهایی با ارتفاع چند متر در مسیر جریان شود، رژیم رودخانه به شدت تغییر کرده و آب در محل شکستگی بصورت ریزشی جریان خواهد یافت. در محل این آبشارها سرعت جریان افزایش خواهد یافت که فرسایش بستر را به دنبال دارد. فرسایش بستر در اثر استخراج شن و ماسه به واسطه دو فرآیند اصلی زیر اتفاق می‌افتد: [۲۲]

با برداشت مصالح از آبراهه در محل برداشت گودالی ایجاد می شود که پایین تر از بستر طبیعی آبراهه است، بنابراین در نقطه اتصال بستر کانال به گودال ایجاد شده، بستر طبیعی دچار شکستگی می شود. وجود چنین ناحیه ای باعث افزایش ناگهانی شیب بستر و انرژی جریان می شود. با عبور جریان از این منطقه محل شکستگی به یک محل فرسایش پذیر تبدیل می شود که با گذشت زمان ضمن فرسایش این شکستگی، به سمت بالادست حرکت می کند. چنین فرآیندی را *Head Cuting* یا شکستگی کف آبراهه می گویند. این پدیده باعث می شود که مقادیر زیادی از رسوبات حمل شده توسط جریان در ناحیه گودال ته نشین شوند. در آبراهه هایی که آورد مصالح مناسب دارند (*Gravel-Rich*) اثر این پدیده ممکن است کوتاه مدت باشد و بعد از اتمام حفاری بین رسوبات وارد شده و حمل شده تعادل برقرار شود و گودال سریعاً بازسازی شود. اما در آبراهه هایی که از نظر آورد مصالح فقیر هستند (*Gravel-Poor*) ممکن است سالیان متمادی بستر آبراهه ترمیم نشود و یا حتی بطور دائم در حال گسترش باشد. پدیده *Head Cuting* در فواصل طولانی به سمت بالادست حرکت می کند و حتی وارد سر شاخه ها هم می شود. در بعضی از حوزه های آبریز این پدیده در برخورد با سطح مقاوم بستر یا بستر سنگی یا سازه های ساخت بشر متوقف می شود. شکل ۱-۴ پدیده *Head Cuting* را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۴-۱- تغییرات بستر آبراهه تحت اثر پدیده Head Cutting [۲۲]

۳-۱-۲- فرآیند Hungry Water

این پدیده را که می‌توان آب حریص یا گرسنه نامید، در مواقعی اتفاق می‌افتد که مقدار رسوبات حمل شده کمتر از ظرفیت حمل جریان باشد. به عبارت دیگر در مواقعی که جریان آب بیشتر از آنچه که حمل می‌کند تمایل به حمل رسوب داشته باشد این پدیده اتفاق می‌افتد. حفر یک گودال بطور موضعی باعث افزایش عمق جریان می‌شود. همچنین رویه‌برداری از رسوبات بستر (Bar-Skimming) باعث افزایش عرض جریان می‌شود. هر دوی این وضعیت‌ها باعث کاهش سرعت جریان در آبراهه و به تبع آن کاهش انرژی جریان می‌شوند. بنابراین ظرفیت حمل رسوب کاهش یافته و همین امر باعث می‌شود رسوبات وارد شده از بالادست در محل حفاری ته‌نشین شوند. در نقطه ای که جریان آبراهه از محل گودال به بستر پایین دست می‌رسد، عمق و عرض آبراهه به حالت اول خود برمی‌گردد و سبب افزایش انرژی جریان در پایین دست می‌شود. با افزایش انرژی جریان، ظرفیت حمل رسوب افزایش یافته و جریان تمایل دارد تا رسوبات بیشتری را حمل کند در نتیجه باعث فرسایش بستر در پایین دست گودال شده و باعث پایین افتادگی بستر می‌شود. این پدیده باعث انتقال گودال به پایین دست می‌شود.

فرسایش بستر نه تنها سبب ناپایداری قائم در بستر مجرا می‌شود بلکه سبب ناپایداری افقی به شکل تسریع فرسایش دیواره های رودخانه و عریض کردن مجرا خواهد شد. فرسایش بستر، ارتفاع دیواره‌ها را افزایش می‌دهد و زمانی که خواص مکانیکی مصالح دیواره‌ها نتوانند وزن مصالح را تحمل کنند این افزایش ارتفاع به شکست و فروریزش دیواره منجر خواهد شد.[۱]

۱-۳-۲- رسوب‌گذاری

یکی دیگر از آثار استخراج مصالح از بستر رودخانه رسوب‌گذاری است. حرکت لایه های ناپایدار محل استخراج موجب رسوب‌گذاری در قسمتهای پایین‌دست می‌شود. رسوب‌گذاری می‌تواند اثرات مضر از قبیل کم کردن ظرفیت آب‌گذری مجرا، تخریب محل زیست آبزیان و ... را به همراه داشته باشد. [۱] رسوبات معلق در آب ورود نور به داخل آب را کاهش داده و ته‌نشینی آنها بستر رودخانه را زیر لایه‌ای از نهشته قرار می‌دهد. این امر سبب اختلال در تنفس و فتوسنتز گیاهان آبی غوطه‌ور در آب شده و از طرفی سبب اختلال در تولید مثل آبزیان شود.[۲]

۱-۳-۳- تاثیرات ناشی از موقعیت محل استخراج در رودخانه

برداشت مصالح از رودخانه می‌تواند منشا آثاری در شکل و مسیر رودخانه باشد که این امر بستگی به حجم مصالح برداشت شده، عمق و ابعاد آن و موقعیت محل استخراج دارد. حفاری در حاشیه بستر رودخانه و عمیق کردن حفره برداشت موجب انحراف جریان رودخانه به سمت حفره خواهد شد، این امر به تخریب دیواره رودخانه و به مرور مماندیری شدن رودخانه می‌انجامد. البته برداشت مصالح از کناره‌های رودخانه سبب عریض شدن رودخانه شده و این تعریض به افزایش ظرفیت آب‌گذری و عبور سیلاب رودخانه کمک می‌کند که در حقیقت اثر مثبتی است، اما تداوم آن به تخریب زمین‌های اطراف منجر خواهد شد. از طرف دیگر اگر برداشت مصالح در محدوده وسط بستر رودخانه انجام گیرد، به مرور شاهد کاهش شیب رودخانه بوده که این عامل از تمایل مماندیری شدن رودخانه می‌کاهد. در صورتی که برداشت مصالح از قسمت قوس داخلی پیچ رودخانه‌ها انجام گیرد، شرایطی فراهم می‌شود

که رودخانه دائما در محدوده قوس داخلی پیچ رسوب‌گذاری می‌کند و همین امر به تثبیت قوس و کاهش شدت مئاندري شدن رودخانه می‌انجامد که قطعا تاثیر مثبت از دید مورفولوژیکی بر شرایط رودخانه است. [۱]

سیلاب دشت‌ها نیز مکان‌های ذخیره شدن رسوبات در رودخانه‌ها می‌باشند که شامل مقادیر قابل توجهی از شن و ماسه هستند. حوزه‌های برداشت در سیلاب دشت معمولا تا زیر سفره آب زیرزمینی ادامه دارد. برداشت از سیلاب دشت‌ها می‌تواند هسته ناپایدار بزرگی در مجاورت آبراهه ایجاد نماید و این هسته سبب جابجایی آبراهه به سمت سیلاب دشت شده که به این پدیده تسخیر (Capture) آبراهه توسط سیلاب دشت می‌گویند. تسخیر مجرا اغلب به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد و معمولا در جایی رخ می‌دهد که حوزه برداشت مصالح در برابر جریان‌های سیل کم مقاومت است. [۱]

۴-۱- ضرورت انجام تحقیق

درحال حاضر عدم شناخت کافی از عواقب هیدرولیکی و زیست‌محیطی برداشت‌های بی‌رویه شن و ماسه رودخانه‌ای و نیز عدم اعمال دستورالعمل‌های مشخص در خصوص کاهش این اثرات باعث گردیده تا نسبت به این گونه بهره‌برداری‌ها از رودخانه‌های کشور با اغماض برخورد شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که درحال حاضر از هزاران منبع شن و ماسه رودخانه‌ای درحال برداشت صرفا تعداد کمی دارای مطالعات فنی و بررسی اثرات زیست‌محیطی آن هم به صورت محدود و سلیقه‌ای در کشور می‌باشند. این در حالی است که اثرات نامطلوب برداشت‌های بی‌رویه علاوه بر زمان دوره برداشت به دوره‌های زمان طولانی حتی پس از خاتمه عملیات بهره‌برداری و نیز مکان‌های بالادست و پایین‌دست محدوده برداشت منتهی می‌گردد، لذا ضرورت انجام مطالعات مربوط به امکان‌سنجی برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها و ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات ناشی از برداشت مصالح از لحاظ هیدرولیکی کاملا ضروری است. انجام این تحقیق کمک شایانی به کنترل و احیای حفره

برداشت مصالح از رودخانه خواهد کرد و نتایج آن برای مدیریت بهره‌برداری و برداشت مصالح رودخانه‌ای می‌تواند به منظور اجرا در رودخانه‌های کشور بسیار موثر و مفید باشد.

۱-۵- نوآوری تحقیق

بیشتر تحقیقات صورت گرفته در خصوص برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه محدود به بررسی تاثیرات مخرب آن بر هیدرولیک جریان، میزان بار رسوبی و تاثیرات مخرب مورفولوژیکی و زیست محیطی آن است و تاکنون مطالعه برای کنترل و مدیریت این پدیده پیشنهاد نشده است. از طرفی مطالعات آزمایشگاهی و عددی در این حوزه محدود بوده و بیشتر مطالعات بصورت میدانی و موردی بوده است. در این تحقیق توسط مطالعه آزمایشگاهی و عددی راهکارهای مفید برای مدیریت برداشت مصالح رودخانه ای و احیای حفره با در نظر گرفتن آورد رودخانه مورد بررسی قرار می‌گیرد که تاکنون از این منظر پژوهشی صورت نگرفته است.

۱-۶- اهداف تحقیق

اهم اهداف قابل دستیابی در این پژوهش عبارتند از:

- بررسی تاثیر جانمایی حفره، از قبیل فاصله بین حفره‌های برداشت، شکل برداشت و فاصله حفره‌ها از دیواره و عمق برداشت در احیای حفره برداشت مصالح
- دستیابی به بهترین حالت حفره برداشت با توجه به تغییرات عوامل تاثیرگذار برای احیا توسط آورد رسوب رودخانه
- بررسی رفتار حفره (بلحاظ فرسایش و رسوب‌گذاری) و تحلیل آن

۱-۷- ساختار پایان نامه

این پایان نامه مشتمل بر پنج فصل می باشد که عبارتند از:

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

فصل سوم: مواد و روش ها

فصل چهارم: بررسی نتایج آزمایشگاهی و عددی

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه ی پیشنهادها

فصل دوم:

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مقدمه

تحقیقات آزمایشگاهی و یا عددی بر روی جانمایی حفره برداشت مصالح رودخانه‌ای بسیار اندک بوده و بیشتر مطالعات به صورت میدانی و موردی است لذا در این فصل ابتدا به بررسی مطالعات آزمایشگاهی، عددی و میدانی صورت گرفته در داخل کشور در حوزه برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداخته شده و سپس مطالعات انجام شده در خارج کشور ارائه شده است.

۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده داخلی

برطبق نشریه شماره ۳۳۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با عنوان راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای، پارامترهای زیر باید در هنگام برداشت در نظر گرفته شوند [۱]:

- ۱- منطقه برداشت باید حداقل دارای فاصله ۵۰۰ متر از نواحی زیر باشد:
 - نواحی با ریسک بالای فرسایش آبراه
 - محل‌های شناخته شده به عنوان محل‌های تخم‌ریزی ماهیان
 - آبگیرهای تأمین آب شرب یا آبیاری
 - نواحی حفاظت شده ساحل رودخانه‌ای
- ۲- مقاطعی از رودخانه که دارای جریانی با عمق کم، سرعت زیاد و شیب زیاد هستند، نباید برای برداشت مصالح در نظر گرفته شوند.
- ۳- از فاصله کمتر از ۵۰۰ متری نواحی مسکونی در کناره رودخانه نباید برداشت صورت گیرد.
- ۴- برداشت مصالح از موانع و پشته‌های رسوبی و جزایر کوچکی که در بین رودخانه ایجاد می‌گردد، عمق نرمال رودخانه ملاک نسبتاً مناسبی برای تعیین حجم برداشت می‌باشد. برداشت این انباشته‌ها و جزایر، در حدی که بستر رودخانه از تراز معمول خود پایین‌تر نرود، کمترین

تغییر را در رژیم جریان ایجاد خواهد نمود. علاوه بر آن، برداشت موانع در مسیر جریان می-تواند موجب افزایش ظرفیت آبگذری و همچنین کاهش فشار جریان بر کناره‌ها گردد.

۵- در صورتی که امکان تهیه مصالح (به میزان کافی) از نواحی بدون پوشش گیاهی سیلاب‌دشت وجود داشته باشد (مشروط بر تأمین مناطق حایل مورد نیاز)، نباید مناطق با پوشش گیاهی دست‌خورده شوند.

۶- هنگامی که امکان چشم‌پوشی از نواحی با پوشش گیاهی وجود نداشته باشد، معمولاً مطلوب است که منطقه برداشت مصالح در نواحی وسیع با پوشش گیاهی رشد یافته همگن در نظر گرفته شوند.

۷- منطقه برداشت باید در همان سمتی در نظر گرفته شود که مصالح مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این امر، نیاز به عبور از آبراه فعال را به حداقل می‌رساند.

برطبق نشریه شماره ۵۶۳ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با عنوان ضوابط زیست محیطی برداشت مصالح رودخانه ای اشاره شده که به منظور برداشت مشخصات آبراه شامل طول، عرض، عمق، سرعت و دبی جریان، نمونه‌برداری تا ۵۰۰ متر بالاتر و پایین‌تر از محل برداشت کافی است. همچنین محل استخراج شن و ماسه در رودخانه را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند [۲]:

- استخراج شن و ماسه باید خارج از مسیر اصلی رودخانه باشد و محل تجمع آنها نیز به اندازه کافی از مسیر رودخانه فاصله داشته باشد.
- بهره‌بردار باید تمام مراحل شستشو، خرد کردن و دانه بندی شن و ماسه را در ساحل بلند، در یک زمین غیرمرطوب و دور از ناحیه سیل خیز انجام دهد، به طوریکه آب گرم و راکد حاصل از شستشو که حاوی مواد ریزدانه است، نتواند وارد رودخانه یا زمین‌های مرطوب شود.
- در برداشت از سیلاب دشت حتی المقدور از تسطیح پوشش گیاهی خودداری شود.

- در برداشت از سیلاب دشت، ایجاد یک حفاظ حایل بین حفره و مجرای فعال پیش بینی شود.

- در برداشت از جزایر رسوبی باید نوارهای حایل با حداقل عرض لازم برای کنترل جریان رودخانه طوری پیش بینی شوند که ناحیه استخراج را از مجرای جریان جدا نمایند.

- برداشت فقط در زمان پایین بودن سطح جریان آب (تراز آب) انجام شود.

- برداشت مصالح از قوس داخلی رودخانه باعث می شود که جهت جریان به سمت قوس داخلی متمایل شده و از تند شدن قوس جلوگیری شود. ضمناً با این عمل ظرفیت عبور سیلاب افزایش یافته و عدم جابه جایی عرضی و نهایتاً پایداری بستر را خواهد داشت.

فرهاد زاده (۱۳۷۹) به بررسی آزمایشگاهی جابجایی حفره ناشی از برداشت شن و ماسه از بستر در کانال مستقیم پرداختند. آزمایش ها در کانالی به طول ۱۰ متر و عرض ۶۰ سانتی متر و با مصالحی با متوسط قطر ۱/۴ میلیمتر انجام شد. ایشان تاثیر طول و عرض حفره را بر سرعت مهاجرت حفره بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عرض حفره باعث افزایش و افزایش طول آن باعث کاهش سرعت حرکت حفره می شود. همچنین افزایش طول و عرض حفره باعث کاهش نرخ پرشدن حفره می گردد که در این میان تاثیر عرض بیشتر به نظر می رسد [۳].

اقبال زاده (۱۳۸۰) به بررسی جابجایی حفره ناشی از برداشت ماسه در بستر کانال دارای انحنای ۱۸۰ درجه پرداختند. ایشان در آزمایشهای انجام شده حفره هایی در مجاور جداره داخلی در قوس تعبیه کرد. نتایج نشان می دهد که در پایین دست تمام حفره ها فرسایش اتفاق می افتد و در نتیجه توده رسوبی در پایین دست حفره تشکیل می شود و به سمت پایین دست حرکت نموده و در بالادست حفره ها رسوب گذاری انجام شده و مقداری از حجم حفره ها پر شده است [۴].

امینی (۱۳۸۰) به بررسی آزمایشگاهی و میدانی جابجایی حفره برداشت مصالح پرداختند. در بخش میدانی با حفر گودال هایی بر روی رودخانه گاورود در استان کردستان نحوه تغییرات این گودال ها ثبت شد. در مطالعه آزمایشگاهی با ایجاد حفره هایی در کف فلوم، اثر طول و عمق حفره و دبی جریان بر

جابجایی آنها مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها عرض حفره ثابت و برابر عرض کانال بوده و از سه عمق متفاوت و دو طول مختلف و دو مقدار دبی جریان استفاده شده است. همچنین متوسط قطر مصالح ۱/۴ میلیمتر انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت جابجایی حفره‌ها با دبی جریان نسبت مستقیم و با طول و عمق حفره نسبت عکس دارد. از بین پارامترهای ذکر شده عمق حفره بیشترین اثر را بر جابجایی داشته است [۵].

نوحه گر و محمودی (۱۳۸۲) با بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر شکل بستر و رژیم رودخانه میناب به نتایج زیر دست یافتند [۶]:

- چاله‌های ناشی از برداشت مصالح بر نیمرخ سطح آب و مسیر جریان تاثیرگذار هستند که وسعت و عمق بیشتر آنها تاثیرات بیشتری بدنبال خواهد داشت. بنابراین چاله‌های بیشتر باعث افزایش بیشتر افت سطح آب و افزایش سرعت جریان در بالادست می‌شود که با افزایش فرسایش در بالادست همراه است.
 - فاصله بین چاله‌ها باید رعایت شود چون ایجاد چاله در بستر رودخانه باعث رسوب‌گذاری توسط جریان خواهد شد به طوری که جریان عبوری از چاله‌ها ذرات درشت خود را در چاله‌ها بر جای نهاده و سایر ذرات پس از عبور از چاله، دارای ابعاد کوچکتری خواهد بود.
 - چاله‌های برداشت به صورت منحنی بسته باشند و از ایجاد شیار در طول رودخانه پرهیز شود.
- مودن و همکاران (۱۳۸۵) با بررسی اثرات زیست محیطی برداشت شن و ماسه بستر رودخانه جراحی به نتایج زیر دست یافتند [۷]:

- تیرگی گوشت ماهیان ناشی از تغییر اکسیژن محلول در آب
- کاهش کیفیت آب در اثر کاهش سرعت جریان در چاله

- فرسایش و عمیق‌تر شدن بستر رودخانه و عریض‌تر شدن نیمرخ عرضی که باعث کاهش ارتفاع سطح و کند شدن سرعت جریان و فرسایش بالادست و پایین‌دست شده و می‌تواند سبب ناپایداری سواحل، پل‌ها و تاسیسات آبی شود.
- عصمت و همکاران (۱۳۸۷) اثرات زیست محیطی برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه نازلوچای ارومیه بر اکولوژی رودخانه را بررسی کرده و به نتایج زیر دست یافتند [۸]:
برداشت بی‌رویه شن و ماسه ۳ اثر بنیادی بر این رودخانه دارد:
- تغییرات کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب
- تغییر در الگوی جریان طبیعی آب و در نتیجه تغییر و دگرگونی در مقطع طولی و عرضی رودخانه به دلیل عمیق‌تر سازی بستر و تشدید فرسایش در حاشیه رودخانه
- افزایش بار مواد رسوبی معلق در اثر تخلیه آب مورد استفاده در برداشت شن و ماسه
- عسگری (۱۳۸۸) به بررسی تأثیرات برداشت شن و ماسه و مصالح رودخانه‌ای بر روی سواحل و عرض رودخانه‌ها و مسیل‌ها و اثرات زیست محیطی آنها پرداختند. در این تحقیق از مدل SPH-1D و بازه‌ای از رودخانه فاروب رومان نیشابور به طول ۷ کیلومتر استفاده شد. هندسه کانال با استفاده از توپوگرافی رودخانه به مدل معرفی شد. نتایج نشان می‌دهد که فرسایش بیشتر در نقاط پایین‌دست و بالادست گودال‌های برداشت مصالح، قسمت‌های با شیب طولی بالا و مقاطع V شکل رخ می‌دهد و رسوب‌گذاری در محل گودال‌های برداشت مصالح و مقاطع عرضی عریض و نقاط کم شیب اتفاق می‌افتد. همچنین اثرات سیلاب‌های متوالی بر روی گودال‌های فرضی مورد بررسی قرار گرفت و ابعاد مناسب گودال‌های مجاز به طور نسبی تعیین شد [۹].
- فقیهی (۱۳۸۸) به بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر مورفولوژی و هیدرولیک رودخانه کرخه با توجه به بهره‌برداری از سد مخزنی کرخه پرداختند. در این مطالعه از مدل HEC-RAS.04 استفاده شد و در مجموع ۱۱ نقطه دارای پتانسیل برای برداشت مصالح مشاهده شد که میانگین طول هر یک

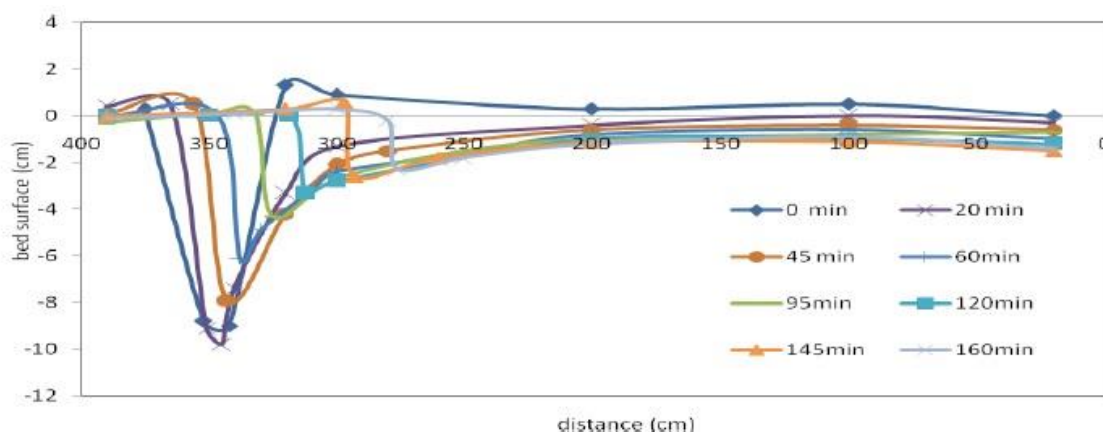
۴۰۰ متر و عرض هر کدام ۷۰ متر است. همچنین میزان نشست در این ۱۱ منطقه ۳۱ سانتی‌متر محاسبه شد [۱۰].

هدایتی پور (۱۳۸۹) تاثیر برداشت شن و ماسه بر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS.04 را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق رودخانه خشکه‌رود فارسان انتخاب شد و بررسی‌ها برای قبل و بعد از برداشت مصالح در مدل انجام شد. در این تحقیق از ۷ روش انتقال رسوب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بستر رودخانه در بازه قبل تا بعد از برداشت مصالح به طور متوسط ۲/۰۲ متر فرسایش داشته که بیشترین مقدار آن ۴ متر و کمترین مقدار آن ۰/۰۵ متر بوده است. همچنین حجم خروجی رسوب از مقطع آخر در شرایط بعد از برداشت مصالح نسبت به قبل از برداشت ۱۲ درصد کاهش داشته اما تنش برشی ۲۶ درصد افزایش داشته است. نتایج نشان می‌دهد که رودخانه به سمت متعادل شدن پیش می‌رود و اگر مجدداً برداشت مصالح تکرار شود فرسایش شروع خواهد شد [۱۱].

امیری تکلدانی و عزیزیان (۱۳۸۹) به بررسی تعیین مکان‌های مناسب برداشت مصالح رودخانه ای با استفاده از مدل عددی 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 ۱، ۲ و ۳ متر و دیگری برداشت مصالح از کناره‌های رودخانه با عرض ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متر است انجام دادند. نتایج مدل HEC-RAS.04 در تعیین تنش برشی برای سیلاب ۲ و ۵ ساله نشان داد که تاثیر تعمیق بیشتر از تاثیر تعریض بوده و تنش برشی شدیدتری ایجاد می‌کند [۱۲].

غفوری آذر و همکاران (۱۳۹۰) 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 رسوب، شیب در بازه برداشت افزایش پیدا کرده و باعث افزایش تنش برشی در بالادست می‌شود. در نتیجه رسوبات به صورت بار

بستر حرکت کرده و هنگامی که به محل حفره می‌رسند، چون عمق آب افزایش و سرعت آب کاهش می‌یابد جریان قادر به حمل رسوبات بزرگتر نبوده، در نتیجه رسوبات بزرگتر در دیواره بالادست ته نشین می‌شوند. چنانچه میزان رسوبی که به همراه جریان از محل گودال می‌گذرد کمتر از ظرفیت حمل رسوب باشد؛ موقعی که به مکان پایین‌تری می‌رسد، مقدار بیشتری از رسوبات را بر می‌دارد که این امر باعث شستگی و از بین رفتن بستر در پایین دست می‌شود. این پدیده تا جایی که میزان رسوب ورودی و خروجی در محل به تعادل برسد و محل بازسازی شود ادامه می‌یابد. در اثر برداشت شن و ماسه با گذشت زمان، جریان سبب می‌شود که رسوبات از بالادست حفره برداشته شده و با رسوب‌گذاری در دیوار بالادست و فرسایش در دیوار پایین دست در طول رودخانه منتقل شود [۱۳]. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲- پیشروی حفره برداشت مصالح با گذشت زمان [۱۳]

روشان و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی برآورد بار کل رسوبی و تعیین ظرفیت برداشت مصالح بستر رودخانه زارم رود مازندران پرداختند. ایشان با استفاده از سه مدل رگرسیونی توانی در محیط نرم-افزاری SPSS و EXCEL میزان بار کل رسوبی سالیانه این رودخانه را به میزان ۳۸۷۹/۹ تن تعیین کردند که میزان برداشت مجاز آن سالانه ۳۸۰/۵۲ تن معادل ۱۰ درصد است که در اثر برداشت بیشتر از این مقدار، غیر مجاز محسوب شده و سبب تغییرات مورفولوژیکی و هیدرولیکی رودخانه خواهد شد [۱۴].

قهرمانی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از برداشت بی‌رویه مصالح رودخانه‌ای در محورهای اصلی برداشت شهر مشهد به این نتیجه رسیدند که برداشت بی‌رویه شن و ماسه از بستر رودخانه سبب تخریب اراضی کشاورزی، کاهش محصولات زراعی، تخریب سازه‌هایی مثل پل، راه آهن، راه و خطوط انتقال آب و گاز و از بین رفتن زیستگاه ماهیان می‌شود. ایشان استفاده از منابع قرضه معدنی و کوهی را در این منطقه برای استفاده به جای مصالح رودخانه‌ای پیشنهاد کردند [۱۵].

اسدی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی برآورد رسوب و تعیین ظرفیت برداشت شن و ماسه رودخانه لار با استفاده از مدل ریاضی پرداختند. در این تحقیق بازه‌ای به طول ۱۲/۵ کیلومتر در نظر گرفته شد و با استفاده از دو مدل GSTARS2/1 و HEC-RAS.04 تغییرات فرسایش و رسوب مورد بررسی قرار گرفت. آورد رسوب معلق برای دوره آماری ۱۸ ساله ۱۵۳۲۱۲ تن است. همچنین معادله انتقال رسوب یانگ در مدل GSTARS2/1 و میر پیتر مولر در مدل HEC-RAS.04 بیشترین تطابق را با واقعیت داشته اند [۱۶].

شایان و همکاران (۱۳۹۲) استخراج و اندازه‌گیری تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کشکان ناشی از برداشت شن و ماسه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ۱۴ کیلومتر از این رودخانه مورد بازدید میدانی قرار گرفت. برای این منظور از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده و همچنین از نرم‌افزار ARC GIS برای برداشت اطلاعات عرض بستر در محل خمیدگی‌ها، جابجایی رود در محل خم، بالاترین و پایین‌ترین شعاع دایره مماس بر رودخانه در دو بازه زمانی ۸ ساله استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بسیاری از تغییرات بوجود آمده در خمیدگی رود ناشی از برداشت شن و ماسه طی یک دوره کوتاه مدت برداشت است [۱۷].

خیرفام و صادقی (۱۳۹۳) به بررسی تاثیر برداشت شن و ماسه بر میزان بار رسوبی و دانه‌بندی بار بستر رودخانه کجور مازندران پرداختند. ایشان در یک مطالعه میدانی با نمونه‌گیری از ۱۲ نمونه

رسوب معلق و بستر برای بررسی میزان انتقال بار معلق و بستر و ۳ نمونه برای تغییرات قطر آن در شرایط بدون و با برداشت محلی شن و ماسه به نتایج زیر دست یافتند [۱۸]:

- پس از برداشت شن و ماسه از رودخانه بار معلق بین ۳۰۰ تا ۵۴۷ درصد و بار بستر به طور متوسط ۱۱۳۰ درصد و نسبت بار بستر به بار معلق به طور متوسط ۱۲۰ درصد بیشتر از حالت بدون برداشت مصالح است.

- قطر d_{10} بار بستر برای شرایط با برداشت کم، متوسط و شدید به طور متوسط ۱۷، ۲۴ و ۳۵ درصد افزایش داشته و قطر d_{50} نیز در شرایط با برداشت کم و متوسط ۲۱ درصد افزایش داشته و در شرایط با برداشت زیاد رفتاری پیچیده دارد.

۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده خارج از کشور

لی و همکاران (۱۹۹۳) به بررسی آزمایشگاهی مهاجرت حفره برداشت مستطیلی با دانه‌بندی یکنواخت در کانالی به طول ۱۷ متر و عرض ۰/۶ متر پرداختند. آزمایش‌ها با پنج اندازه مختلف چاله و با شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شد. رسوبات مورد استفاده آنها دارای متوسط قطر مصالح ۱/۴ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۱/۲ بود. 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 ماکزیمم عمق آبستگی کم و بیش ثابت می‌ماند و مرحله دوم را دوره پخشیدگی نامیدند که در این مرحله ماکزیمم عمق آبستگی با گذشت زمان شروع به کاهش می‌کند. ایشان دریافتند که ماکزیمم عمق آبستگی در انتهای دوره انتقال رخ می‌دهد. همچنین روابطی برای تعیین ماکزیمم عمق آبستگی و سرعت مهاجرت حفره بیان کردند [۲۳].

دکر و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی اثرات ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای بر زندگی و محیط زیست ماهیان در رودخانه‌های ایالت Georgia در آمریکا پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که برداشت مصالح اثرات زیان‌آوری بر شرایط زیست محیطی ماهیان به جای می‌گذارد [۲۴].

رامون (۲۰۰۳) با پیمایش میدانی رودخانه Ebro در اسپانیا، اثرات کمبود رسوب بر اثر احداث سد و برداشت شن و ماسه از این رودخانه را مورد بررسی قرار داد و معایب و خسارات ناشی از آن را بر محیط زیست، اکوسیستم رودخانه و سازه‌های رودخانه‌ای از قبیل پل ها و ... را بیان کرد و پیشنهاد-هایی در خصوص کاهش این خسارات از جمله تغذیه مصنوعی رسوب در پایین‌دست را ارائه کرد [۲۵].

بوداغ پور و هاشمی (۲۰۰۸) در مطالعه میدانی رودخانه چشمه کیل در شمال ایران، اثرات زیست محیطی برداشت بی‌رویه شن و ماسه از این رودخانه را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند برداشت شن و ماسه سبب ته نشست رس و لای شده و سبب می‌شود لایه نفوذ ناپذیر ایجاد شود و این امر از نشت آب به سفره‌های آب زیر زمینی جلوگیری می‌کند. همچنین اگر تا ۲۰۰۰۰۰ تن مصالح بستر رودخانه برداشت شود خطر مورفولوژیکی و زیست محیطی جدی این رودخانه را تهدید نمی‌کند [۲۶].

ارسکین و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی میدانی در رودخانه Hunter استرالیا و با نمونه‌برداری و برآورد بار بستر در ۵ ایستگاه این رودخانه به این نتیجه رسیدند که میزان برداشت شن و ماسه در این رودخانه سبب از بین رفتن لایه آرمور شنی و کاهش ارتفاع بستر شده و مقدار برداشت آن بیشتر از مقدار آورد رسوب سالیانه است [۲۷].

پادمالال و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی اثرات ناشی از برداشت شن و ماسه از رودخانه‌های هند پرداختند. ایشان با اندازه‌گیری‌های میدانی به این نتیجه رسیدند که برداشت مصالح سبب کاهش ۷ الی ۱۵ سانتی متری در تراز بستر می‌شود. همچنین حجم برداشت مصالح ۴۰ برابر بیشتر از حد مجاز تخمین زده شد. تاثیرات برداشت از رودخانه در جدول ۲-۱ ارائه شده است [۲۸]:

جدول ۱-۲- تاثیرات برداشت شن و ماسه از رودخانه‌های هند [۲۸]

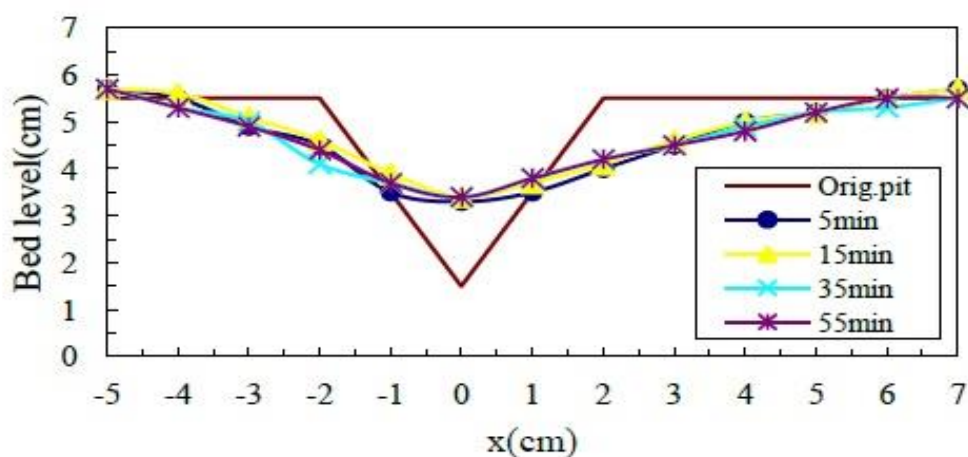
مولفه ها	تاثیرات برداشت مصالح
مقطع رودخانه	فرسایش و ریزش دیواره‌ها، پایین افتادگی تراز بستر، تغییر در ساختار بستر رودخانه، تحت تاثیر قرار گرفتن سازه‌های هیدرولیکی از قبیل پل‌ها
سطح آب	افزایش ارتفاع رسوبات معلق تا سطح آب، تیرگی و آلودگی آب بدلیل استفاده از ماشین آلات، افزایش جذب نمک آب
آب زیرزمینی	پایین افتادگی تراز آب زیرزمینی، آسیب به سفره‌های آب زیرزمینی
گیاهان و جانوران	کاهش تنوع گیاه در حوزه رودخانه، برهم زدن زیستگاه و تخم‌ریزی ماهیان، از بین بردن زیستگاه حشرات
فرهنگ	آسیب به مناظر طبیعی رودخانه و کاهش گردشگری
ساحل	کاهش رسوب ورودی به سمت ساحل و کاهش تامین عناصر غذایی به دریا

ملتون (۲۰۰۹) به بررسی میدانی اثرات برداشت شن و ماسه از رودخانه Rio Tigre کاستاریکا پرداخت. ایشان به این نتیجه رسیدند که برداشت مصالح از رودخانه اثرات زیان‌بار زیر را به دنبال دارد [۲۹]:

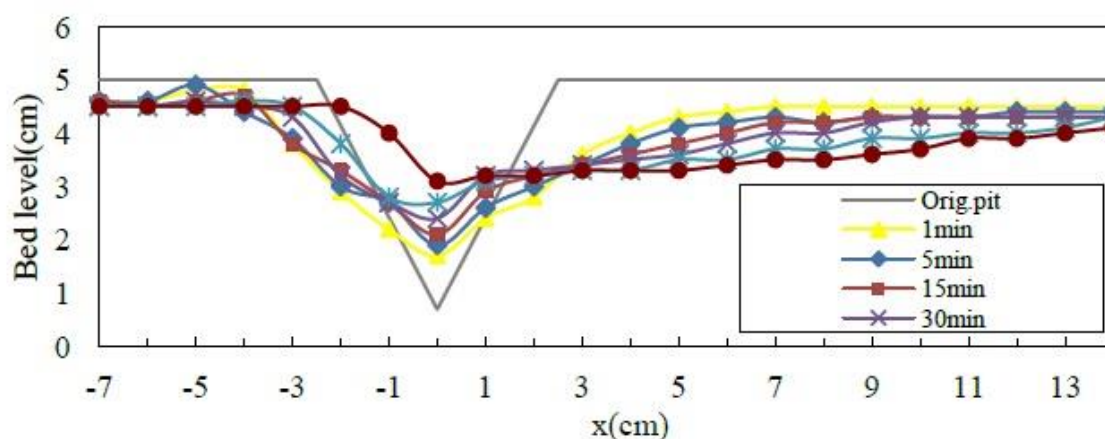
- پایداری رودخانه را به دلیل از بین بردن لایه آرمور به هم می‌زند.
- تعریض بستر رودخانه به واسطه برداشت شن و ماسه سبب پخش آب به ناحیه‌های مجاور شده و از عمق جریان در رودخانه می‌کاهد. در نتیجه سبب افزایش سرعت جریان شده و فرسایش بستر را به همراه خواهد داشت.
- اگر برداشت مصالح سبب تعمیق بستر شود، سیلاب به مقدار کمتری در سیلاب دشت پخش شده و سبب افزایش سرعت در رودخانه و به دنبال آن سبب فرسایش در پایین دست می‌شود.

اشرف و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی میدانی در رودخانه Selangor مالزی با نمونه برداری از ۴ منبع برداشت شن و ماسه از این رودخانه و دانه بندی آنها و مشخص شدن درصد شن و ماسه و ریزدانه و با استفاده از نرم افزار HEC-RAS.04 هیدرولیک و انتقال رسوب جریان را مدلسازی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که برداشت شن و ماسه، باربستر در محل برداشت را کاهش و علاوه بر آن قدرت حمل جریان در پایین دست را افزایش و فرسایش بالادست و کناره رودخانه را در پی داشته و میزان گل آلودگی و اندازه و نوع رسوبات انتقالی را نیز تغییر داده است [۳۰].

لی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی و عددی جابجایی حفره برداشت مصالح پرداختند. آزمایش‌ها در دو حالت آب زلال و بستر متحرک در کانالی به طول ۶ متر و عرض و ارتفاع ۲۵ سانتی متر با حفره برداشت مثلثی شکل و متوسط قطر مصالح ۰/۶ میلی متر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد در شرایط آب زلال حفره جابجا نشده بلکه زاویه قرارگیری مصالح به دلیل فرسایش لبه بالادست و پایین دست کاهش یافته و سبب پر شدن قعر حفره می‌شود. در واقع پدیده Head Cuting و Hungry Water اتفاق افتاده و از طرفی شیب بالادست حفره بعد از آزمایش بیشتر از شیب پایین دست آن بوده که نشان دهنده فرسایش بیشتر در پایین دست است. در شرایط بستر متحرک پدیده Head Cuting اتفاق افتاده اما به دلیل ورود بار بستر، شیب بالادست حفره پر شده و در زاویه قرارگیری استقرار مصالح قرار می‌گیرد. اما در پایین دست پدیده Hungry Water اتفاق افتاده و موجب فرسایش می‌شود. در مدل عددی توسط نرم افزار فلوئنت و با مدل آشفتگی k-ε میدان جریان با مطالعه آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده و نتایج نشان می‌دهد که گردابه طولی در درون حفره با مهاجرت حفره تضعیف می‌شود و بیشترین تنش برشی بستر در لبه بالادست و پایین دست حفره اتفاق می‌افتد [۳۱]. (شکل ۲-۲).



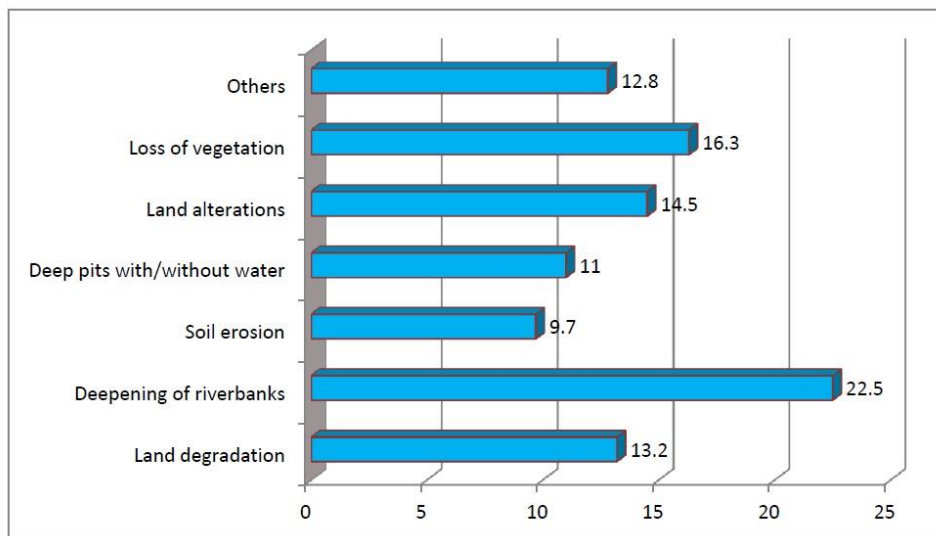
(الف)



(ب)

شکل ۲-۲- تغییرات بستر حفره در شرایط الف) آب زلال، ب) بستر متحرک (جهت جریان از چپ به راست) [۳۱]

مادیس (۲۰۱۳) به بررسی میدانی رودخانه های منطقه Gaborone در آفریقای جنوبی پرداخت. ایشان با نمونه برداری میدانی از ۳ 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 شرح کرد. ایشان به این نتیجه رسید که تخریب دیواره رودخانه و فرسایش آن بیشترین تاثیر منفی ناشی از برداشت مصالح از رودخانه است [۳۲]. (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- درصد معایب برداشت شن و ماسه در رودخانه‌های منطقه Gaborone آفریقای جنوبی [۳۱]

ماتامانا و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی رودخانه Peryar هندوستان و با استفاده از معادله انتقال رسوب میر پیتر میزان پرشدن حفره برداشت مصالح برای دوره ۲۲ ساله را تعیین کرد و میزان برداشت مجاز در هر ماه و برای هر منطقه را بدست آورد [۳۳].

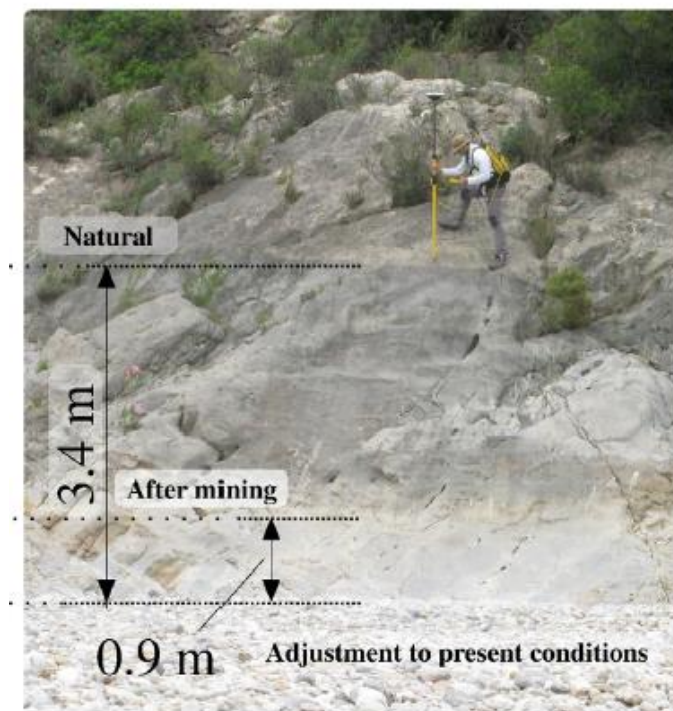
آکو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثرات زیست محیطی و مورفولوژیکی برداشت مصالح از رودخانه Luku نیجریه با استفاده از مدل آزمایشگاهی و میدانی پرداختند. ایشان توسط مشاهدات میدانی، اثرات فیزیکی برداشت مصالح از بستر را ثبت کرده و همچنین با برداشت ۱۰ نمونه از مصالح بستر در مناطق برداشت به بررسی شیمیایی خاک در این نواحی نیز اشاره کردند [۳۴].

بایرام و اونسوی (۲۰۱۵) به بررسی تاثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای بر کیفیت آب در رودخانه Harsit ترکیه پرداختند. ایشان در این تحقیق با نمونه گیری آب از ۱۷ محل برداشت مصالح، ده شاخص کیفیت آب از جمله کدر بودن آب، هدایت الکتریکی، غلظت رسوب معلق، سختی و ... را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که برداشت مصالح در این ناحیه باعث افزایش ۱۲۵ درصدی تیرگی آب،

۱۳۴ درصدی غلظت رسوب معلق، ۶۳ درصدی یون منگنز، ۹۸ درصدی کروم و ۱۱۱ درصدی آهن موجود در آب شده است [۳۵].

لو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تاثیر برداشت شن ماسه رودخانه Yangtze بر مخزن سد سه دره در چین پرداختند. برداشت شن و ماسه در این رودخانه به عنوان سه مرحله خاص ثبت شده است: برداشت در مقیاس کوچک از ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰، توسعه برداشت به صورت انبوه و گسترده از ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ و برداشت منظم مطابق با قوانین مرتبط از قرن ۲۱ تاکنون. نتایج نشان می‌دهد که در بالادست مخزن سد، ۴۴/۵ درصد برداشت مصالح در نواحی شهری رخ داده است. از طرفی برداشت شن و ماسه در بالادست سد موجب کاهش ورود ۱۴/۷۸ میلیون تن رسوب به مخزن سدهای موقتی، کاهش ورود ۷/۸۶ میلیون تن رسوب به مخزن در آغاز آبیگری و کاهش ۱۱/۵۷ میلیون تن رسوب در زمان بهره‌برداری شده است. همچنین داده‌های بدست آمده از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که آورد ماسه ای بزرگتر از ۰/۱۵ میلی‌متر به میزان ۲/۸۳ میلیون تن بوده که از مقدار برداشت مصالح (۱۸/۴۹ میلیون تن) بسیار کمتر است [۳۶].

کال و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تغییرات دینامیکی و ژئومورفولوژی رودخانه Rambla de la Viuda در شرق اسپانیا پرداختند. از تکنیک GIS و عکس‌های هوایی و داده‌های توپوگرافی برای تحلیل زمین ریخت شناسی در مدت ۱۹۴۶ تا ۲۰۱۲ و در طول ۷/۵ کیلومتر از رودخانه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که برداشت مصالح رودخانه‌ای و ناپیوسته بودن آورد رودخانه سبب شکاف ۳/۵ متری در کف شده است. (شکل ۲-۴) در حالی که برداشت همچنان ادامه داشته و این تغییرات محدود به نواحی حفره نشده و پس از برداشت نیز تاثیرات خود را خواهد گذاشت. تجزیه و تحلیل دقیق فضایی و زمانی از واحدهای قابل مقایسه نشان داد که کاهش ۵۰ درصدی در مقطع فعال در مقایسه با شرایط مشاهده شده قبل از برداشت مصالح بوحود آمده است. براساس مطالعه سیل‌های بزرگ این رودخانه، برداشت باید به گونه ای باشد که حداقل ۷۰ درصد از مصالح حفره بازگشت داشته باشد و عمق برداشت به یک متر محدود شود [۳۷].



شکل ۲-۴- شکاف ۳/۵ متری در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای [۳۶]

با توجه به مطالعات گذشته می‌توان دریافت که برداشت مصالح رودخانه‌ای آثار مخرب هیدرولیکی، زیست محیطی و ژئومورفولوژیکی بر رودخانه‌ها خواهد داشت از طرفی اکثر محققان به بررسی سرعت مهاجرت حفره‌ها یا اثرات زیست محیطی برداشت مصالح پرداخته‌اند و با توجه به اینکه تاکنون در مورد مکان‌یابی و جانمایی مناسب حفره‌ها به لحاظ احیای حفره تحقیقی صورت نگرفته است لذا در این تحقیق با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و عددی به بررسی مکان‌یابی حفره برداشت مصالح پرداخته شده و جانمایی مناسب حفره‌ها ارائه شده است.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

آزمایش‌ها در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری واقع در تهران انجام شده و در این فصل به بررسی تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. همچنین مراحل انجام شده در هر آزمایش و همچنین روش آماده‌سازی داده‌ها توضیح داده شده است. سپس پارامترهای استفاده شده در این تحقیق معرفی شده و به بررسی خطاهای آزمایشگاهی پرداخته شده است. در انتها مدل عددی مورد استفاده معرفی شده است.

۳-۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

برای این تحقیق از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شد که در زیر به اختصار توضیح داده می‌شوند:

۳-۲-۱- فلوم آزمایشگاهی

فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده دارای اجزای مختلفی به شرح زیر می‌باشد:

۳-۲-۱-۱- کانال آزمایشگاهی مستقیم

کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، مستقیم با مقطع مستطیل شکل و به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد که جداره‌ها از جنس پلکسی گلاس و کف کانال از بتن می‌باشد. در شکل (۳-۱) تصویر کانال مورد آزمایش مشاهده می‌شود. طول کانال به نحوی است که جریان قبل از حفره برداشت مصالح، توسعه یافته شده و با توجه به امکان فرسایش در پایین‌دست حفره، طول کافی برای شکل‌گیری و توسعه این ناحیه وجود داشته باشد.



شکل ۳-۱: نمایی از کانال مورد آزمایش

۳-۱-۲- مخزن ورودی

کانال مورد استفاده نیاز به یک مخزن ورودی دارد که جریان را به داخل کانال هدایت کند. ورودی سیستم باید به نحوی باشد که جریان ورودی از مخزن بالادست به داخل کانال کاملاً آرام شده، اغتشاشات بزرگ گرفته شده و جریان ورودی کاملاً در راستای بستر و جداره‌های جانبی باشد. مخزن کانال دارای ابعاد $2/5 \times 5 \times 5$ متر است. همچنین برای استهلاک هر چه بیشتر اغتشاشات جریان ورودی از سیستم پمپ به داخل مخزن، از آجرهای سوراخ دار و بستری از مصالح درشت‌دانه استفاده شده است. شکل (۳-۲) سیستم آرام کننده جریان در ورودی کانال را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲: نمایی از مخزن بالادست کانال

۳-۱-۲-۳- حوضچه آرامش

این حوضچه به منظور فراهم نمودن جریان آرام برای عبور از سرریز و تعیین دبی جریان و همچنین برای تله‌اندازی مصالح تخریب‌شده و جلوگیری از ورود آن‌ها به مخزن زیرزمینی در انتهای کانال با ابعاد $3 \times 1.5 \times 1$ متر ساخته شده است. (شکل ۳-۳)



شکل ۳-۳: حوضچه آرامش و تله‌انداز رسوب در انتهای کانال

۳-۱-۲-۴- تکیه‌گاه ریلی و ارابه‌های روی آن

برای اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی جریان، نظیر عمق و سرعت جریان در نقاط مختلف فلوم و همچنین ثبت تغییرات بستر، یک سیستم ریل در روی اسکلت فلزی جداگانه بر روی فلوم تعبیه شده است که بر روی آن ارابه‌ای برای استقرار دستگاه ثبت تغییرات بستر (Bed Profiler) و صاف‌کننده بستر قرار می‌گیرد. (شکل ۴-۳)



شکل ۴-۳: تکیه‌گاه ریلی و ارابه روی آن

۳-۲-۵- سرریز بادبزی

در انتهای کانال، از یک سرریز بادبزی برای تنظیم ارتفاع سطح آب در کانال استفاده می‌شود. جریان آب از روی دریچه وارد حوضچه آرامش شده و پس از عبور از سرریز مستطیلی وارد مخزن زیرزمینی می‌شود. (شکل ۳-۵)



شکل ۳-۵: نمایی از سرریز بادبزی در انتهای کانال

۳-۲-۶- سیستم آبرسانی

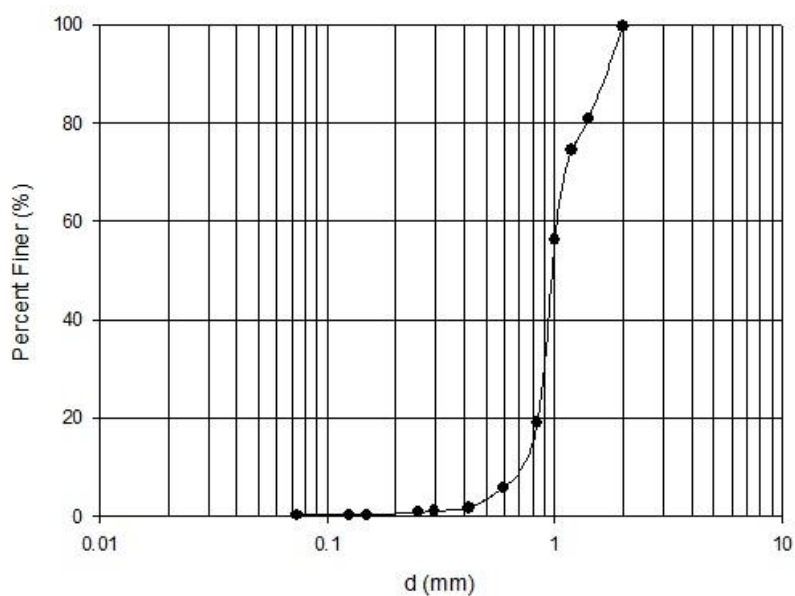
برای انتقال آب از محل مخزن ذخیره (مخزن زیرزمینی) به مخزن ورودی از سیستم کوپله شده پمپ و الکتروموتور استفاده شد. جریان از مخزن زیرزمینی پمپاژ شده و وارد مخزن ورودی در بالادست کانال می‌شود. میزان دبی خروجی از پمپ با استفاده از شیر کشویی کنترل می‌شود. در انتهای کانال برای تعیین و اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مستطیلی استفاده شده است. آب پس از عبور از روی سرریز مجدداً وارد مخزن زیرزمینی می‌شود. سرریز مستطیلی واقع در حوضچه آرامش در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: سرریز مستطیلی نصب شده در حوضچه آرامش به منظور اندازه‌گیری دبی جریان

۳-۲-۲- مصالح بستر

به منظور بررسی فرسایش و رسوبگذاری حفره برداشت مصالح، لایه ۱۵ سانتی‌متری از ماسه یکنواخت با متوسط قطر ۱ میلی‌متر و با ضریب یکنواختی $1/46$ در کف کانال ریخته شد. منحنی دانه‌بندی مذکور در شکل (۳-۷) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۷: منحنی دانه‌بندی آزمایش‌ها

۳-۲-۳- صاف کننده سطح بستر

به منظور ایجاد یک سطح صاف در بستر برای انجام آزمایش‌ها، یک صفحه‌ی مستطیل شکل از جنس پلکسی گلاس که هم عرض کانال باشد ساخته شد. این صفحه فلزی توسط دو عدد میله به یک اربه که قابلیت حرکت طولی بر روی ریل‌های کانال را دارد، متصل بوده است. این میله‌ها توسط پیچ‌هایی به اربه متصل بوده و ارتفاع قرارگیری صفحه توسط آن‌ها تنظیم می‌شد. با تنظیم و قرار دادن صفحه در ارتفاع مورد نظر و حرکت طولی صفحه بر روی بستر، سطحی صاف در تراز مورد نظر بوجود آمده و رسوبات اضافی نیز در انتهای کانال جمع شده و از کانال خارج می‌شدند. در شکل (۳-۸) تصویر صاف کننده سطح بستر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۸: صاف کننده بستر مورد استفاده در کانال

۳-۲-۴ - عمق سنج نقطه‌ای

به منظور قرائت تراز سطح آب و عمق جریان در پایین‌دست کانال و در بالادست سرریز از دو دستگاه عمق سنج نقطه‌ای مکانیکی^۱ با دقت دهم میلی متر استفاده گردید. عمق سنج نقطه‌ای مذکور بر روی دیواره کانال نصب شده با مماس شدن نوک عمق سنج با سطح آب و قرائت ارتفاع مشخص شده بر روی بدنه عمق سنج، عمق جریان نسبت به کف بستر بدست می‌آید (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۹: نمایی از عمق سنج نقطه‌ای

^۱ Ponit Gage

۳-۲-۵- دستگاه برداشت رقوم بستر^۱

برای اندازه‌گیری تغییرات توپوگرافی بستر، از دستگاه پروفایلر استفاده شد. این دستگاه دارای یک سنسور است که باید در داخل آب قرار بگیرد تا بتواند تغییرات بستر را بر حسب ولت به نمایشگر منتقل کند. با کالیبره کردن دستگاه، میتوان تغییرات را بر حسب میلی‌متر مشاهده کرد. قابل ذکر است که از این دستگاه برای اندازه‌گیری اطلاعات بستر در حالت خشک نمی‌توان استفاده کرد. شکل (۳-۱۰) اجزای دستگاه پروفایلر را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

شکل ۳-۱۰: دستگاه پروفایلر (الف) نمایشگر ولتاژ، (ب) خط کش مجهز به سنسور

۳-۳- آنالیز ابعادی

پارامترهای بدون بعد درک ما را از پدیده‌های مختلف فیزیکی بطور جدی تعمیق بخشیده و اجازه می‌دهند نتایج آزمایش‌های محدودی برای وضعیت‌های مختلف بکار برده شوند. هدف از آنالیز ابعادی

¹ Bed Profiler

شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی مورد مطالعه و تعیین نسبت‌های بدون بعد و بیان ارتباط بین این نسبت‌ها می‌باشد. پارامترهای متعددی در جانمایی و پرشدگی حفره‌های برداشت مصالح تاثیر دارد. محققین عموماً از طریق آنالیز ابعادی به انتخاب پارامترهای بدون بعد مورد مطالعه پرداخته‌اند. به منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر فرسایش و رسوبگذاری حفره برداشت مصالح، آنالیز ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شد. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارتند از:

۱- عوامل مربوط به هندسه کانال: عرض کانال (B) و شیب طولی کانال (S_0).

۲- عوامل مربوط به هندسه و جانمایی حفره: فاصله طولی حفره‌ها از یکدیگر (L)، فاصله حفره از دیواره (S)، حجم اولیه حفره قبل از آزمایش (V_0)، طول حفره (l)، عرض حفره (b).

۳- عوامل مربوط به شرایط هیدرولیکی جریان: سرعت متوسط جریان در مقطع قبل از حفره (U)، سرعت آستانه حرکت مصالح بستر (U_c) و عمق جریان در بالادست حفره (y).

۴- عوامل مربوط به مصالح بستر: قطر متوسط مصالح (d_{50})، غلظت رسوب ورودی (C_s)، وزن مخصوص رسوبات (ρ_s) و انحراف استاندارد توزیع اندازه مصالح (σ_g)

۵- عوامل مربوط به خواص سیال: جرم مخصوص آب (ρ)، شتاب ثقل (g) و لزجت سینماتیکی سیال (ν).

با انتخاب حجم نهایی حفره در انتهای آزمایش (V) به عنوان متغیر وابسته، رابطه‌ی (۱-۱) بدست می‌آید:

$$V = f(B, S_0, L, S, V_0, l, b, C_s, U, U_c, y, d_{50}, \sigma_g, \nu, \rho, \rho_s, g) \quad (1-3)$$

برای آنالیز ابعادی روش‌های مختلفی وجود دارد، در بین این روش‌ها، روش II باکینگهام به طور گسترده برای تعیین پارامترهای بدون بعد مؤثر در پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که

در این تحقیق از این روش استفاده شد. با در نظر گرفتن پارامترهای g ، ρ و γ به عنوان متغیرهای تکراری، شکل کلی رابطه بالا را با استفاده از روش Π باکینگهام، می توان به صورت رابطه‌ی (۲-۱) نوشت:

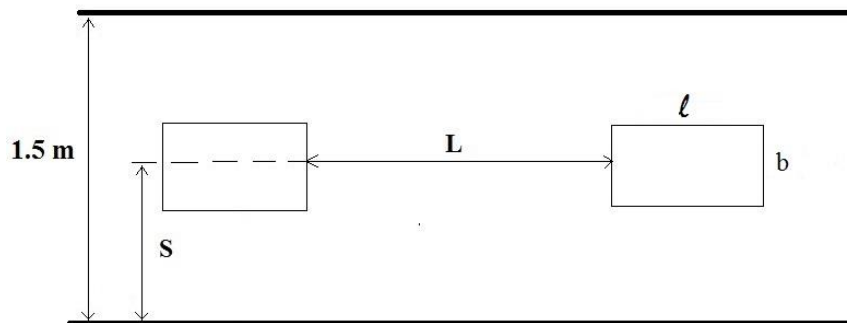
$$\frac{V}{y^3} = f\left(\frac{B}{y}, S_0, \frac{L}{y}, \frac{l}{y}, \frac{b}{y}, C_s, \frac{S}{y}, \frac{V_0}{y^3}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{U_c}{\sqrt{gy}}, \frac{d_{50}}{y}, \sigma_g, \frac{g^{1/2} y^{3/2}}{v}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (2-3)$$

با توجه به اینکه شیب کانال (نزدیک به صفر) ، وزن مخصوص رسوبات (برابر ۱/۶۵) و ضریب یکنواختی مصالح (برابر ۱/۴۶) و غلظت رسوب ورودی (برابر ۲۸۰ گرم بر دقیقه) و متوسط قطر مصالح (برابر یک میلیمتر) و همچنین عمق جریان (برابر ۶ سانتی متر) ثابت است در نتیجه پارامترهای بدون بعد S_0 ، σ_g و $\frac{\rho_s}{\rho}$ و C_s حذف می‌شوند. با ترکیب $\frac{S}{y}$ با $\frac{B}{y}$ ، پارامتر بی بعد $\frac{S}{B}$ بدست می‌آید. علت انتخاب این پارامتر بی بعد این است که فاصله حفره از دیواره بصورت درصدی از عرض کانال بیان شود. با ترکیب پارامتر بی بعد $\frac{V_0}{y^3}$ با $\frac{V}{y^3}$ ، پارامتر بی بعد $\frac{V}{V_0}$ بدست می‌آید که در واقع بیان کننده میزان پرشدگی حفره برداشت است. با ترکیب $\frac{b}{y}$ با $\frac{l}{y}$ نسبت $\frac{l}{b}$ بدست می‌آید که در واقع نسبت طول به عرض حفره است. همچنین با ترکیب $\frac{v}{g^{1/2} y^{3/2}}$ و $\frac{U}{\sqrt{gy}}$ ، پارامتر بی بعد $\frac{Uy}{v}$ و با توجه به آشفته بودن جریان، می توان از اثرات عدد رینولدز صرف نظر کرد. با ترکیب $\frac{U_c}{\sqrt{gy}}$ و $\frac{U}{\sqrt{gy}}$ ، پارامتر بی بعد $\frac{u}{u_c}$ حاصل می شود که این نسبت ثابت و در تمام آزمایشها ۱/۲ در نظر گرفته شده است و از لیست اعداد بی بعد حذف می شود. بنابراین پارامترهای بی بعد زیر برای بررسی فرسایش و رسوبگذاری حفره برداشت مصالح بدست آمد.

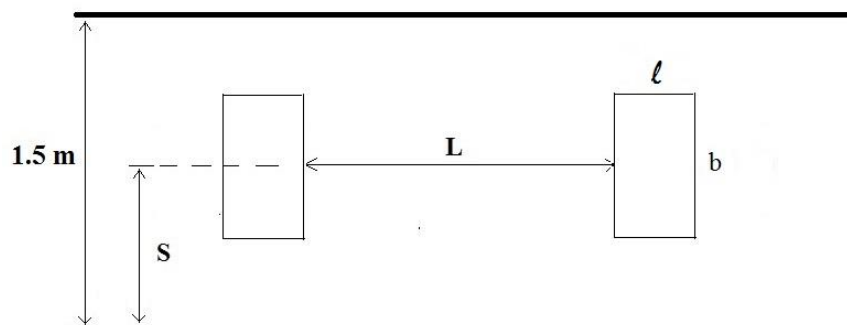
$$\frac{V}{V_0} = f\left(\frac{L}{y}, \frac{S}{B}, \frac{l}{b}\right) \quad (3-3)$$

۳-۴- مقدمات آزمایش‌ها

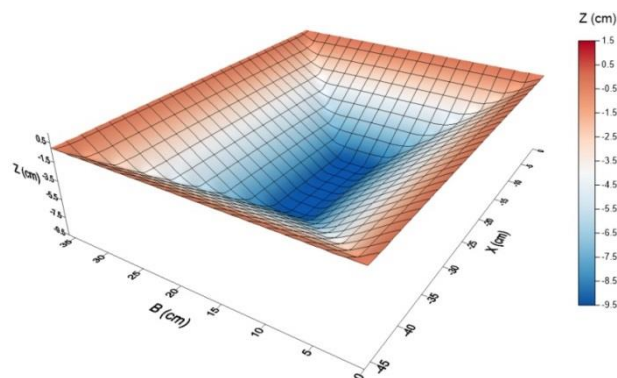
حفره‌ها توسط قالبی از جنس ورق فلزی در کارگاه جوشکاری با ابعاد مورد نظر ساخته شد و حفره اول در آزمایش‌ها در فاصله ۴ متری از ابتدای کانال واقع شده است. در شکل‌های ۳-۱۱ الی ۳-۱۳ به ترتیب هندسه حفره‌ها در پلان و نحوه قرارگیری به شکل سه بعدی نمایش داده شده است. در ابتدا حفره‌ها با ابعاد $10 \times 30 \times 40$ سانتی متر در نظر گرفته شدند اما پس از غرقاب شدن و برداشتن قالب فلزی، مقداری از مصالح (۳ سانتی متر از هر وجه) به داخل حفره ریزش کرده و شکل پایدار به خود می‌گیرند که ابعاد حفره به صورت $9/5 \times 36 \times 46$ سانتی متر اصلاح شد.



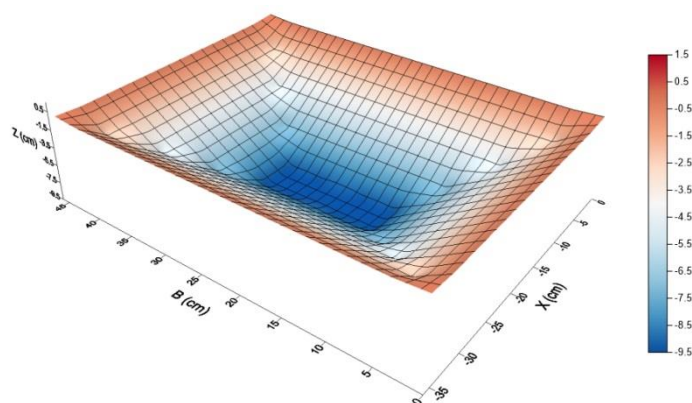
شکل ۳-۱۱: شکل شماتیک پلان کانال و مشخصات هندسی حفره‌ها در نسبت $\frac{l}{b} = 1/28$



شکل ۳-۱۲: شکل شماتیک پلان کانال و مشخصات هندسی حفره‌ها در نسبت $\frac{l}{b} = 0/78$



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۳: شکل شماتیک حفره ها

(الف) شکل سه بعدی حفره با $\frac{l}{b} = 1/28$ (ب) شکل سه بعدی حفره با $\frac{l}{b} = 0.78$

به منظور تعیین عمق جریان با توجه به دبی با انجام چند آزمایش و پس از آزمون و خطا و با توجه به محدودیت کانال و پمپ، عمق جریان ۶ سانتی متر انتخاب شده است. نسبت $\frac{l}{b} = 1/28$ به معنی برداشت مصالح در راستای طول کانال و نسبت $\frac{l}{b} = 0.78$ به معنی برداشت مصالح در راستای عرض کانال است. تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. ابتدا آزمایش به صورت تک حفره انجام شده تا اثر فاصله حفره ها و تاثیر حفره پایین دست بر بالادست بهتر مشخص شود. سپس آزمایش ها به صورت دو حفره ای انجام شد. حالت تک حفره به این معنی است که حفره

پایین دست به حدی از حفره بالادست دور است که بر هم تاثیری ندارند. هر آزمایش ۲ بار انجام شده است تا نتایج از دقت بالاتری برخوردار باشد و در مجموع از ۴۸ آزمایش برای ارائه نتایج استفاده شده است.

جدول ۱-۳ تغییرات پارامترهای مورد آزمایش

شماره آزمایش	l/b	L/y	S/B (%)	نوع آزمایش
۱	۱/۲۸	-	۲۰	تک حفره
۲	۱/۲۸	-	۳۵	تک حفره
۳	۱/۲۸	-	۵۰	تک حفره
۴	۰/۷۸	-	۲۰	تک حفره
۵	۰/۷۸	-	۳۵	تک حفره
۶	۰/۷۸	-	۵۰	تک حفره
۷	۱/۲۸	۸	۲۰	دو حفره
۸	۱/۲۸	۱۲	۲۰	دو حفره
۹	۱/۲۸	۱۶	۲۰	دو حفره
۱۰	۱/۲۸	۸	۳۵	دو حفره
۱۱	۱/۲۸	۱۲	۳۵	دو حفره
۱۲	۱/۲۸	۱۶	۳۵	دو حفره
۱۳	۱/۲۸	۸	۵۰	دو حفره
۱۴	۱/۲۸	۱۲	۵۰	دو حفره
۱۵	۱/۲۸	۱۶	۵۰	دو حفره
۱۶	۰/۷۸	۸	۲۰	دو حفره
۱۷	۰/۷۸	۱۲	۲۰	دو حفره
۱۸	۰/۷۸	۱۶	۲۰	دو حفره
۱۹	۰/۷۸	۸	۳۵	دو حفره
۲۰	۰/۷۸	۱۲	۳۵	دو حفره
۲۱	۰/۷۸	۱۶	۳۵	دو حفره
۲۲	۰/۷۸	۸	۵۰	دو حفره
۲۳	۰/۷۸	۱۲	۵۰	دو حفره
۲۴	۰/۷۸	۱۶	۵۰	دو حفره

۳-۵- نحوه تعیین سرعت آستانه حرکت مصالح (U_c) و میزان تزریق رسوب

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 بدلیل اینکه این روابط برای شرایط خاصی استخراج شده و قابل تعمیم به همه‌ی موارد نیست لذا به منظور صحت و دقت بیشتر آزمایش آستانه حرکت در کانال مذکور انجام شد. بدین‌گونه که بستر کاملاً صاف و هموار شده و پس از باز کردن پمپ و غرقاب شدن کانال عمق جریان روی ۶ سانتی‌متر توسط سرریز بادبزی پایین دست تنظیم شد. سپس دبی به آهستگی افزایش پیدا کرده و عمق جریان روی دریچه ثابت نگه داشته شد. در دبی مشخصی و در عمق ثابت ۶ سانتی‌متر مصالح بستر شروع به حرکت نمودند. این لحظه به عنوان آستانه حرکت انتخاب شده و با قرائت ارتفاع آب روی سرریز مستطیلی پایین‌دست، دبی در این لحظه معادل $28/62$ 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 بدست 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 پس از صاف کردن بستر و غرقاب شدن کانال و تنظیم شرایط آزمایشگاهی در عمق و دبی آزمایش‌ها، حوضچه‌ای در پایین‌دست کانال روی بستر ایجاد شد تا مصالح فرسایش یافته از بستر، در آن ته نشین 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 ۲۸۰ گرم رسوب از مقطع این کانال عبور می‌کند. این مقدار به عنوان تزریق رسوب در طول آزمایش به سیستم اعمال شد.

۳-۶- نحوه‌ی انجام آزمایشات اصلی

برای انجام آزمایش‌های اصلی، در ابتدا با استفاده از صاف کننده بستر، سطح کانال هموار شده و حفره در محل مورد نظر حفر شده و توسط قالب شکل می‌گیرد سپس مجدداً با استفاده از صاف کننده، بستر کانال کاملاً هموار و توسط 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 روی حفره قرار گرفته به آرامی برداشته می‌شود. در اثر مکش جریان در زیر قالب ۳ سانتی‌متر از چهار سمت قالب به داخل حفره ریزش کرده و مصالح در شیب طبیعی خود قرار می‌گیرند. در نتیجه ابعاد جدید به عنوان ابعاد حفره مد نظر قرار رفت. سپس دبی کانال روی ۳۴/۴ لیتر بر ثانیه تنظیم شده و سرریز بادبزی روی عمق ۶ سانتی‌متر تنظیم شد و از این مرحله آزمایش آغاز شد. زمان آزمایش ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شده و تمام آزمایش‌ها در زمان برابر مقایسه خواهند شد. تغییرات بستر در خط مرکزی حفره در جهت جریان با گام زمانی ۱۵ دقیقه توسط دستگاه *Bed Profiler* برای $\frac{l}{b} = 1/28$ در $\frac{l}{b} = 19$ نقطه طولی و برای $\frac{l}{b} = 0/78$ در ۱۸ نقطه طولی برداشت شده تا میزان مهاجرت حفره و تغییرات آن به منظور فرسایش و رسوب‌گذاری مشخص شود. پس از پایان آزمایش، حفره و اطراف آن در راستای طولی و عرضی شبکه‌بندی شده و توپوگرافی بستر برداشت شده است.

۳-۷- خطاهای آزمایشگاهی

برداشت داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه‌های مختلف و در شرایط آزمایشگاهی متعدد و با حجم داده‌های زیاد، می‌تواند باعث وارد شدن خطا در اندازه‌گیری‌ها گردد. در این تحقیق و بر اساس آزمایشات انجام گرفته، خطاها به دو دسته خطاهای سیستماتیک و خطاهای انسانی تقسیم می‌گردند:

۳-۷-۱- خطای سیستماتیک

این دسته از خطاها به دلیل شرایط نقاط برداشت داده بوجود می‌آیند و بیانگر خطای مستتر در داده‌های برداشت شده می‌باشد. به عبارت دیگر هر یک از دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای یک تفرانس یا دقت اندازه‌گیری تعریف شده می‌باشد. ولی خطای سیستماتیک مستقل از دقت دستگاه و به دلیل ماهیت نقاط برداشت داده بوجود می‌آید. [۳۷] برای برداشت توپوگرافی بستر از دستگاه پروفایلر

استفاده شد. این دستگاه باید در فاصله ۵ میلیمتری از بستر قرارگیرد که این عمل بصورت خودکار توسط دستگاه انجام می شود و در قسمت های شیب دار بستر، خط کش دستگاه به بالا یا پایین حرکت می کند که عکس العمل دستگاه در این شرایط ممکن است باعث بروز خطا شود.

۳-۷-۲- خطای انسانی

عمده ترین خطای موجود در این قسمت در تنظیم مختصات برداشت نقاط مربوط به دستگاه سرعت سنج و دستگاه پروفایلر می باشد. با توجه به اینکه از خط کش های طولی، عرضی و عمودی با دقت ۱ میلیمتر برای تنظیم مختصات نقاط برداشت استفاده شده است و تنظیم ارا به حرکت طولی، حرکت عرضی روی ریل توسط کاربر و با استفاده از خط کش های ذکر شده انجام می گیرد در صورت وجود خطا در مختصات نقاط برداشت، میزان خطا ۱ میلیمتر خواهد بود.

۳-۸- مدل عددی CCHE2D

نرم افزار CCHE2D یک مدل عددی برای شبیه سازی جریان و انتقال رسوب در کانال های باز است که در مرکز بین المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی^۱ (NCCHE) دانشکده فنی دانشگاه می سی سی پی آمریکا تهیه شده و توسعه یافته است. این مدل جزو مدل های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده که برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط گیری شده در عمق^۲ استفاده می کند و برای شبیه سازی جملات انتقال آشفتگی، دو مدل صفر معادله ای توزیع سهموی^۳ و مدل طول اختلاط لزجت گردابه ای^۴ و نیز مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ را به کار می برد. مدل

¹ National Center for Computational Hydroscience and Engineering

² Depth Average

³ Parabolic Eddy viscosity

⁴ Mixing Length

شبیه ساز پدیده انتقال رسوب این نرم افزار، توانایی مدل سازی انتقال هر دو فاز بار معلق و بستر در حالت دائمی، غیردائمی و رسوب چسبنده و غیرچسبنده را دارد. ساخت هندسه و شبکه بندی میدان مطالعاتی در یک نرم افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH صورت می گیرد و حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده ی نتایج در محیط گرافیکی نرم افزار،^۱ CCHE-GUI، انجام می شود. گسسته سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش المان محدود صورت می گیرد. در ادامه معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال رسوب به کار گرفته شده در این مدل به طور مختصر شرح داده می شود.

۳-۸-۱- معادلات حاکم

با توجه به اینکه جریان کانال های باز اغلب جزو مسائل آب های کم عمق^۲ می باشند، لذا تاثیر حرکت قائم ذرات آب از اهمیت چندانی برخوردار نبوده و به همین دلیل معادلات دوبعدی متوسط گیری شده در عمق در اکثر موارد برای شبیه سازی مسائل هیدرولیکی رودخانه ها از دقت و کارایی کافی برخوردار می باشند. معادلات پیوستگی و مومنوم جریان متوسط گیری شده در عمق برای جریان های آشفته در دستگاه مختصات کارتزین را می توان به صورت زیر بیان کرد: [۳۸]

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (۴-۳)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor} v \quad (۵-۳)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{cor} u \quad (۶-۳)$$

^۱ Center for Computational Hydroscience and Engineering-Graphic User Interface

^۲ Shallow Water

در معادلات فوق u و v به ترتیب بیانگر مولفه های سرعت متوسط گیری شده در عمق در راستای x و y ، زمان، g شتاب جاذبه، Z بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب، ρ دانسیته آب، h عمق محلی جریان و f_{cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس می باشند. همچنین τ_{xx} ، τ_{xy} و τ_{yx} تنش های رینولدز متوسط گیری شده در عمق و τ_{bx} و τ_{by} تنش های برشی بستر در راستای x و y می باشند.

همچنین مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل نیمه تجربی است که بر پایه ی مدل سازی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اضمحلال آشفته گی (ε) استوار می باشد. رابطه انتقال برای k از رابطه صریح و برای ε با استفاده از استدلال فیزیکی بدست می آید. در استخراج مدل $k-\varepsilon$ فرض بر این است که جریان کاملاً آشفته بوده و اثر لزجت مولکولی قابل صرف نظر کردن است. معادلات انتقال k و ε در این مدل به صورت رابطه ی (۳) و (۴) تعریف می شوند:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (۷-۳)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} G - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{K} G \quad (۸-۳)$$

در روابط بالا $\eta = \frac{SK}{\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$ و $S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji})$

می باشند. μ_t لزجت اغتشاش است که با استفاده از K (انرژی جنبشی اغتشاشی) و ε (نرخ استهلاک انرژی اغتشاشی) از رابطه ی (۵) محاسبه می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (۹-۳)$$

تولید انرژی جنبشی اغتشاشی G ، در نتیجه گرادیان سرعت متوسط، به صورت رابطه (۶) تعریف می گردد.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (۱۰-۳)$$

اساس مدل سازی انتقال رسوب توسط معادله جابه جایی-پخش متوسط گیری شده در عمق برای انتقال

بار معلق و معادله پیوستگی برای بار بستر صورت می‌گیرد: [۳۸]

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + E_{bk} - D_{bk} \quad (۱۱-۳)$$

$$(1-p') \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\delta C_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk} \quad , \quad (K = 1, 2, \dots, N) \quad (۱۲-۳)$$

اندیس K بیانگر کلاس ابعادی^۱ ذرات رسوب است. در رابطه (۱۱-۳) C_k و ε_s به ترتیب عبارتند از

غلظت بار رسوبات معلق و ضریب پخش گردابه‌ای^۲ رسوب که ε_s از رابطه $\varepsilon_s = \vartheta_t / \sigma_s$ محاسبه می

شود. ϑ_t و σ_s به ترتیب لزجت گردابه‌ای جریان و عدد اشمیت-پرانتل آشفتگی^۳ (که بین ۰/۵ الی ۱

قرار دارد) می‌باشند. E_{bk} و D_{bk} به ترتیب بیانگر نرخ ورود ذرات رسوب از ناحیه بار بستر به بار معلق

و نرخ ته‌نشینی ذرات رسوب در مرز بین نواحی بار بستر و معلق می‌باشند. (شکل ۳-۱۴)

$$E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (۱۳-۳)$$

ضریب α پارامتری است در مدل‌سازی انتقال رسوب به نام ضریب تطبیقی غیر تعادلی بار معلق، ω_{sk}

سرعت سقوط مربوط به کلاس ابعادی ذرات رسوب و C_{*k} بیانگر غلظت رسوبات در حالت تعادلی

(ظرفیت انتقال رسوب) است. در رابطه (۱۲-۳) P' تخلخل مواد کف، c_{bk} غلظت متوسط بار بستر در

منطقه حرکت بار بستر، δ ضخامت لایه‌ی بستر، q_{bkx} و q_{bky} مولفه‌های نرخ انتقال بار بستر در

راستای x و y می‌باشند. جمله اول سمت چپ معادله نیز بیانگر تغییرات تراز بستر است (Z_b بیانگر

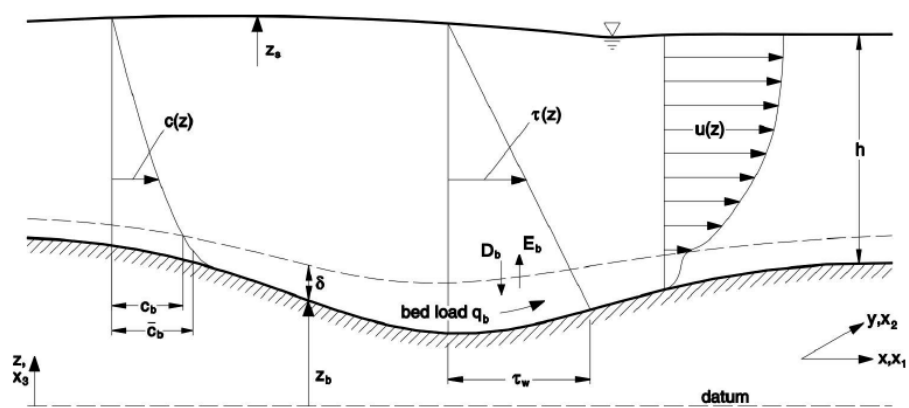
تراز ارتفاعی بستر است). شکل (۳-۱۴) الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم جریان را نشان

می‌دهد.

¹ Size Class

² Eddy Diffusivity

³ Turbulent Prandtl-Schmidt Number



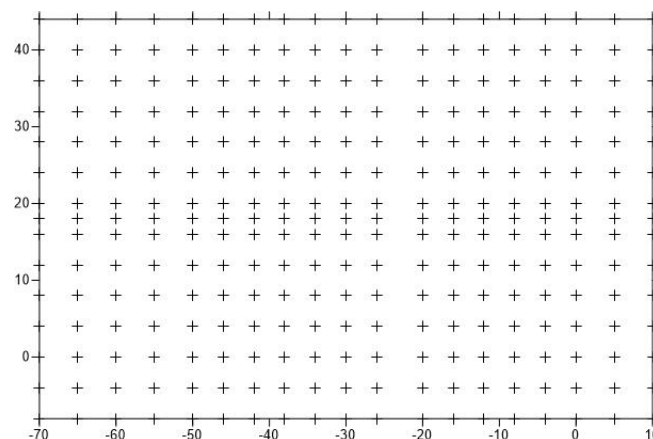
شکل ۳-۱۴- نمایش الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم جریان [۳۸]

فصل چهارم:

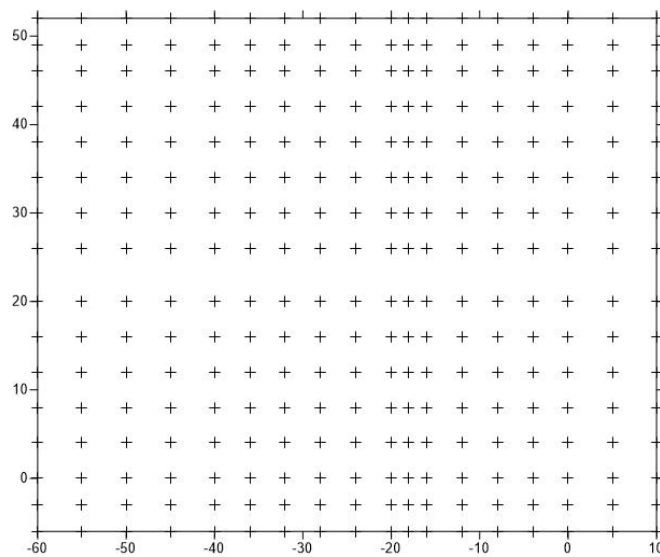
بررسی نتایج آزمایشگاهی و عددی

۴-۱- مقدمه

آزمایش‌ها به مدت ۶۰ دقیقه انجام شدند و تغییرات بستر در خط مرکزی حفره در جهت جریان با گام زمانی ۱۵ دقیقه برداشت شده و در انتها توپوگرافی حفره و اطراف آن برداشت شد و نتایج توسط نرم‌افزارهای *SigmaPlot* و *Surfer* ارائه شده است. چون که هر آزمایش ۲ بار تکرار شده بنابراین میانگین نتایج به عنوان معرف آزمایش ارائه شده است. ابتدا برداشت در راستای طول کانال ($\frac{l}{b} = 1/28$) بررسی شده و سپس نتایج برداشت در راستای عرض کانال ($\frac{l}{b} = 0/78$) ارائه شده و در انتها نتایج صحت‌سنجی مدل عددی و سپس توسعه مدل عددی بررسی شده است. شکل ۴-۱ نقاط برداشت در ($\frac{l}{b} = 1/28$) و ($\frac{l}{b} = 0/78$) نشان می‌دهد.



(الف)

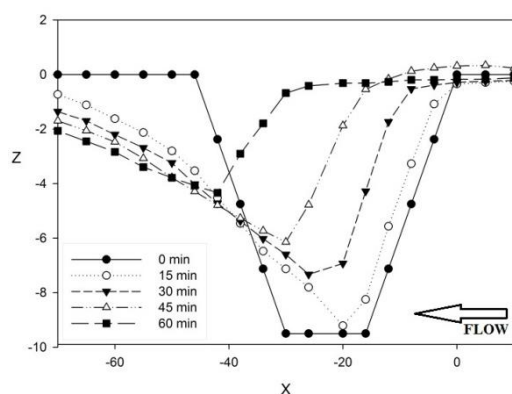


(ب)

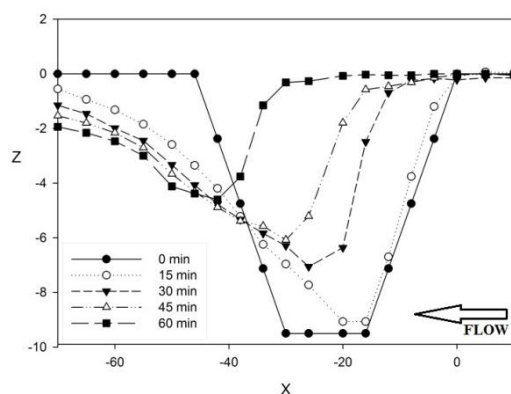
شکل ۴-۱ نقاط برداشت الف) برداشت در راستای طول ب) برداشت در راستای عرض

۴-۲- نتایج در شرایط برداشت در راستای طول کانال ($\frac{L}{b} = 1/28$)

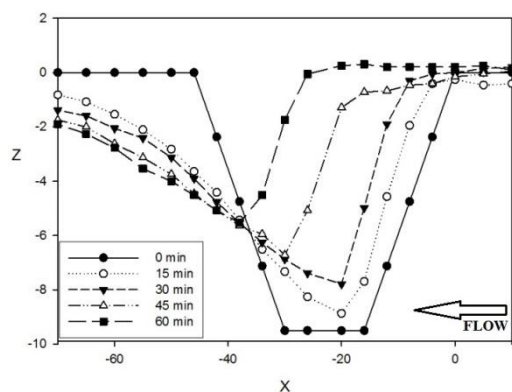
با شروع آزمایش مشاهده شد که مصالح از بالادست به داخل حفره رسوب گذاری شده و در شیب بالادست و کف حفره ته نشین می گردند و باعث پیشروی شیب بالادست حفره به سمت جلو می شوند. همچنین مصالح از لبه پایین دست حفره فرسایش می یابند و به پایین دست حرکت می کنند. همچنین ماکزیمم عمق حفره کاهش یافته و به سمت پایین دست حرکت می کند. شکل ۴-۲ تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{L}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 0.50$ و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. همچنین مختصات $X=0$ محل بالادست گودال قبل از شروع آزمایش است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود در هر سه نسبت $\frac{L}{y}$ پس از ۶۰ دقیقه حفره بالادست تغییر شکل یکسان دارد. بنابراین دورتر شدن حفره پایین دست تاثیری بر پیشروی حفره بالادست ندارد.



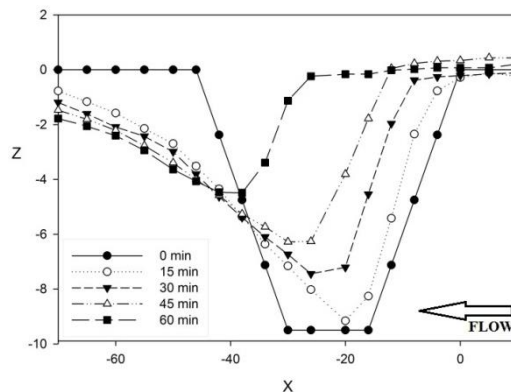
(ب)



(الف)



(د)

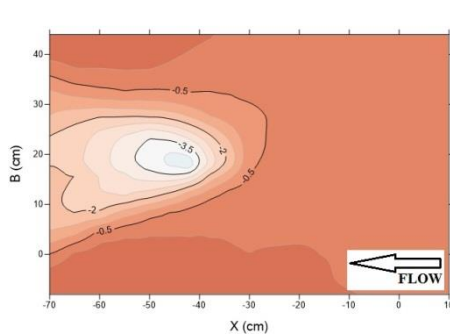


(ج)

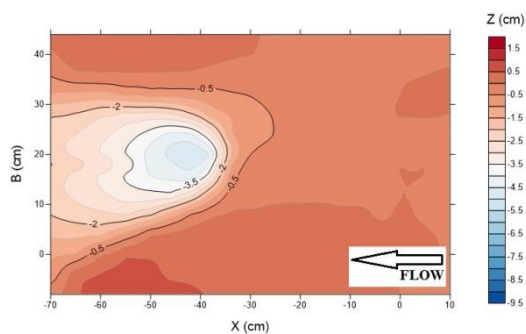
شکل ۴-۲- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

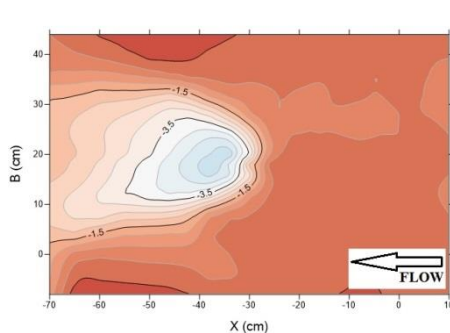
در شکل ۴-۳ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ و ۱۶، ۱۲، ۸، $\frac{l}{y} = 8$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود بالادست حفره پس از گذشت زمان به حالت دایره ای تبدیل می شود و این نشان دهنده این است که میزان رسوب گذاری در کنج ها زودتر از ضلع های حفره اتفاق می افتد. در پایین دست حالت کشیدگی اتفاق می افتد که نشان می دهد فرسایش در کنج ها و ضلع ها توامان است.



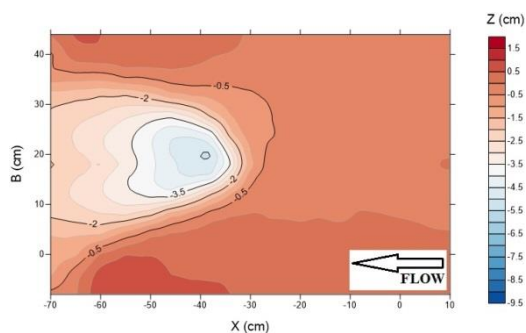
(ب)



(الف)



(د)

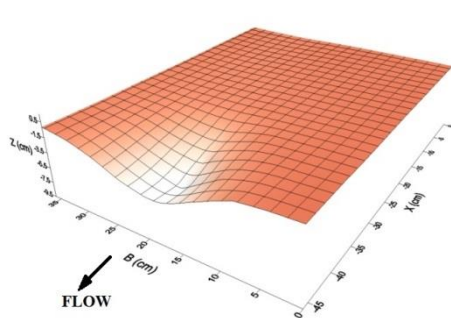


(ج)

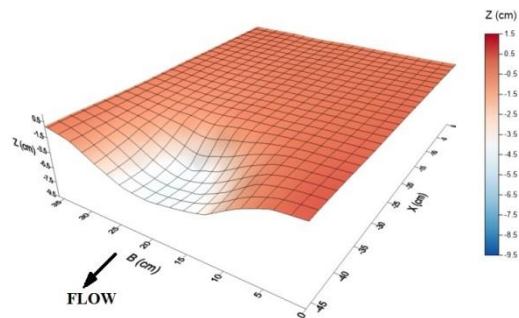
شکل ۳-۴- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

با توجه به شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود که تغییرات دوبعدی توپوگرافی حفره و اطراف آن به لحاظ کیفی با افزایش فاصله حفره پایین دست تغییر آنچنانی نمی‌کند و پرشدن حفره به صورت نیم دایره و فرسایش آن به صورت یکسان از لبه پایین دست صورت می‌گیرد. این امر نشان می‌دهد که جابجایی حفره پایین دست بر شکل پرشدن و فرسایش حفره بالادست تاثیری ندارد. شکل ۴-۴ تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را در پایان آزمایش نشان می‌دهد. با استفاده از نرم افزار *surfer* حجم رسوب گذاری در حفره محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره

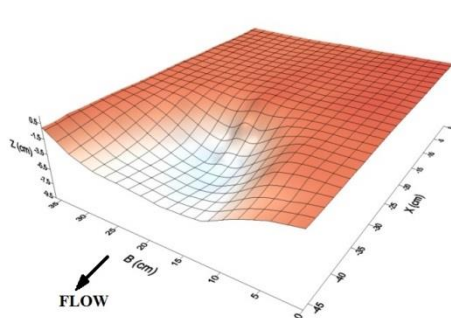
بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب ۸۹/۰۲٪، ۸۸/۷۹٪، ۸۷/۴۷٪ و در حالت تک حفره برابر ۸۴/۷۶٪ است که نشان دهنده عدم تغییر در حجم پرشدگی است.



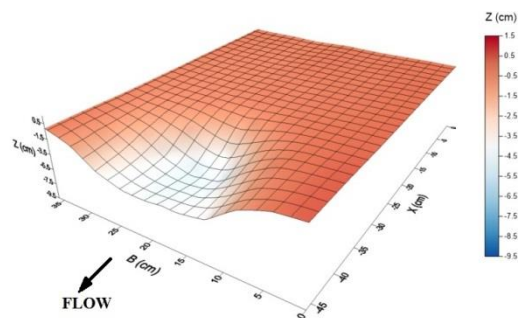
(ب)



(الف)



(د)

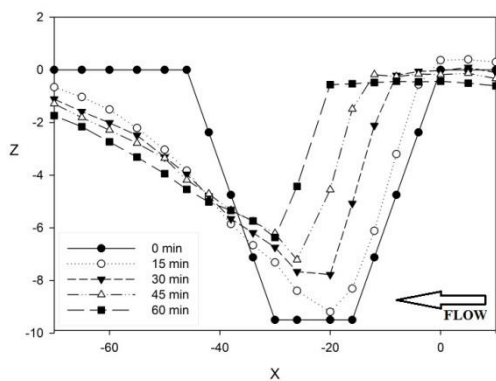


(ج)

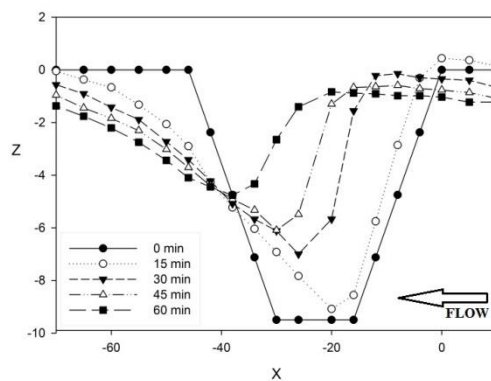
شکل ۴-۴- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 0.50$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

شکل ۴-۵- تغییرات پیشروی حفره پایین دست برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 0.50$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود با دورتر شدن حفره پایین دست از میزان رسوب گذاری درون حفره و پیشروی حفره به سمت پایین دست کاسته می شود. این امر به این

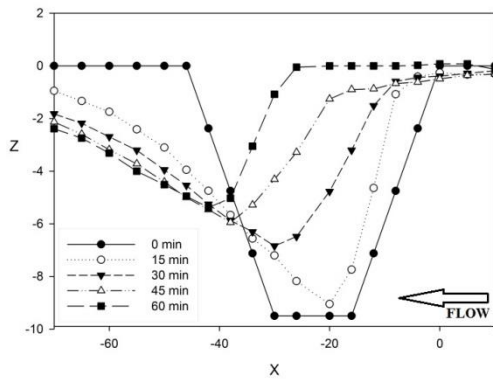
علت اتفاق می افتد که پر شدن حفره پایین دست بر مبنای فرسایش حفره بالادست است و بستر مشارکتی در پرشدگی حفره ندارد. وقتی حفره پایین دست به بالادست نزدیک باشد به لحاظ کمی مقدار بیشتری از رسوبات فرسایش یافته از بالادست به حفره پایین دست نشست می کند و رسوبات زودتر از حفره بالادست به حفره پایین دست می رسند و باعث مهاجرت بیشتر حفره به سمت پایین دست می شوند. وقتی حفره پایین دست به اندازه کافی از بالادست دور باشد (حالت تک حفره) تغذیه رسوب حفره پایین دست از طریق بستر تامین می شود و مانند حفره بالادست عمل می کند و پیشروی افزایش می یابد.



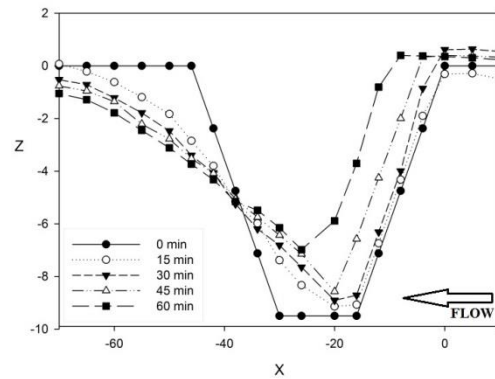
(ب)



(الف)



(د)

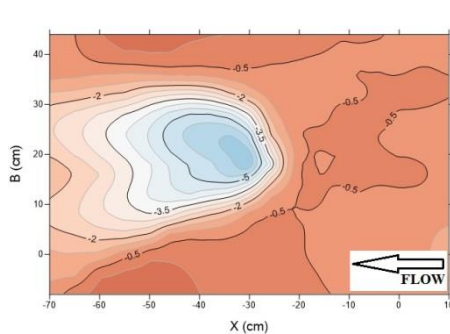


(ج)

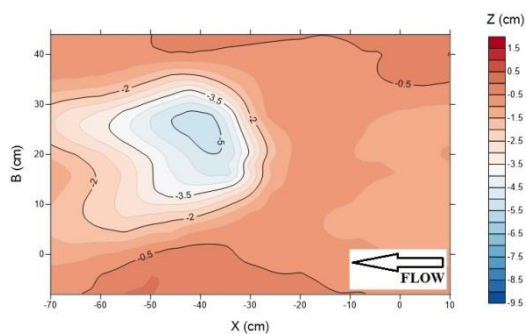
شکل ۴-۵- الگوی انتقال رسوب در حفرة پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 50\%$

الف) $\frac{l}{y} = 8$ ب) $\frac{l}{y} = 12$ ج) $\frac{l}{y} = 16$ د) تک حفرة

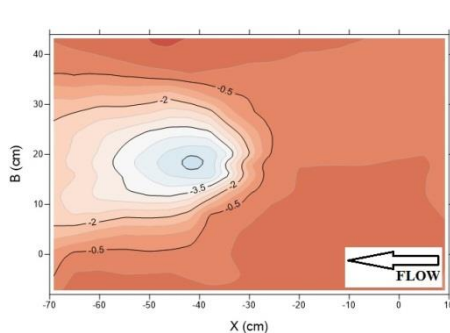
در شکل ۴-۶ تغییرات دو بعدی حفرة پایین دست در پلان برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ و ۱۲، ۱۶ و $\frac{l}{y} = 8$ ، و حالت تک حفرة نشان داده شده است. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، حرکت رسوبات فرسایش یافته از بالادست به گونه‌ای است که از دو طرف حفرة به صورت مورب و واگرا حرکت کرده و با پیشروی به سمت جلو بر سطح آن افزوده می‌شود این امر سبب می‌شود هر چه فاصله حفرة پایین دست دورتر باشد مقادیر کمتری از رسوب فرسایش یافته وارد حفرة پایین دست شود و مقداری از رسوبات فرسایش یافته از اطراف حفرة پایین دست فرار می‌کند.



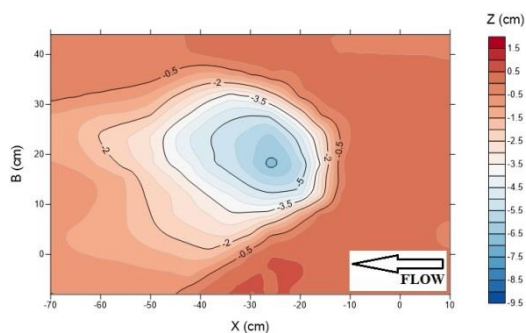
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۶- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{L}{y} = 8$

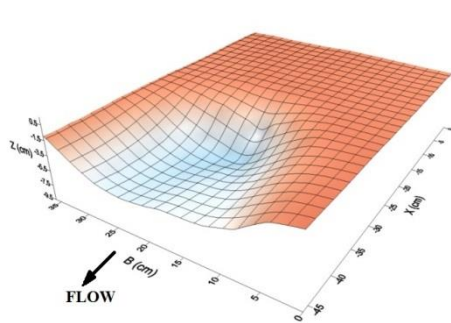
(ب) $\frac{L}{y} = 12$ (ج) $\frac{L}{y} = 16$ (د) تک حفره

شکل ۴-۷- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$

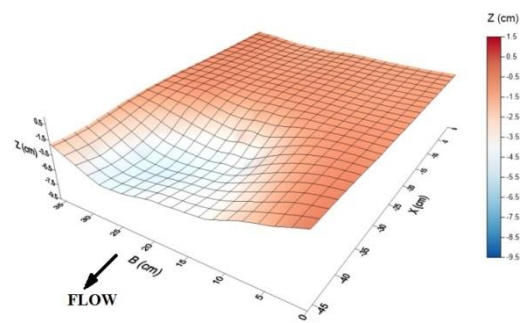
و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ حالت تک حفره را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در

$\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ ، میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب

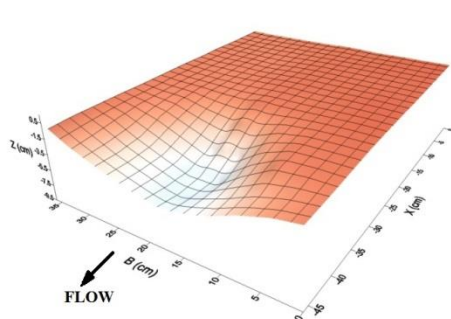
۶۴/۹۶٪، ۵۹/۰۳٪، ۵۲/۰۸٪ و برای حالت تک حفره ۸۴/۷۶٪ است.



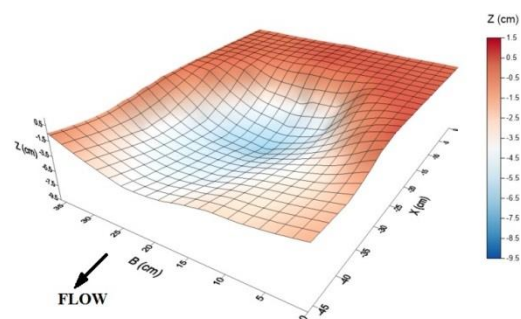
(ب)



(الف)



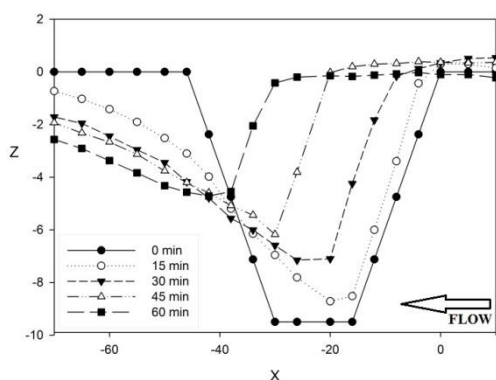
(د)



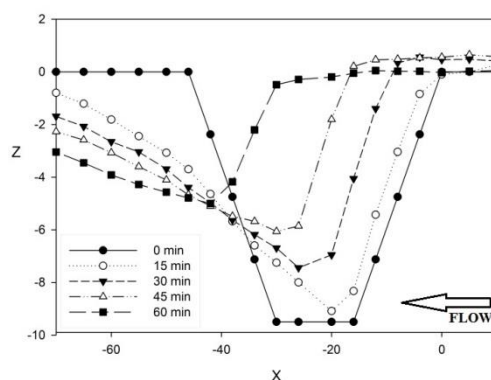
(ج)

شکل ۴-۷- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 0.50\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

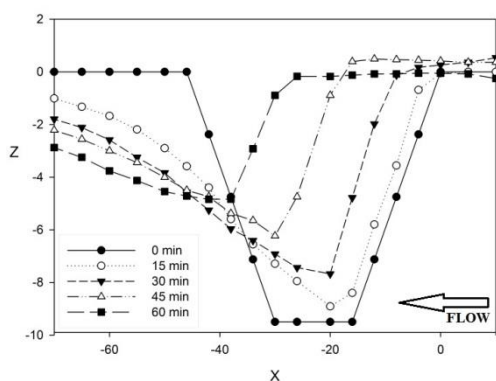
شکل ۴-۸- تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 0.35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و $\frac{S}{B} = 0.50\%$ حالت تک حفره را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود نتایج مشابه حالت $\frac{S}{B} = 0.50\%$ است و در هر چهار نسبت $\frac{l}{y}$ پس از ۶۰ دقیقه حفره بالادست تغییر شکل یکسان دارد. بنابراین دورتر شدن حفره پایین دست تاثیری بر پیشروی حفره بالادست ندارد.



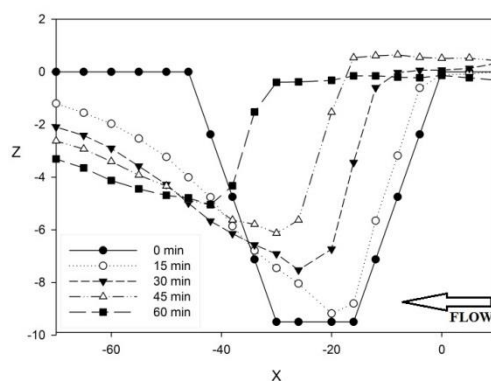
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۸- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = \frac{1}{28}$ و $\frac{s}{B} = 35\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

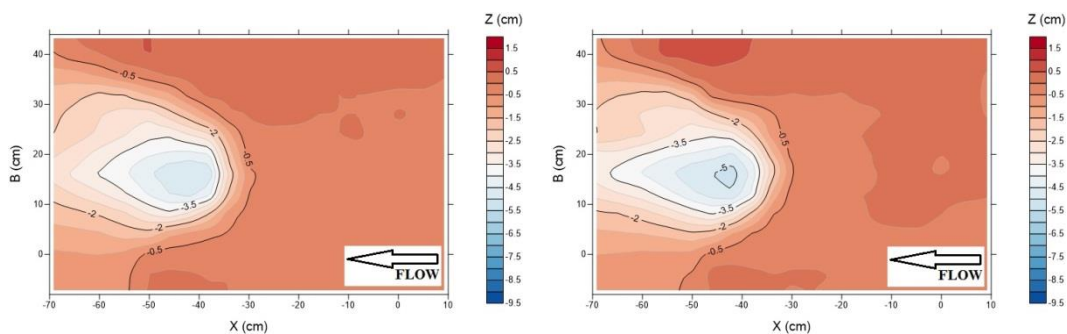
در شکل ۴-۹ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = \frac{1}{28}$ و $\frac{s}{B} = 35\%$ و ۱۶، ۱۲،

$\frac{l}{y} = 8$ ، و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود بلحاظ ظاهری نتایج

تفاوت چندانی با حالت $\frac{s}{B} = 50\%$ نمی کند و فقط کشیدگی حفره به سمت پایین دست در مرکز مرز

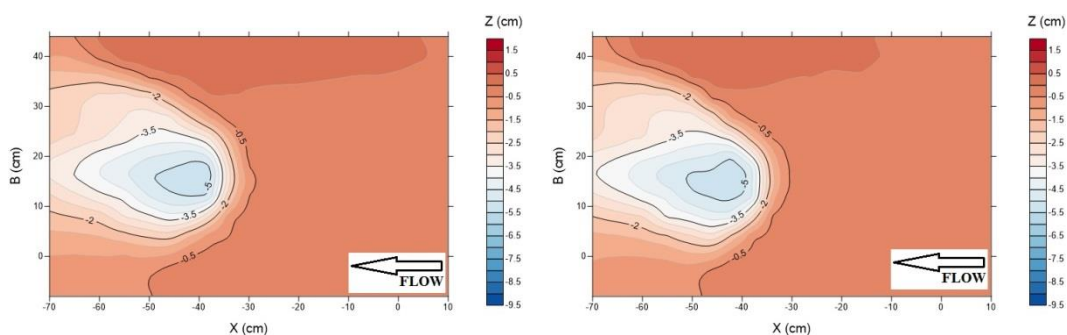
پایین دست متمرکز شده و حفره باریک تر می شود. در حالی که در $\frac{s}{B} = 50\%$ کل مرز پایین بصورت

یکنواخت فرسایش می یابد.



(ب)

(الف)



(د)

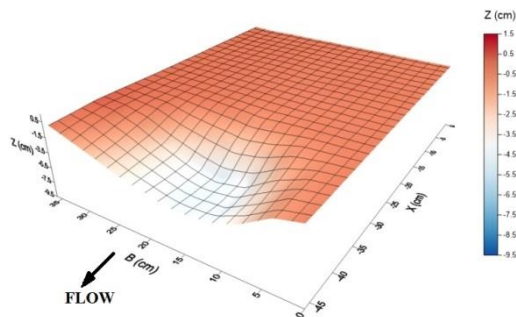
(ج)

شکل ۴-۹- تغییرات دوی بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 35\%$

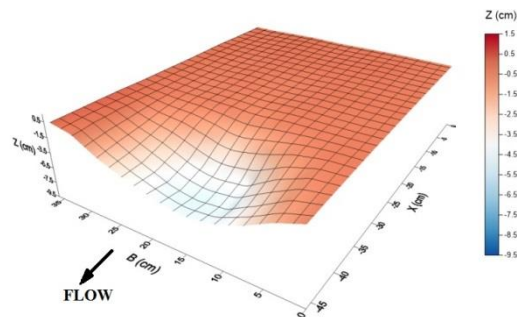
الف) $\frac{l}{y} = 8$ ب) $\frac{l}{y} = 12$ ج) $\frac{l}{y} = 16$ د) تک حفره

با توجه به شکل ۴-۹ مشاهده می شود تغییرات دوبعدی توپوگرافی حفره و اطراف آن به لحاظ کیفی با افزایش فاصله حفره پایین دست تغییر آنچنانی نمی کند و پرشدن حفره به صورت نیم دایره و فرسایش آن به صورت متمرکز در پایین دست صورت می گیرد. این امر نشان می دهد که جابجایی حفره پایین دست بر شکل پرشدن و فرسایش حفره بالادست تاثیری ندارد. شکل ۴-۱۰ تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره

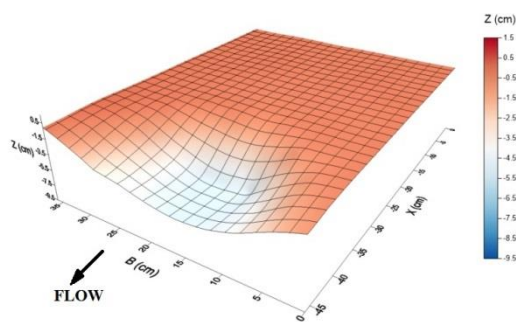
بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب ۸۸/۶۳٪، ۸۷/۳۸٪، ۸۷/۰۵٪ و برای حالت تک حفره ۸۵/۷۱٪ است که نشان دهنده کاهش نامحسوس در تغییر حجم پرشدگی است.



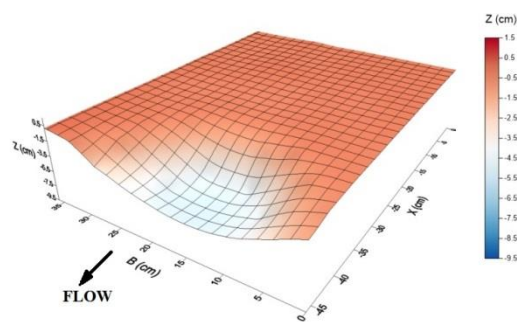
(ب)



(الف)



(د)



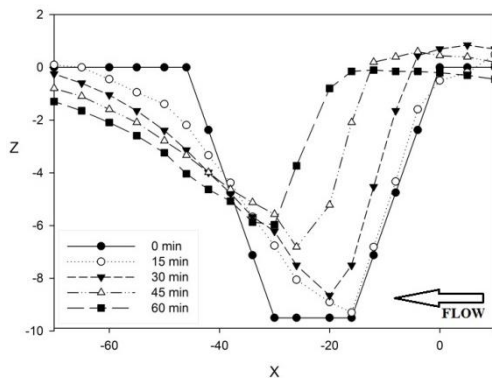
(ج)

شکل ۴-۱۰- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

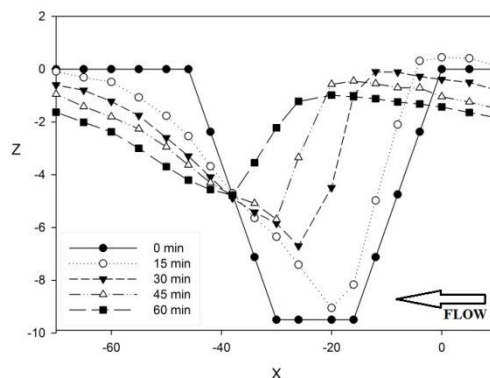
شکل ۴-۱۱- تغییرات پیشروی حفره پایین دست برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد.

همانگونه که در شکل مشاهده می شود شرایطی مشابه حالت $\frac{S}{B} = 50\%$ اتفاق می افتد و با دورتر شدن حفره پایین دست از میزان رسوب گذاری درون حفره و پیشروی حفره به سمت پایین دست کاسته

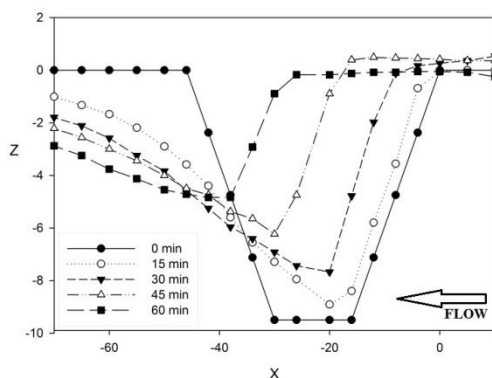
می‌شود. اما اگر حفره پایین دست بسیار دور شود (حالت تک حفره) مجدداً پیشروی حفره افزایش می‌یابد.



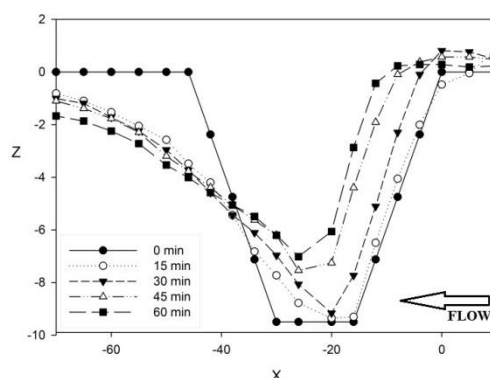
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۱ الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 35\%$

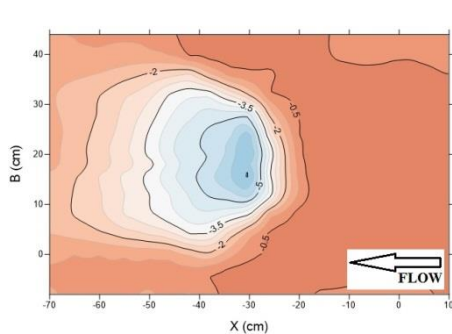
(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

در شکل ۴-۱۲ تغییرات دو بعدی حفره پایین دست در پلان برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و ۱۶، ۱۲،

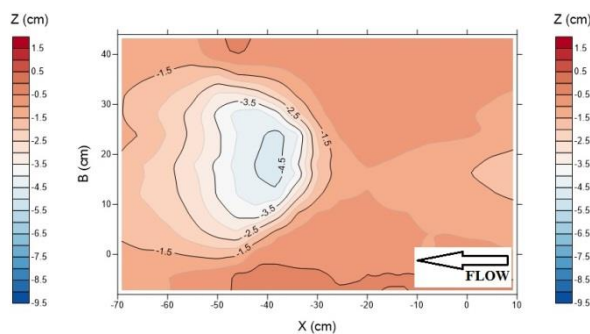
$\frac{l}{y} = 8$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به لحاظ تغییرات دو بعدی نیز

مشابه حالت $\frac{S}{B} = 50\%$ است و الگوی پر شدگی و پیشروی حفره تغییری نمی‌کند. همانگونه که

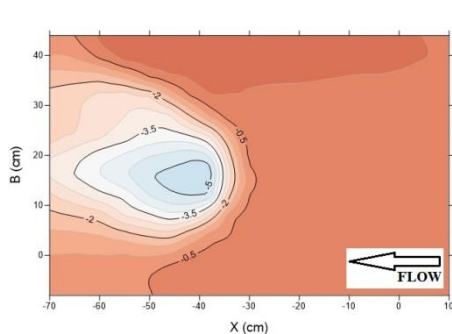
مشاهده می‌شود در $\frac{L}{y} = 8$ و در بالای حفره تراز بستر افت زیادی کرده است و با افزایش نسبت $\frac{L}{y}$ تا مقدار ۱۶ از افت تراز بستر کاسته می‌شود. این امر سبب می‌شود که رسوبات کمتری وارد حفره شده و سرعت پیشروی کاهش یابد.



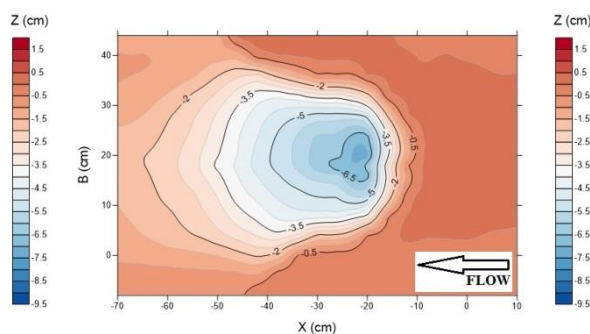
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۲- تغییرات دو بعدی حفره پایین‌دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 35\%$

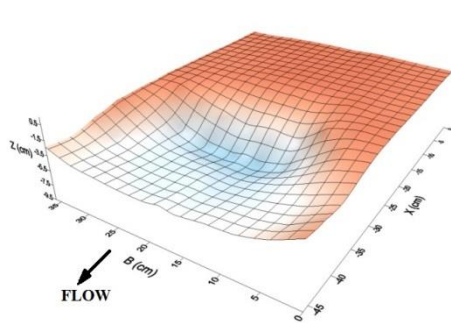
الف) $\frac{L}{y} = 8$ ب) $\frac{L}{y} = 12$ ج) $\frac{L}{y} = 16$ د) تک حفره

شکل ۴-۱۳- تغییرات سه بعدی حفره پایین‌دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 35\%$

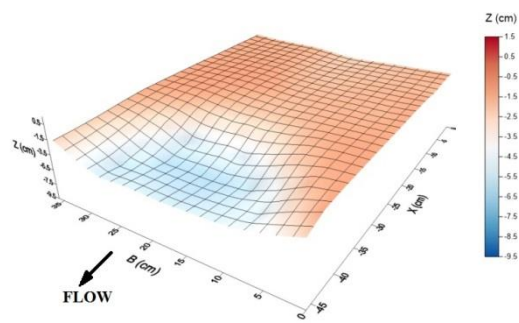
و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ حالت تک حفره را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$

، میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $66/5\%$ و $58/2\%$ ،

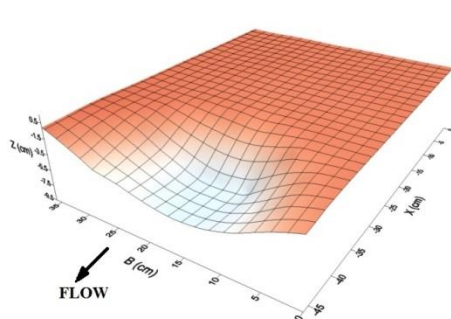
$50/89\%$ و برای حالت تک حفره $85/71\%$ است.



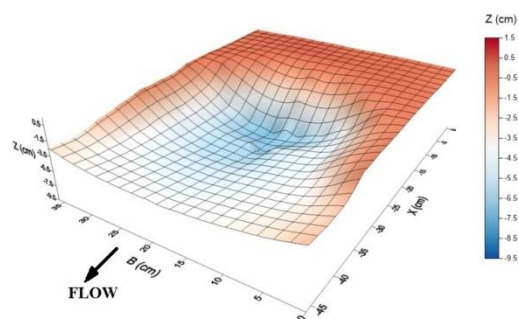
(ب)



(الف)



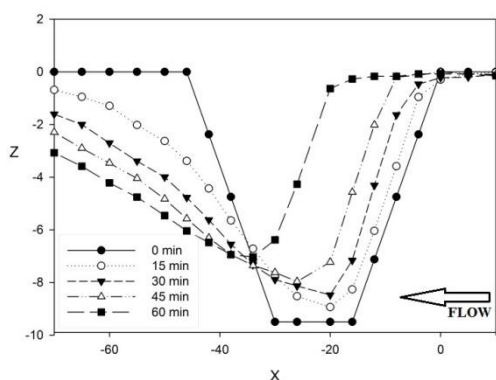
(د)



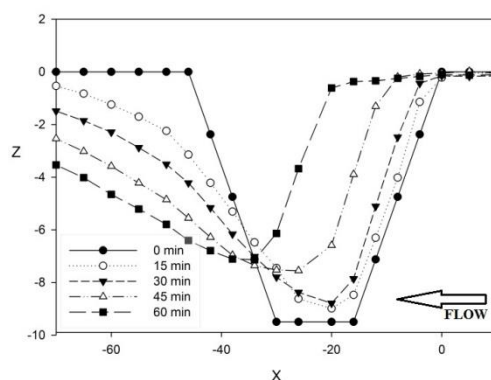
(ج)

شکل ۴-۱۳- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 0.35$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

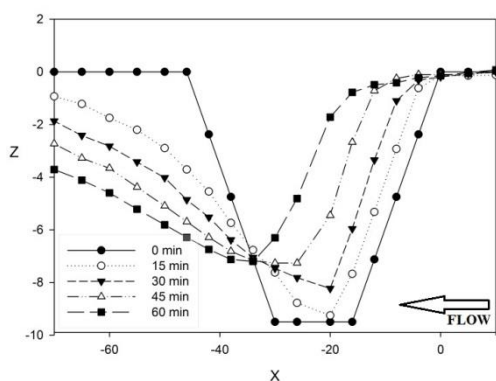
شکل ۴-۱۴- تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 0.20$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود میزان پیشروی حفره از حالت های $\frac{S}{B} = 0.50$ و $\frac{S}{B} = 0.35$ کمتر است همچنین پایین افتادگی بستر در پایین دست در این حالت بیشتر است اما نسبت $\frac{l}{y}$ تاثیری بر نحوه پرشدگی و پیشروی حفره بالادست ندارد.



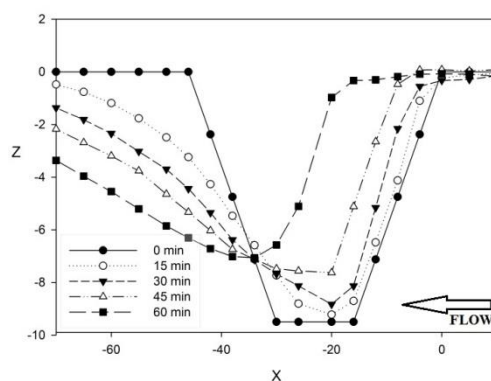
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۴- الگوی انتقال رسوب در حفرة بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 20\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفرة

در شکل ۴-۱۵ تغییرات دو بعدی حفرة بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 20\%$ و ۱۶، ۱۲،

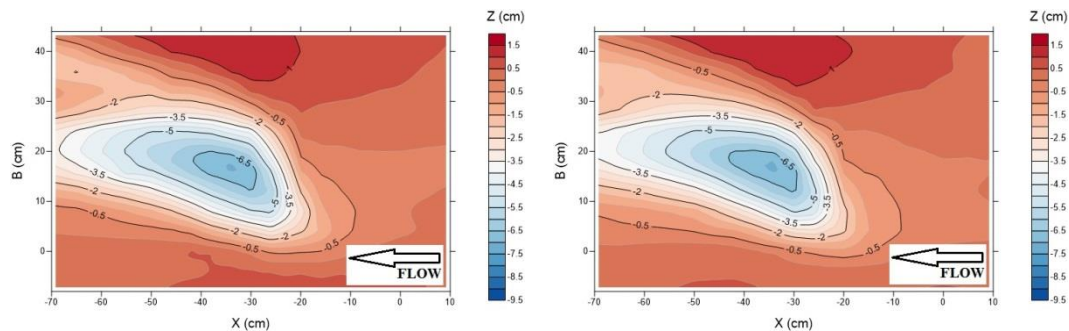
$\frac{l}{y} = 8$ و حالت تک حفرة نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود نحوه پرشدگی با حالات

$\frac{s}{B} = 50\%$ و $\frac{s}{B} = 35\%$ کاملاً متفاوت بوده و حفرة بصورت مورب حرکت می کند. این امر به دلیل

جانمایی حفرة و قرارگیری نزدیک دیواره اتفاق می افتد. در واقع حفرة، جریانی که از بالادست کانال

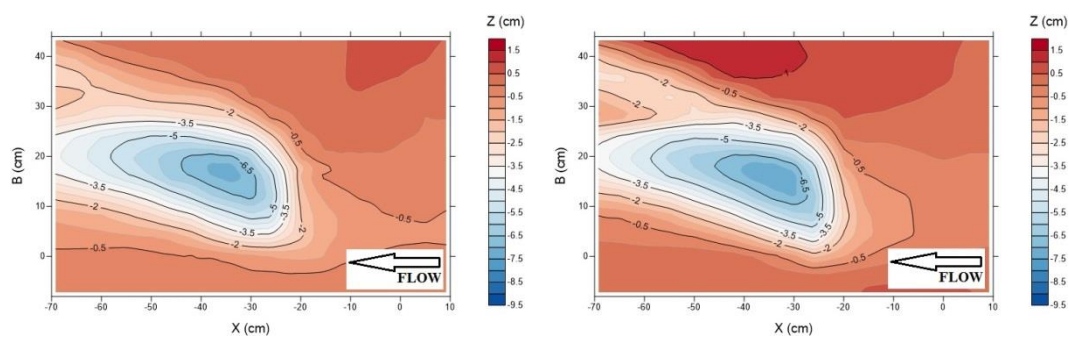
وارد می شود را به سمت خود می کشد که به این پدیده تسخیر جریان توسط حفرة می گوئیم. و سبب

می شود جریان از سمت راست حفره، وارد حفره شود. این جریان به دیواره برخورد کرده و منحرف می شود و این انحراف سبب پیشروی مورب حفره خواهد شد.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۴-۱۵- تغییرات دوبعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

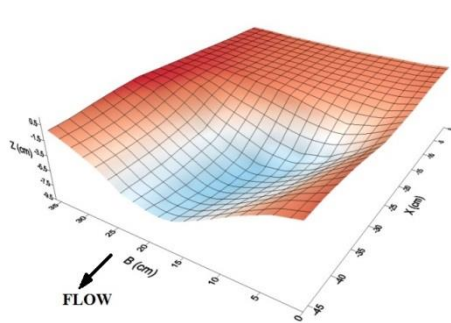
(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

با توجه به شکل ۴-۱۵ مشاهده می شود که تغییرات دوبعدی توپوگرافی حفره و اطراف آن به لحاظ کیفی با افزایش فاصله حفره پایین دست تغییر آنچنانی نمی کند و پر شدن حفره مورب صورت می گیرد. این امر نشان می دهد که جابجایی حفره پایین دست بر شکل پر شدن و فرسایش حفره بالادست تاثیری ندارد. در شکل ۴-۱۶ تصویر حفره بالادست در انتهای آزمایش با مشخصات $1/28 = \frac{l}{b}$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ نشان داده شده است.

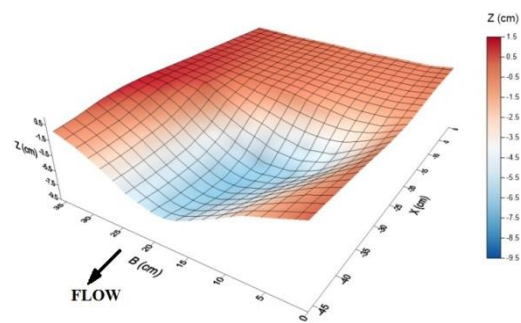


شکل ۴-۱۶- حفره بالادست در انتهای آزمایش با مشخصات $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 20\%$ و $\frac{l}{y} = 8$

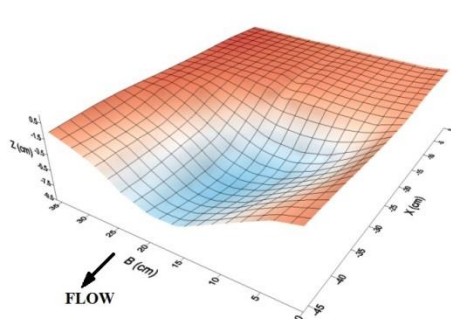
شکل ۴-۱۷ تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 20\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین حالت تک حفره نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $65/18\%$, $65/57\%$, $63/84\%$ و برای حالت تک حفره $59/47\%$ است که نشان دهنده کاهش نامحسوس در تغییر حجم پرشدگی است اما در حالت تک حفره این کاهش بیشتر می‌شود.



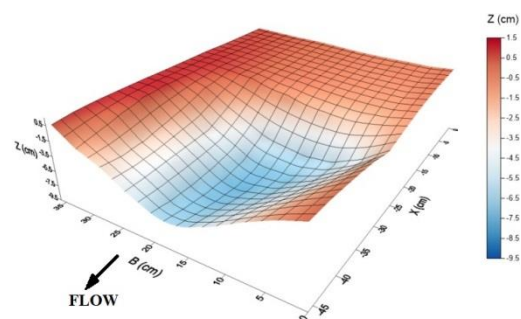
(ب)



(الف)



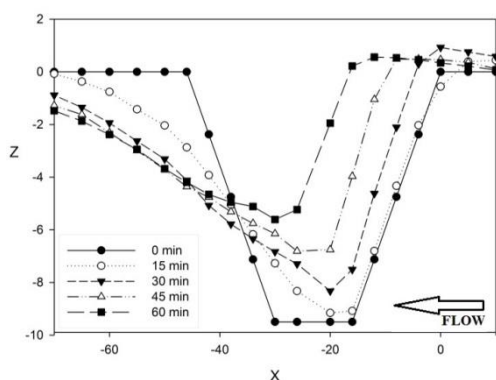
(د)



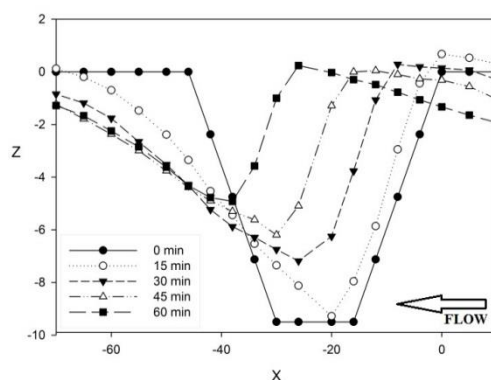
(ج)

شکل ۴-۱۷- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

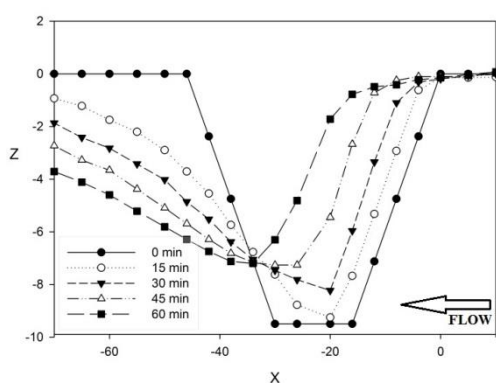
شکل ۴-۱۸- تغییرات پیشروی حفره پایین دست برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود شرایطی مشابه حالات $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ اتفاق می افتد و با دورتر شدن حفره پایین دست از میزان رسوب گذاری درون حفره و پیشروی حفره به سمت پایین دست کاسته می شود. اما اگر حفره پایین دست بسیار دور شود (حالت تک حفره) مجدداً پیشروی حفره افزایش می یابد.



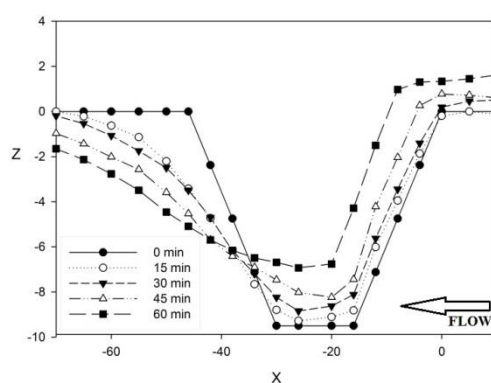
(ب)



(الف)



(د)

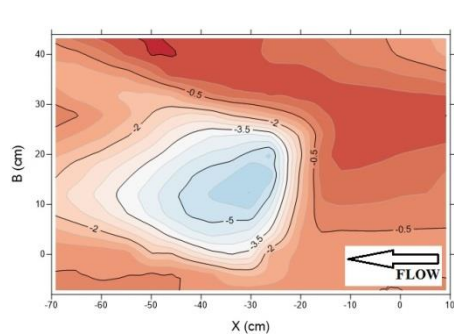


(ج)

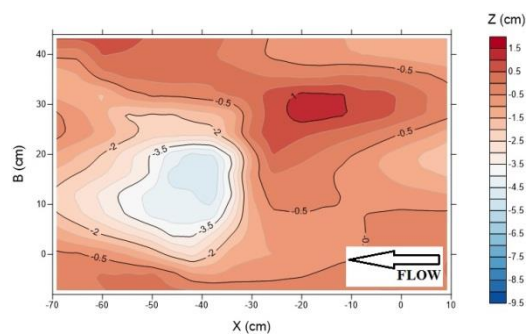
شکل ۴-۱۸- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

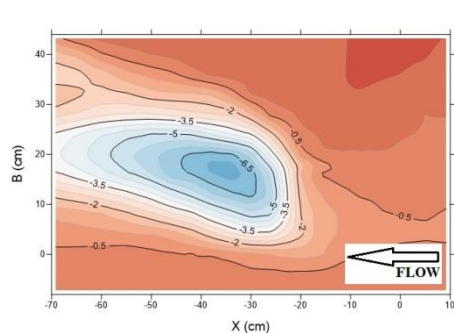
در شکل ۴-۱۹ تغییرات دو بعدی حفره پایین دست در پلان برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و ۱۶، ۱۲، $\frac{l}{y} = 8$ ، و حالت تک حفره نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد تراز بستر در سمت راست حفره بیشتر است و این امر سبب می شود که پرشدگی حفره ها از سمت راست حفره صورت گیرد زیرا بدلیل پیشروی مورب حفره بالادست به سمت مرکز کانال باعث می شود که مصالح بستر در ناحیه سمت راست حفره پایین دست قرار بگیرند.



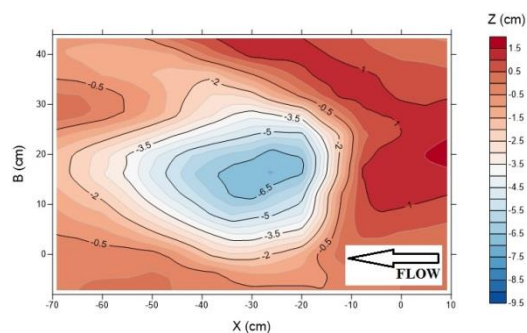
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۹- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{b} = 20\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

شکل ۴-۲۰- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{b} = 20\%$

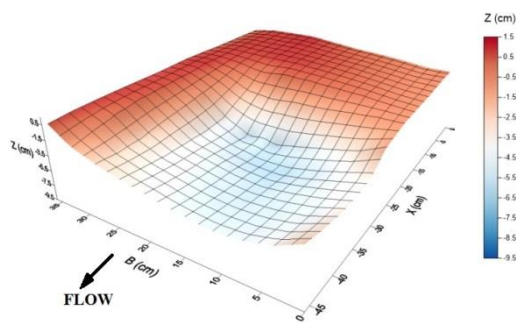
و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می دهد. نتایج حاکی از آن است که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ ،

میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $83/26\%$ ، $64/18\%$ ،

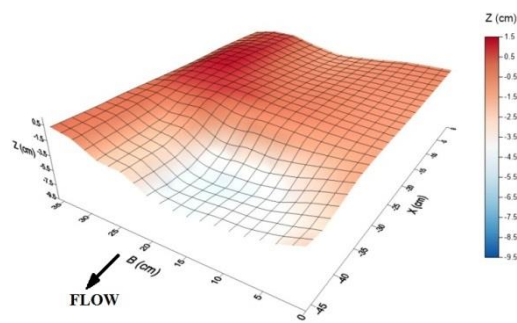
$46/27\%$ و برای حالت تک حفره $59/47\%$ است. پرشدگی از سمت راست حفره ها در شکل ۴-۲۰

کاملاً مشهود است. جدول ۴-۱ و ۴-۲ خلاصه ای از میزان میانگین پرشدگی حفره ها را در حالت های

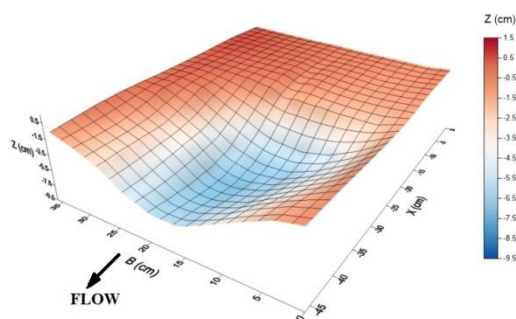
ذکر شده نشان می دهد.



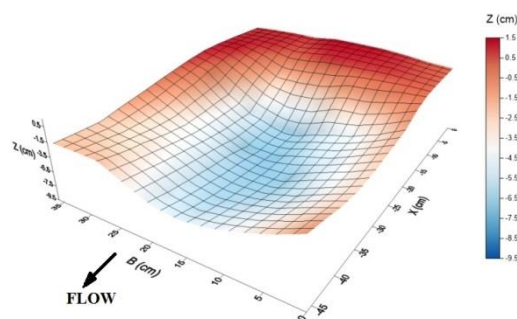
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۲۰- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

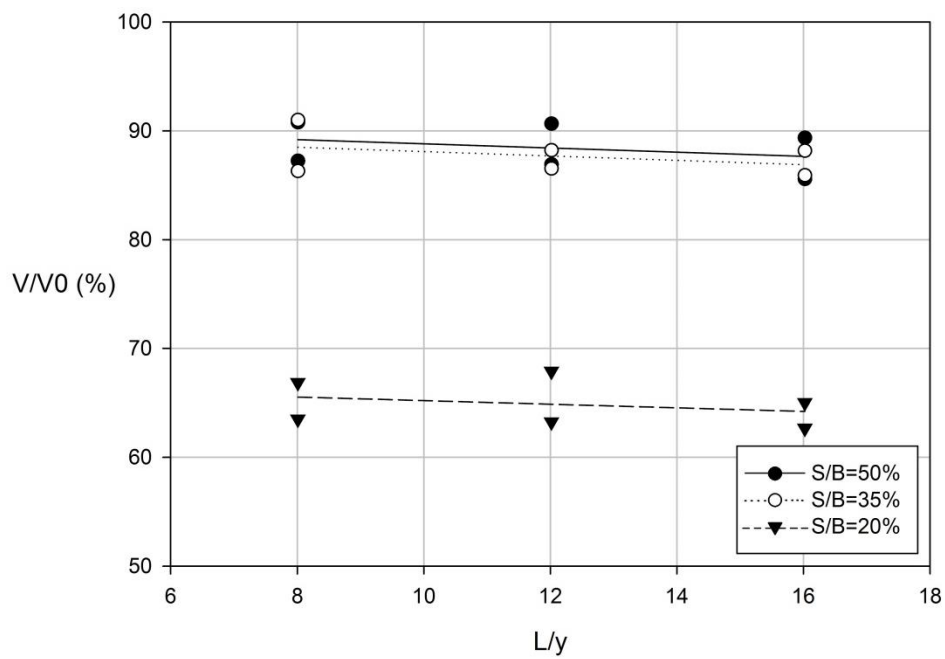
جدول ۴-۱- میزان پرشدگی حفره بالادست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $\frac{l}{b} = 1/28$

فاصله حفره ها جانمایی از دیواره	$\frac{L}{y} = 8$	$\frac{L}{y} = 12$	$\frac{L}{y} = 16$	تک حفره
$\frac{S}{B} = 20\%$	۶۵/۱۸	۶۵/۵۷	۶۳/۸۴	۵۹/۴۷
$\frac{S}{B} = 35\%$	۸۸/۶۳	۸۷/۳۸	۸۷/۰۵	۸۵/۷۱
$\frac{S}{B} = 50\%$	۸۹/۰۲	۸۸/۷۹	۸۷/۴۷	۸۴/۷۶

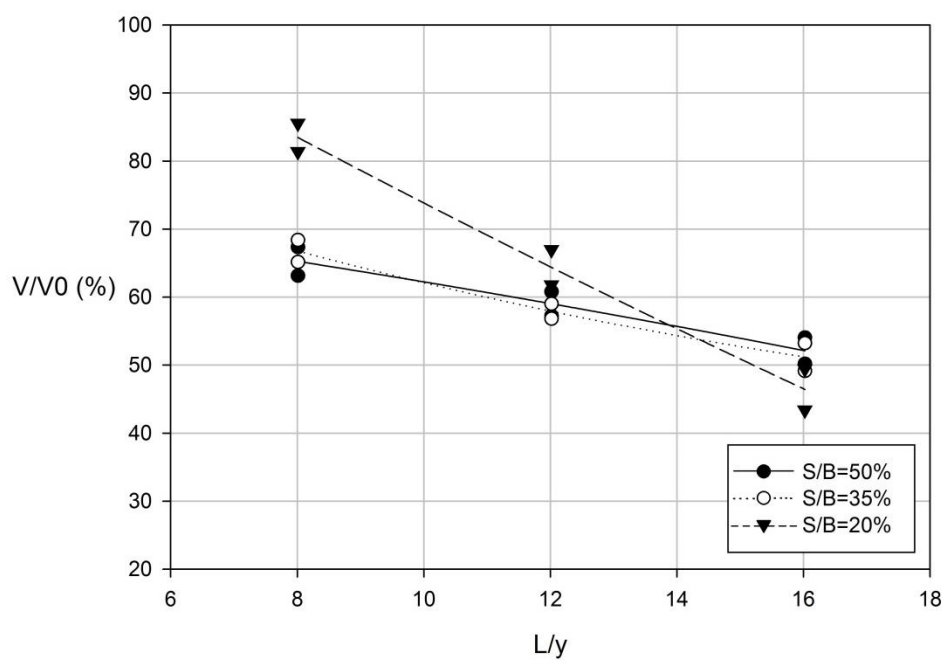
جدول ۲-۴- میزان پرشدگی حفره پایین دست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $\frac{l}{b} = 1/28$

فاصله حفره ها جانمایی از دیواره	$\frac{L}{y} = 8$	$\frac{L}{y} = 12$	$\frac{L}{y} = 16$	تک حفره
$\frac{S}{B} = 20\%$	۸۳/۲۶	۶۴/۱۸	۴۶/۲۷	۵۹/۴۷
$\frac{S}{B} = 35\%$	۶۶/۵	۵۸/۲	۵۰/۸۹	۸۵/۷۱
$\frac{S}{B} = 50\%$	۶۴/۹۴	۵۹/۰۳	۵۲/۰۸	۸۴/۷۶

تاثیر فاصله بین حفره ها در تغییرات حجم حفره بالادست و پایین دست در قالب بهترین برازش از نقاط در شکل ۲۱-۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۲۱-الف مشاهده می شود که با دورتر شدن حفره پایین دست، حجم حفره بالادست بطور نامحسوس کاهش می یابد. همچنین میزان پرشدگی حفره بالادست برای $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ تقریباً یکسان بوده اما در $\frac{S}{B} = 20\%$ در حدود ۲۵ درصد کاهش می یابد. بنابراین هرچقدر حفره به سمت دیواره منتقل شود حجم پرشدگی کاهش محسوسی می یابد و این امر بدلیل عملکرد متفاوت جریان در این حالت اتفاق می افتد زیرا جریان بطور معمول از دو سمت بالادست حفره وارد شده و از دو سمت پایین دست خارج می شود. بدلیل قرارگیری حفره نزدیک دیواره، جریان در این حالت فقط از سمت راست حفره رسوب را به درون حفره منتقل می کند اما در $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ جریان از هر دو سمت وارد حفره می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۱- تأثیر فاصله بین حفره‌ها بر پرشدگی آن‌ها در $\frac{l}{b} = 1/28$ (الف) حفره بالادست (ب) حفره پایین-

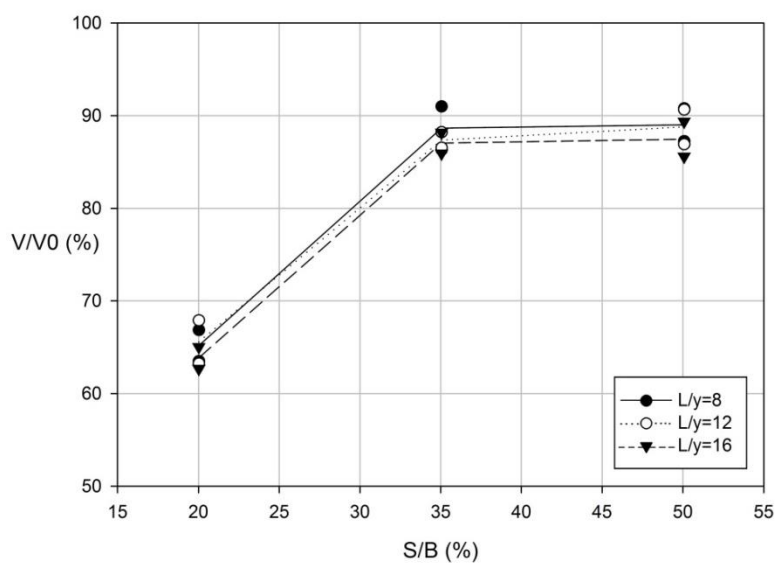
دست

در شکل ۴-۲۱-ب مشاهده می‌شود که در $\frac{S}{B} = 20\%$ ، 35% ، 50% 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 بدلیل تاثیر دیواره روی جریان و الگوی پرشدگی حفره است.

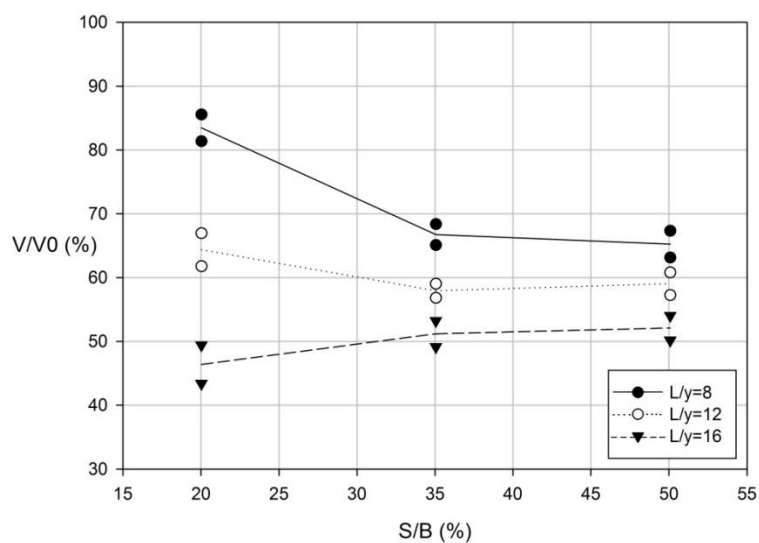
در شکل ۴-۲۲ اثر فاصله حفره‌ها از دیواره بر تغییرات حجم حفره نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۲۲-الف با حرکت حفره بالادست از سمت دیواره به مرکز کانال میزان پرشدن آن افزایش می‌یابد اما از $\frac{S}{B} = 35\%$ الی $\frac{S}{B} = 50\%$ میزان پرشدگی تغییر چندانی نمی‌کند. این امر نشان می‌دهد که دیواره کانال اثر قابل توجهی در کاهش حجم پرشدگی دارد (کاهش ۲۵ درصدی) 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.

در شکل ۴-۲۲-ب اثر فاصله حفره پایین‌دست از دیواره را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان دریافت روند تغییرات حجم پرشدگی $\frac{S}{B} = 20\%$ الی $\frac{S}{B} = 35\%$ با افزایش فاصله بین حفره‌ها تغییر می‌کند. بدین صورت که با افزایش فاصله بین حفره بالادست تا پایین‌دست تا $12 \leq \frac{L}{y} \leq 8$ دیواره تاثیری مطلوب بر پرشدگی حفره می‌گذارد و با توجه به شکل ۴-۲۱-ب و این تاثیر مطلوب تا $\frac{L}{y} = 14$ نیز صادق است (محل تقاطع نمودار $\frac{S}{B} = 20\%$ با دو حالت دیگر) اما از $\frac{L}{y} = 14$ به بعد دیواره اثر منفی گذاشته و حجم پر شده کاهش می‌یابد. $\frac{S}{B} = 35\%$ الی $\frac{S}{B} = 50\%$ در تغییر حجم پرشده بی‌تاثیر بوده و این امر مستقل از فاصله بین حفره بالادست از پایین‌دست است. اما افزایش فاصله بین حفره‌ها بر اثر جانمایی از دیواره تاثیری دارد و باعث کاهش میزان پرشدگی می‌شود.

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله بین حفره‌ها تاثیر آنچنانی بر پرشدگی حفره بالادست ندارد اما بر حفره پایین‌دست بسیار تاثیرگذار است.



(الف)



(ب)

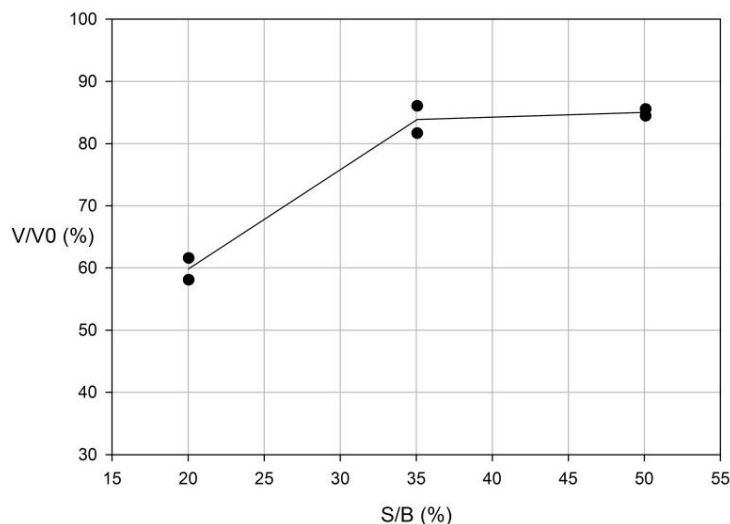
شکل ۴-۲۲- تاثیر فاصله حفره ها از دیواره بر پرشدگی آنها در $\frac{l}{b} = 1/28$

الف) حفره بالادست ب) حفره پایین دست

تاثیر جانمایی حفره نسبت به دیواره در تغییرات حجم تک حفره در قالب بهترین برازش از نقاط در

شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش فاصله حفره از دیواره، ۲۵

درصد بر میزان پرشدگی افزوده می‌شود اما از نسبت $\frac{S}{B} = ۰.۳۵$ الی $\frac{S}{B} = ۰.۵۰$ تغییرات پرشدگی ثابت مانده و جانمایی از دیواره بی تاثیر است.



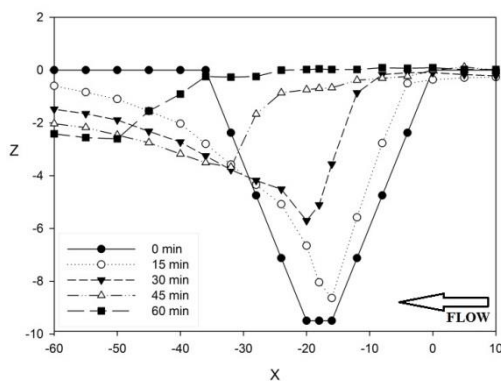
شکل ۴-۲۳- تاثیر فاصله تک حفره از دیواره در $\frac{l}{b} = ۱/۲۸$ بر مقدار پرشدگی

در نتیجه به منظور دستیابی به حالت بهینه بهتر است که حفره‌ها بین $\frac{S}{B} = ۰.۳۵$ الی $\frac{S}{B} = ۰.۵۰$ قرار بگیرد و از طرفی حفره پایین دست $\frac{L}{y} \leq ۸$ حفر شود اما با توجه به شکل ۴-۲۳ و جدول ۴-۲ می‌توان دریافت که اگر حفره پایین دست به اندازه کافی دور باشد و به صورت تک حفره عمل کند، حجم پرشدگی حفره پایین دست ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین تعیین نسبت $\frac{L}{y}$ برای مقادیر بزرگتر از ۱۶ توسط داده های آزمایشگاهی امکان پذیر نبوده و توسط مدل عددی تعیین می‌شود.

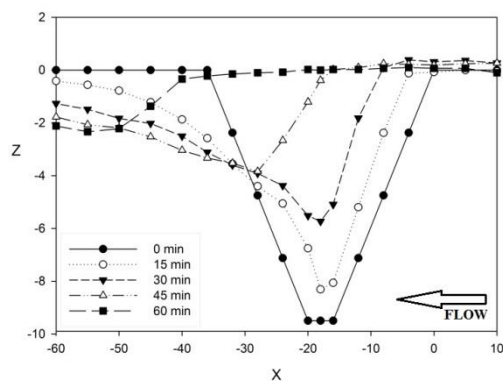
۴-۳- نتایج در شرایط برداشت در راستای عرض کانال ($\frac{l}{b} = ۰/۷۸$)

شکل ۴-۲۴ تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{l}{b} = ۰/۷۸$ و $\frac{S}{B} = ۰.۵۰$ و $\frac{L}{y} = ۸, ۱۲, ۱۶$ و حالت تک حفره نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در هر چهار نسبت $\frac{L}{y}$ پس از ۶۰ دقیقه حفره بالادست کاملاً پر شده و تغییر شکل یکسان دارد. بنابراین دورتر شدن حفره پایین دست تاثیری بر پرشدن حفره بالادست ندارد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود پر شدگی حفره در گام‌های زمانی نشان داده شده بیشتر از حالت $\frac{l}{b} = ۱/۲۸$ است زیرا عرض حفره در این حالت بیشتر

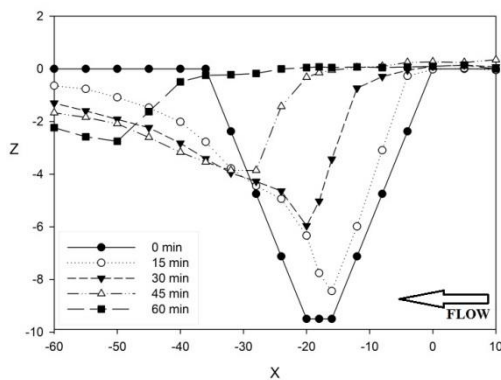
شده و مقدار بیشتری از رسوب وارد حفره می‌شود. از طرفی طول حفره کوتاه‌تر شده و این امر سبب می‌شود فاصله شیب بالادست و پایین دست حفره کم شود و با حرکت حفره به سمت پایین‌دست زودتر به شیب پایین دست می‌رسد. این امر باعث تسریع در پر شدن حفره و بالا آمدن قعر حفره می‌شود.



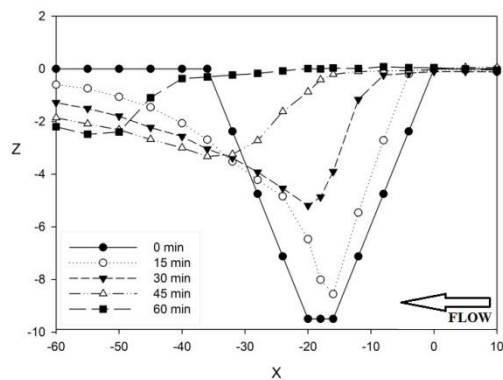
(ب)



(الف)



(د)

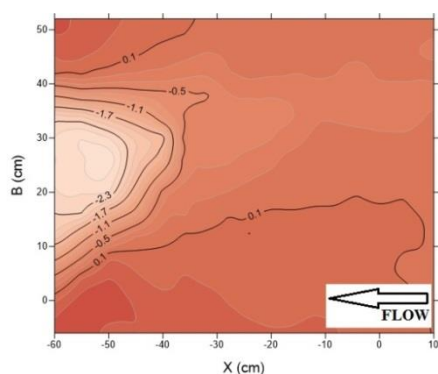


(ج)

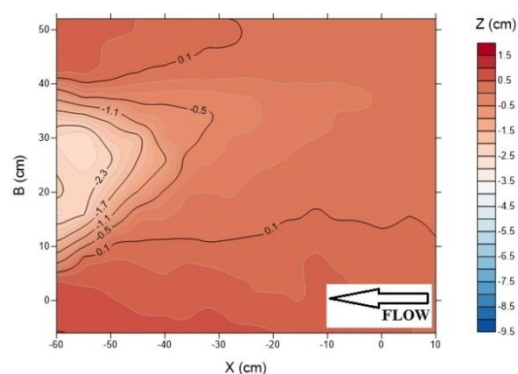
شکل ۴-۲۴- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b}=0.78$ و $\frac{S}{B}=50\%$

الف) $\frac{l}{y}=8$ ب) $\frac{l}{y}=12$ ج) $\frac{l}{y}=16$ د) تک حفره

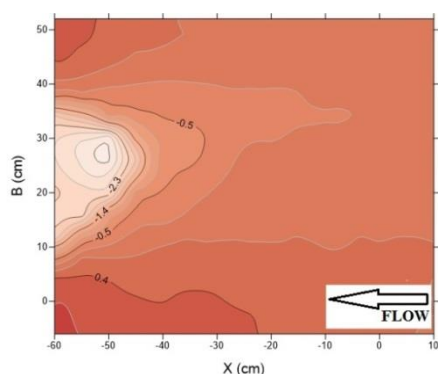
در شکل ۴-۲۵ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{L}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ و ۱۶، ۱۲، ۸، $\frac{L}{y}$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود حفره پس از گذشت زمان کاملاً به پایین دست مهاجرت کرده و کل حفره پر شده است. با توجه به شکل ۴-۲۵ می‌توان دریافت که افزایش فاصله بین حفره‌ها تأثیری در شکل پر شدن و مهاجرت حفره بالادست ندارد.



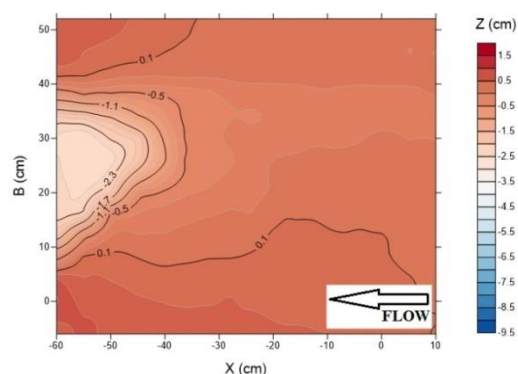
(ب)



(الف)



(د)

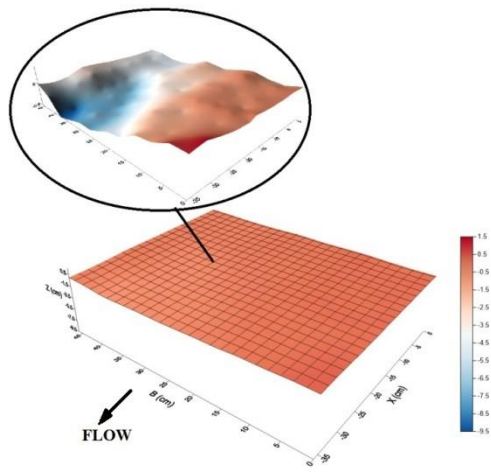


(ج)

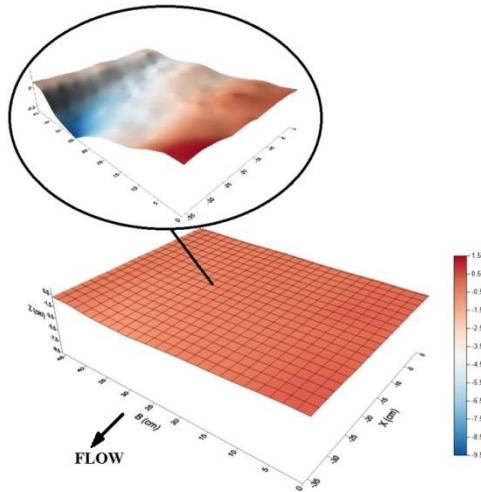
شکل ۴-۲۵-تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{L}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{L}{y} = 8$ (ب) $\frac{L}{y} = 12$ (ج) $\frac{L}{y} = 16$ (د) تک حفره

شکل ۴-۲۶ تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{L}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ و ۱۶، ۱۲، ۸، $\frac{L}{y}$ میانگین حالت تک حفره نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ۱۶، ۱۲، ۸، $\frac{L}{y}$ میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب ۹۸/۹۸ %، ۹۷/۹۲ %،

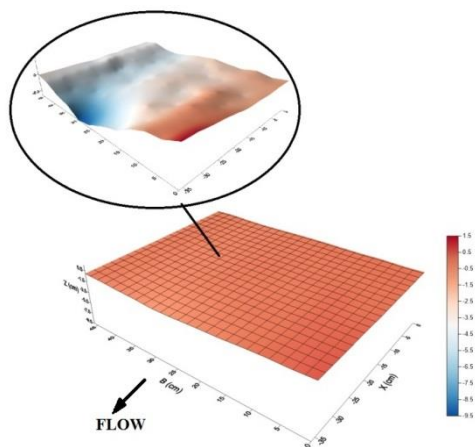
حفره ها بر پرشدگی حفره بالادست بی تاثیر است.
 ۹۸/۲۷٪ و برای حالت تک حفره ۹۷/۸۵٪ است که نشان دهنده این است که افزایش فاصله بین



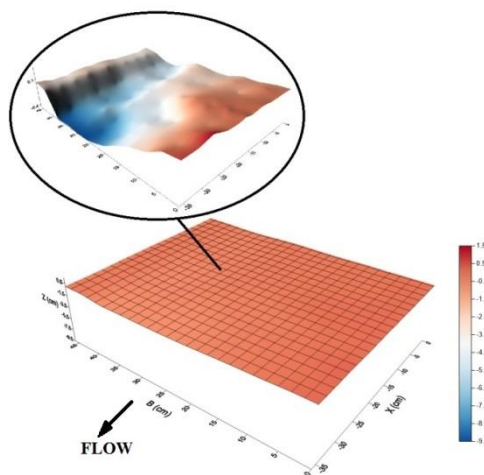
(ب)



(الف)



(د)



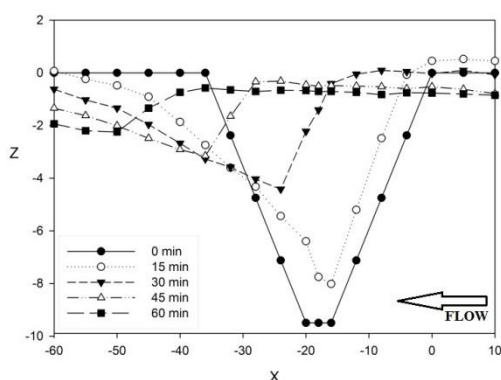
(ج)

شکل ۴-۲۶- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{L}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{L}{y} = 8$ (ب) $\frac{L}{y} = 12$ (ج) $\frac{L}{y} = 16$ (د) تک حفره =

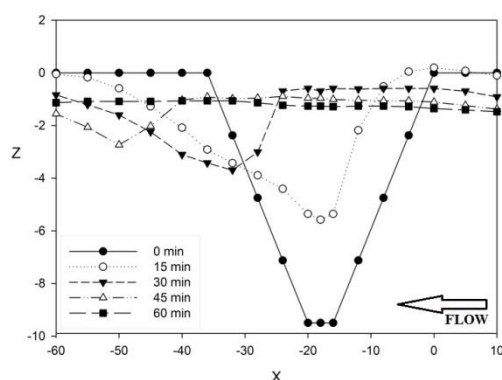
لازم به ذکر است که تصویر داخل دایره تغییر شکل سطح حفره است زیرا در شکل اصلی مقدار ارتفاع حفره با حالت حفره خالی مقیاس شده است بنابراین تفاوت چهار حالت ذکر شده در تغییر شکل سطح حفره بوده که بسیار ناچیز است. شکل ۴-۲۷ تغییرات پیشروی حفره پایین دست را برای

$\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{L}{b} = 0.78$ حالت تک حفره نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل

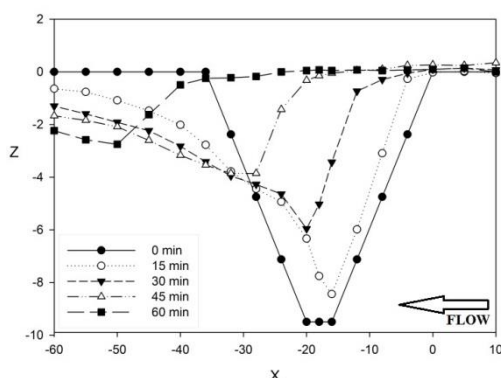
مشاهده می‌شود با دورتر شدن حفره میزان پیشروی حفره به سمت پایین دست کم می‌شود اما میزان پرشدگی حفره افزایش می‌یابد. اگر چه در شکل ۴-۲۷ الف حفره کاملاً پر شده است اما بدلیل فرسایش بستر سطح حفره پایین آمده و این امر سبب می‌شود از حجم پر شده کاسته شود. همچنین با توجه به شکل ۴-۲۷ الف ج مشاهده می‌شود که هر چه فاصله دو حفره افزایش یابد میزان پرشدگی حفره پایین دست در هر گام زمانی ۱۵ دقیقه کاهش می‌یابد زیرا زمان بیشتری لازم است تا مصالح فرسایش یافته از حفره بالادست به حفره پایین دست برسد و از طرفی باید فاصله بیشتری را نیز طی کند. اما در انتهای آزمایش با افزایش فاصله بین حفره ها، حجم پر شده افزایش می‌یابد.



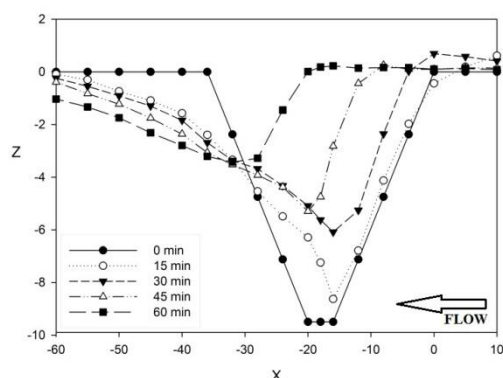
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۲۷- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 0.50$

الف) $\frac{L}{y} = 8$ ب) $\frac{L}{y} = 12$ ج) $\frac{L}{y} = 16$ د) تک حفره

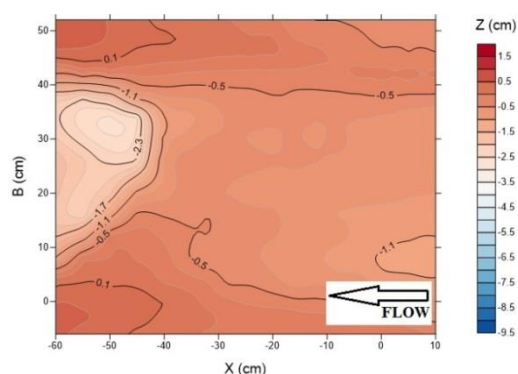
در شکل ۴-۲۸ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 0.50$ و ۱۶، ۱۲،

$\frac{L}{y} = 8$ ، و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود حفره در حالت $\frac{L}{y} = 8$ ،

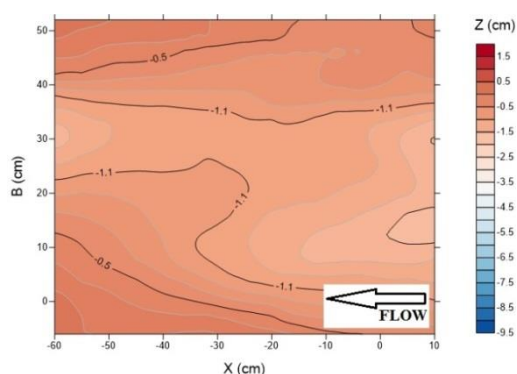
پس از گذشت زمان کاملاً به پایین دست مهاجرت کرده و کل حفره پر شده است. این امر در حالت

$\frac{L}{y} = 12$ نیز اتفاق می افتد. اما حجم پر شده نسبت به دو حالت دیگر کمتر است و این امر بخاطر

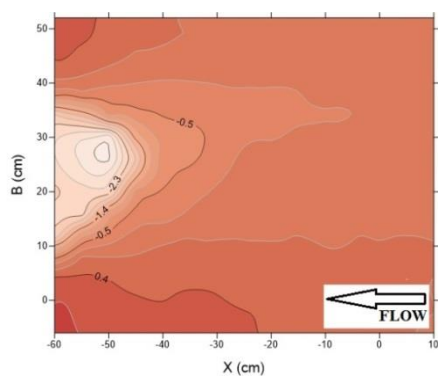
پایین افتادگی تراز سطح حفره اتفاق می افتد.



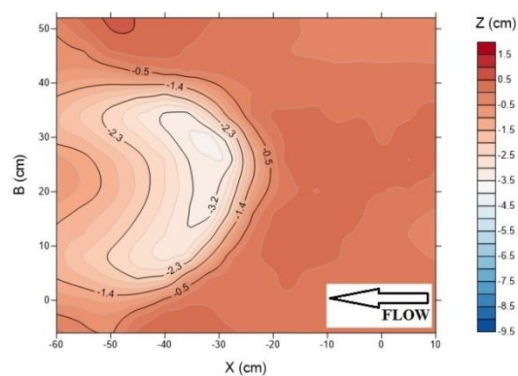
(ب)



(الف)



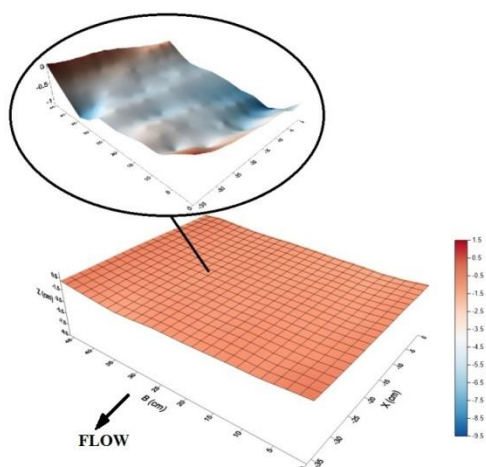
(د)



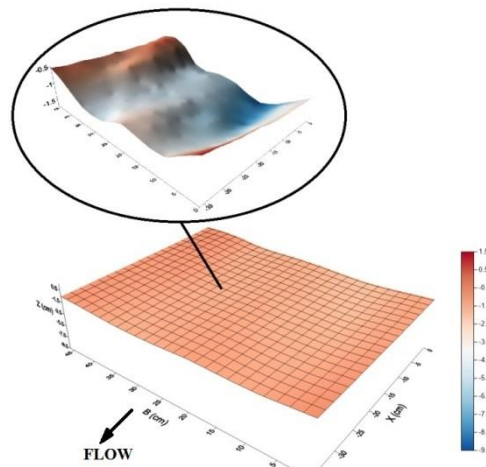
(ج)

شکل ۴-۲۸- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 0.50$ (الف) $\frac{L}{y} = 8$ (ب) $\frac{L}{y} = 12$ (ج) $\frac{L}{y} = 16$ (د) تک حفره

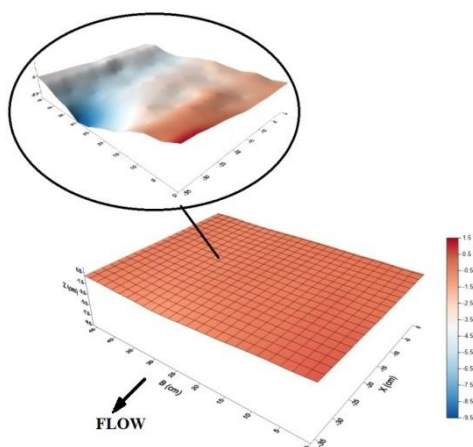
شکل ۴-۲۹- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 0.50$ و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $72/73\%$, $83/59\%$, $89/41\%$ و برای حالت تک حفره $97/85\%$ است که نشان دهنده این است که افزایش فاصله بین حفره ها باعث افزایش میزان پرشدگی حفره پایین دست می‌شود.



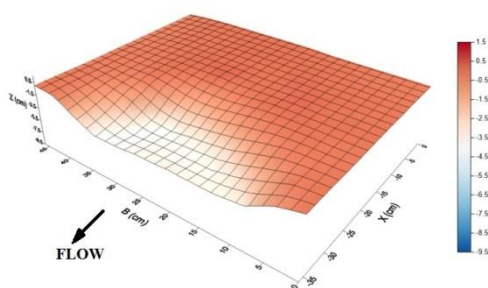
(ب)



(الف)



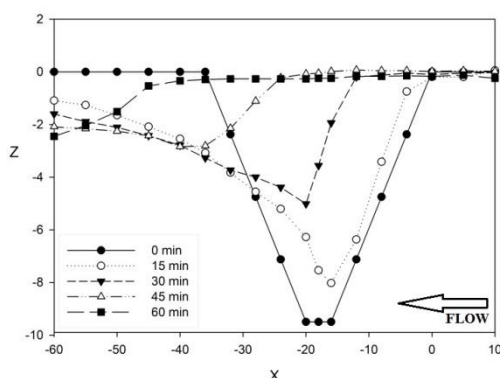
(د)



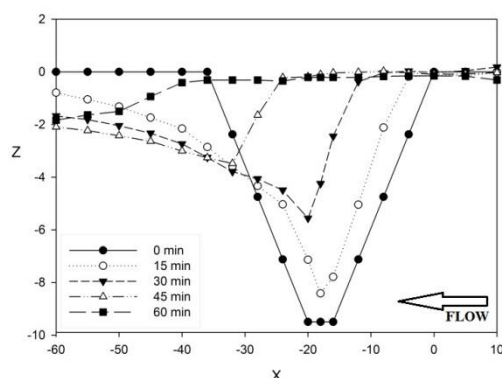
(ج)

شکل ۴-۲۹- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

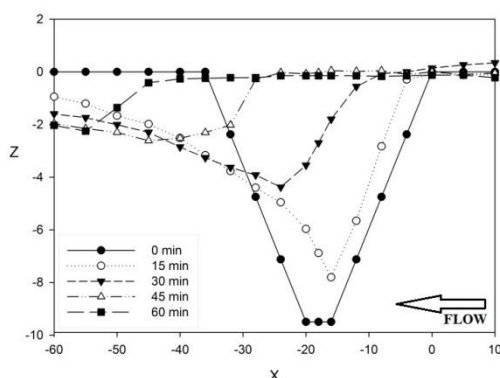
شکل ۴-۳۰- تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود نتایج مشابه حالت $\frac{S}{B} = 50\%$ است و در هر چهار نسبت $\frac{L}{y}$ پس از ۶۰ دقیقه حفره بالادست تغییر شکل یکسان دارد. بنابراین جابجایی حفره پایین دست تاثیری بر حفره بالادست ندارد. در هر چهار نسبت $\frac{L}{y}$ پس از ۶۰ دقیقه حفره بالادست کاملاً پر شده و تغییر شکل یکسان دارد. بنابراین دورتر شدن حفره پایین دست بر پر شدن حفره بالادست بی تاثیر است.



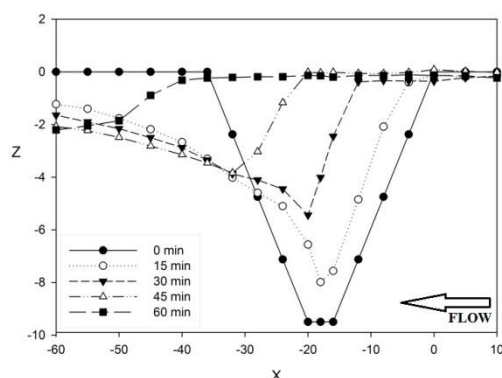
(ب)



(الف)



(د)

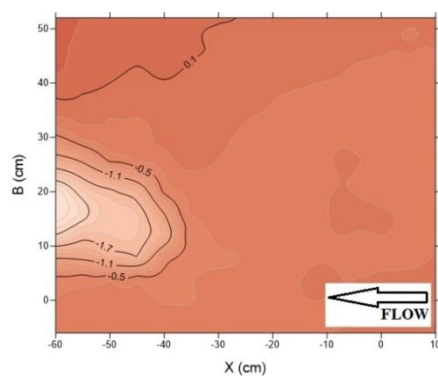


(ج)

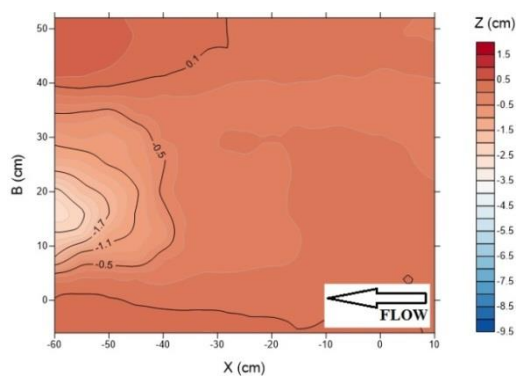
شکل ۴-۳۰- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

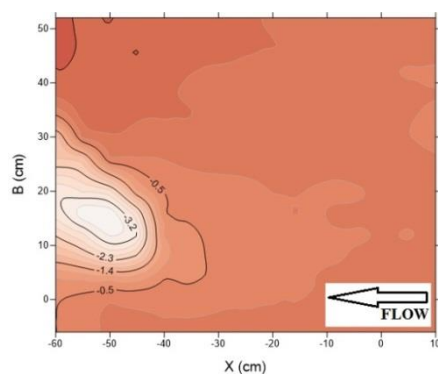
در شکل ۴-۳۱ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و ۱۶، ۱۲، و ۸، $\frac{l}{y}$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود حفره پس از گذشت زمان کاملاً به پایین دست مهاجرت کرده و کل حفره پر شده است. همچنین حفره ها اندکی به سمت مرکز کانال متمایل شده و حالت مورب دارند. این امر به علت اثر دیواره اتفاق می افتد. زیرا نسبت $\frac{l}{b}$ در این حالت کوچکتر است و در نتیجه چون عرض حفره بیشتر شده در نتیجه وقتی حفره در $35\% = \frac{S}{B}$ قرار می گیرد تاثیر دیواره را اندکی حس می کند.



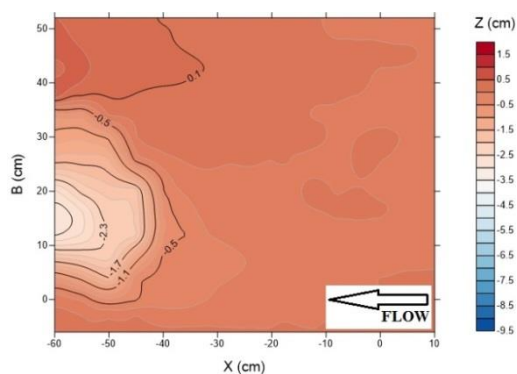
(ب)



(الف)



(د)

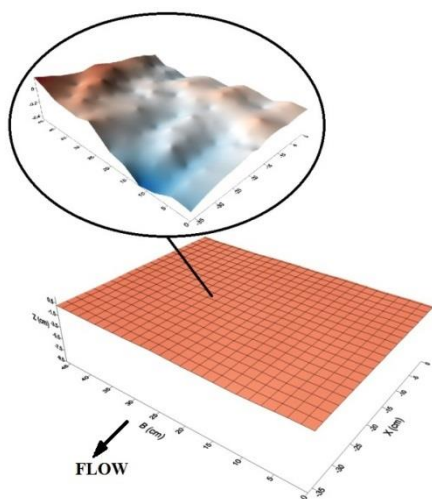


(ج)

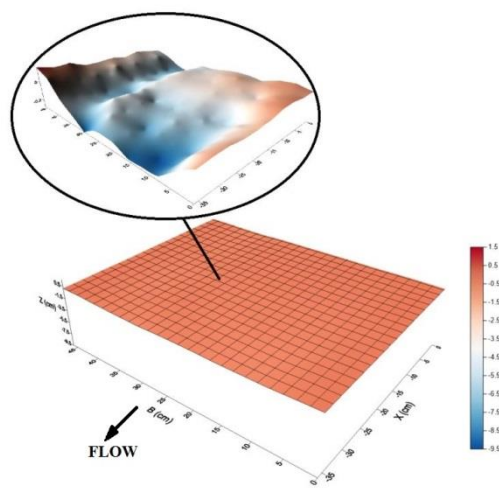
شکل ۴-۳۱- تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

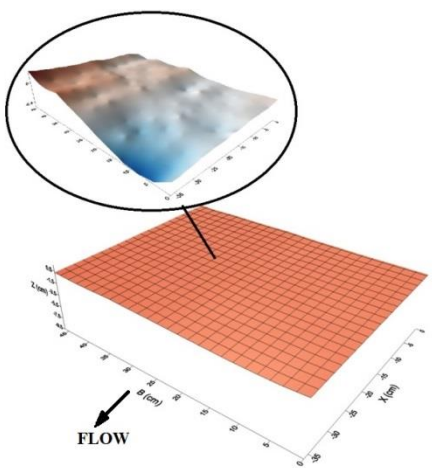
شکل ۴-۳۲- تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $96/64\%$, $95/54\%$, $95/8\%$ و برای حالت تک حفره $95/04\%$ است که نشان دهنده این است که افزایش فاصله بین حفره ها بر پرشدگی حفره بالادست بی تاثیر است و شرایطی مشابه $\frac{S}{B} = 50\%$ اتفاق می افتد.



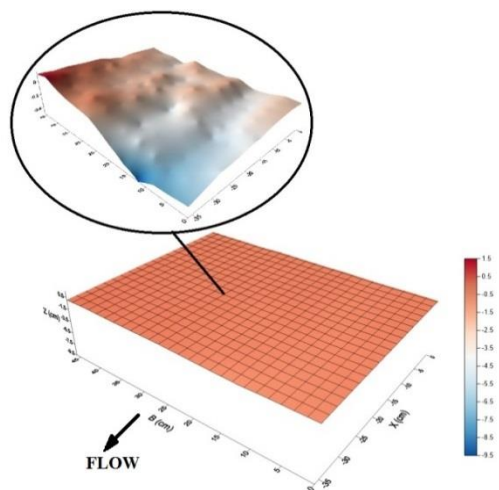
(ب)



(الف)



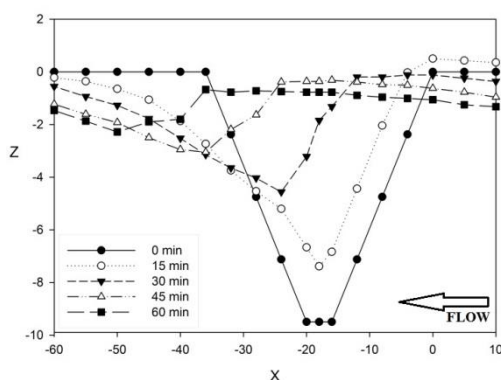
(د)



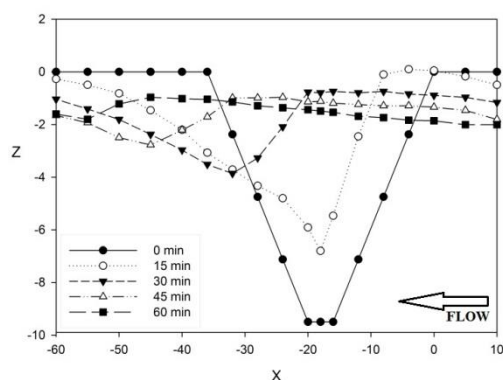
(ج)

شکل ۴-۳۲- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

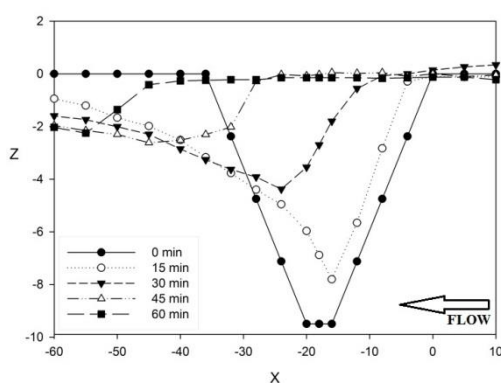
شکل ۴-۳۳- تغییرات پیشروی حفره پایین دست را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود هر چه فاصله حفره ها کمتر شود پیشروی حفره به سمت پایین دست بیشتر می شود اما فرسایش بالادست حفره بیشتر شده و سبب پایین افتادگی سطح حفره شده که موجب کاهش میزان پرشدگی می شود. در واقع شرایطی مشابه حالت $\frac{S}{B} = 50\%$ اتفاق می افتد و عملکرد حفره ها به لحاظ پرشدگی و پیشروی مشابه است.



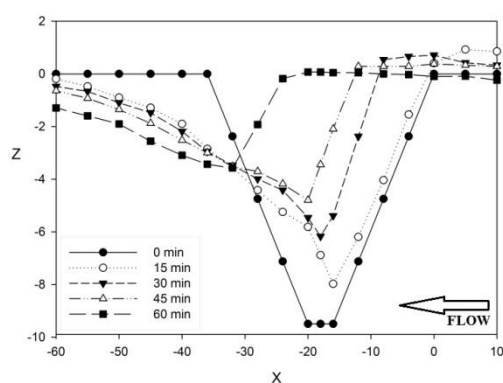
(ب)



(الف)



(د)

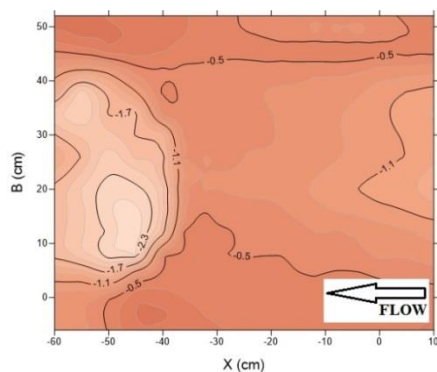


(ج)

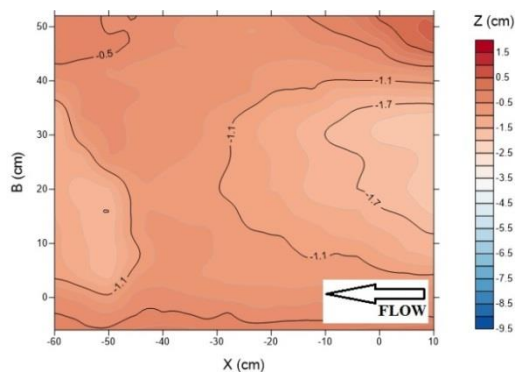
شکل ۴-۳۳- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

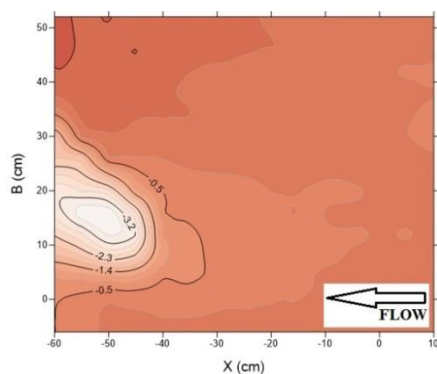
در شکل ۴-۳۴ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و ۱۶، ۱۲، ۸، $\frac{l}{y} = 8$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود حفره در حالت $\frac{l}{y} = 8$ کاملاً پر شده و به سمت پایین دست مهاجرت کرده است. در بالادست حفره کاهش شدید تراز بستر کاملاً مشهود بوده و این امر در $\frac{l}{y} = 12$ نیز مشاهده می شود اما هر چه فاصله حفره ها بیشتر می شود اثر فرسایش بالادست حفره کمتر شده و حتی در $\frac{l}{y} = 16$ رسوب گذاری اتفاق می افتد که در شکل ۴-۳۳- ج مشخص است.



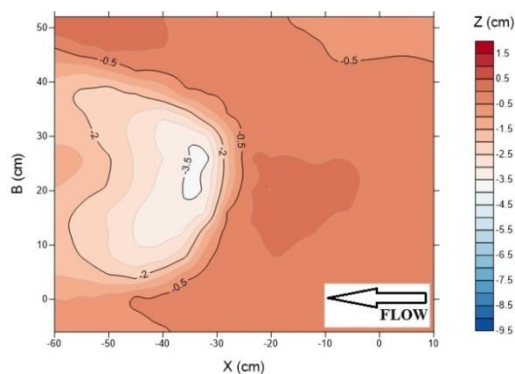
(ب)



(الف)



(د)

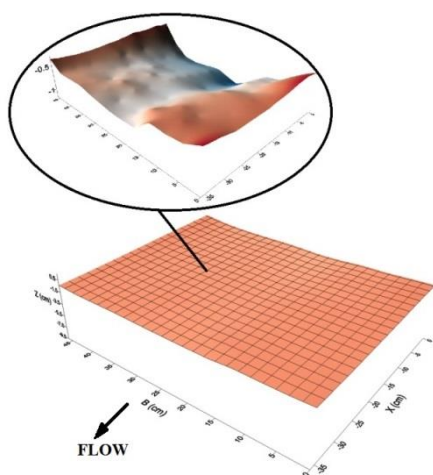


(ج)

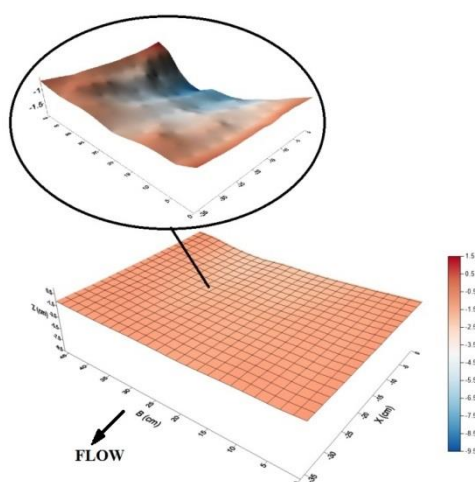
شکل ۴-۳۴ - تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$

الف) $\frac{l}{y} = 8$ ب) $\frac{l}{y} = 12$ ج) $\frac{l}{y} = 16$ د) تک حفره

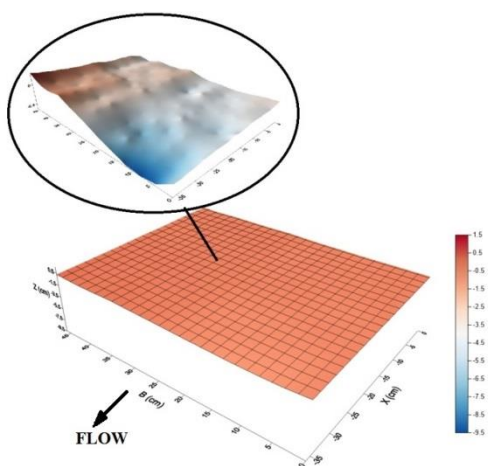
شکل ۴-۳۵ تغییرات سه بعدی حفره پایین دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $71/88\%$, $82/89\%$, $89/86\%$ و برای حالت تک حفره $95/04\%$ است که نشان دهنده این است که افزایش فاصله بین حفره ها باعث افزایش میزان پرشدگی حفره پایین دست می‌شود. از طرفی با مقایسه مقادیر پرشدگی با حالت $\frac{S}{B} = 50\%$ می‌توان دریافت که حفره پایین دست در این دو حالت عملکرد مشابهی به لحاظ پرشدگی دارند.



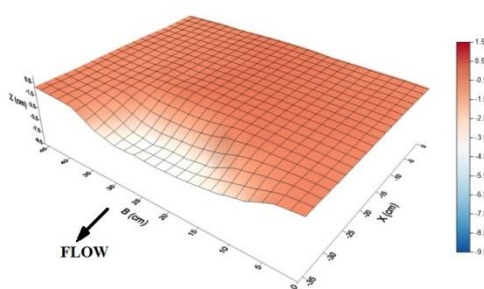
(ب)



(الف)



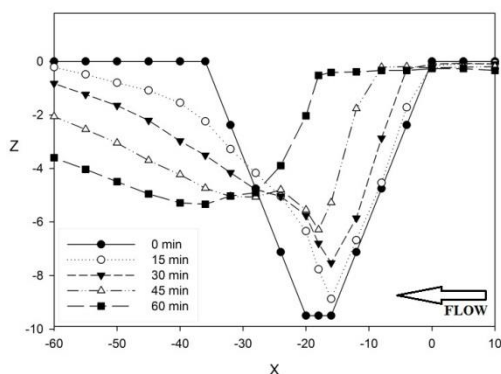
(د)



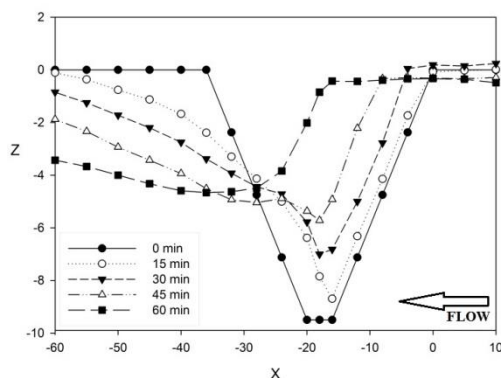
(ج)

شکل ۴-۳۵- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ (الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

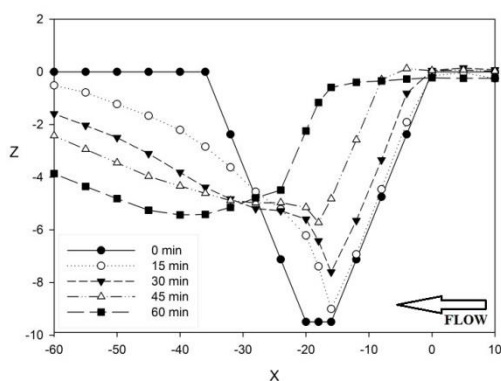
شکل ۴-۳۶- تغییرات پیشروی حفره بالادست برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود میزان پیشروی حفره از حالت های $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ کمتر است همچنین پایین افتادگی بستر در پایین دست در این حالت بیشتر است اما نسبت $\frac{l}{y}$ تاثیری بر نحوه پرشدگی و پیشروی حفره بالادست ندارد.



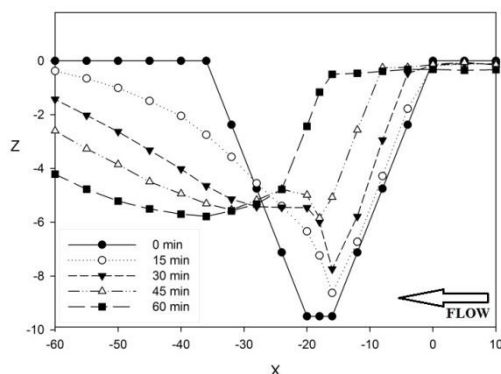
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۳۶- الگوی انتقال رسوب در حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

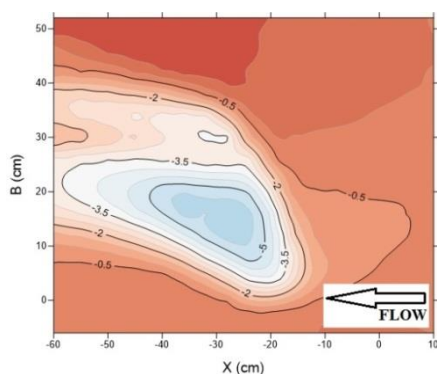
الف) $\frac{l}{y} = 8$ ب) $\frac{l}{y} = 12$ ج) $\frac{l}{y} = 16$ د) تک حفره

در شکل ۴-۳۷ تغییرات دو بعدی حفره بالادست در پلان برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و ۱۶، ۱۲،

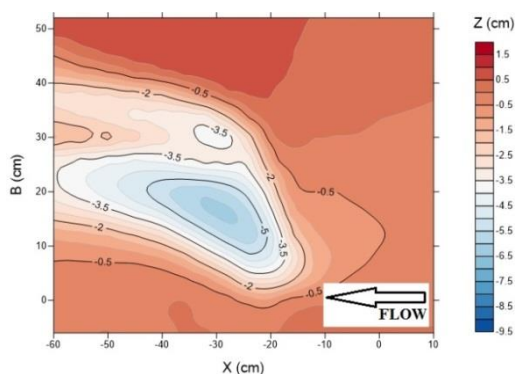
$\frac{l}{y} = 8$ و حالت تک حفره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود نحوه پرشدگی با حالات

$\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ کاملاً متفاوت بوده و حفره بصورت مورب حرکت می کند. در واقع شرایط

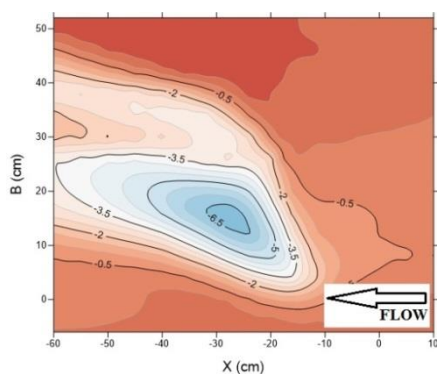
مشابه حالت $\frac{l}{b} = 1.28$ اتفاق می افتد.



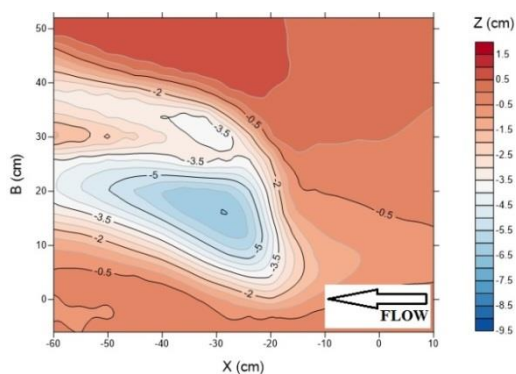
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۳۷ - تغییرات دو بعدی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

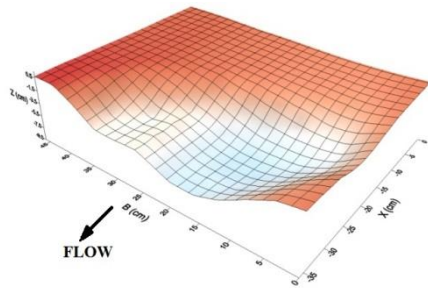
با توجه به شکل ۴-۳۷ مشاهده می شود که تغییرات دوبعدی توپوگرافی حفره و اطراف آن به لحاظ کیفی با افزایش فاصله حفره پایین دست تغییر آنچنانی نمی کند و پر شدن حفره مورب صورت می گیرد. این امر نشان می دهد که جابجایی حفره پایین دست بر شکل پر شدن و فرسایش حفره بالادست تاثیری ندارد.

شکل ۴-۳۸ تغییرات سه بعدی حفره بالادست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و

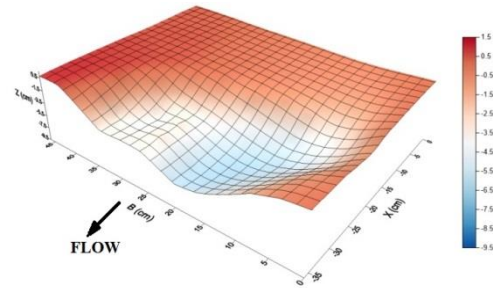
$\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ میانگین

میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $70/45\%$, $68/77\%$,

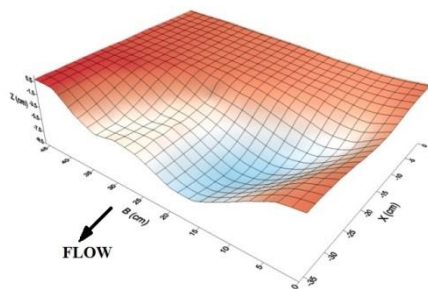
۶۸/۶۵٪ و برای حالت تک حفره ۶۷/۹۷٪ است که نشان دهنده کاهش اندک در تغییر حجم پرشدگی است.



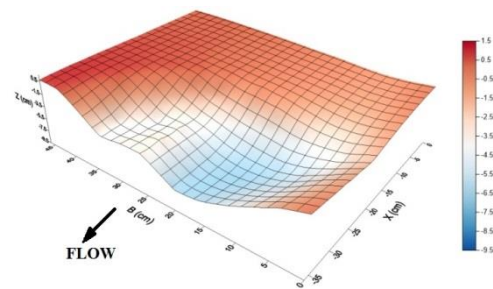
(ب)



(الف)



(د)

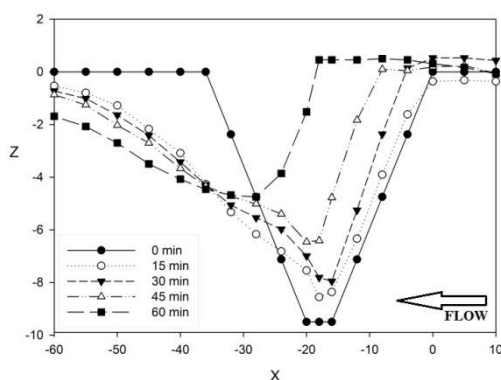


(ج)

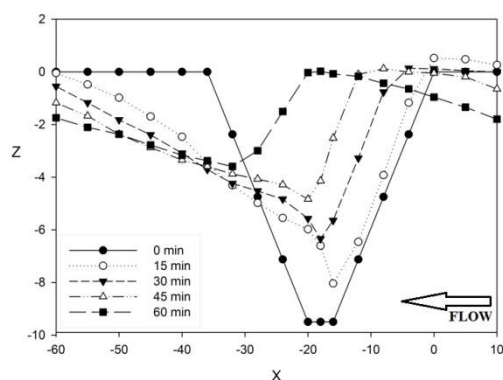
شکل ۴-۳۸- تغییرات سه بعدی حفره بالا دست در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

الف) $\frac{L}{y} = 8$ ب) $\frac{L}{y} = 12$ ج) $\frac{L}{y} = 16$ د) تک حفره

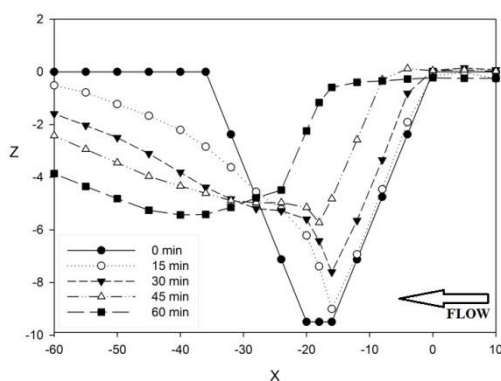
شکل ۴-۳۹- تغییرات پیشروی حفره پایین دست برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و $\frac{L}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود بلحاظ پرشدگی شرایطی کاملاً متفاوت با حالات $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ اتفاق افتاده و برعکس می شود اما بلحاظ پیشروی حفره شرایط مشابه است. در واقع با دورتر شدن حفره پایین دست از میزان رسوب گذاری درون حفره کاسته شده و پیشروی حفره به سمت پایین دست هم کاهش می یابد. اما اگر حفره پایین دست بسیار دور شود (حالت تک حفره) مجدداً حجم پر شده حفره افزایش می یابد.



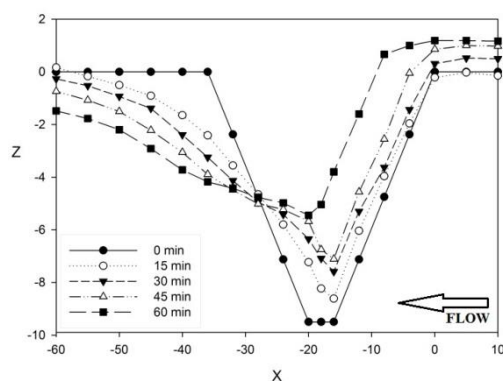
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۳۹- الگوی انتقال رسوب در حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$

(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

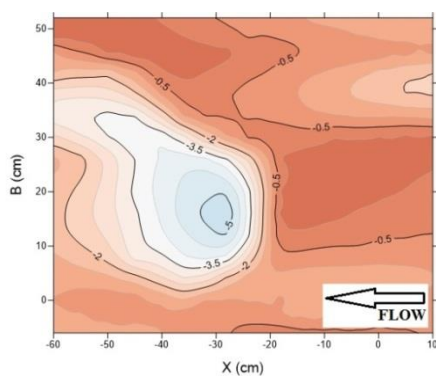
در شکل ۴-۴۰ تغییرات دو بعدی حفره پایین دست در پلان برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$ و ۱۶، ۱۲،

$\frac{l}{y} = 8$ ، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۴۰-الف الی ج نتایج نشان می‌دهد اگر فاصله حفره

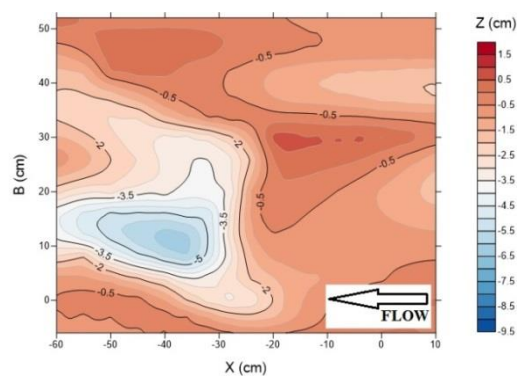
ها از هم کم باشد بالادست حفره‌ی پایین دست فرسایش یافته و به درون حفره می‌ریزد و باعث پایین

افتادگی سطح حفره در بالادست می‌شود. اما هر چه فاصله افزایش یابد میزان فرسایش کمتر شده و

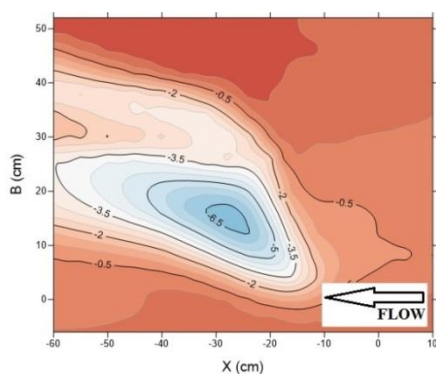
حتی در نسبت $\frac{l}{y} = 16$ رسوب‌گذاری در بالادست حفره اتفاق می‌افتد.



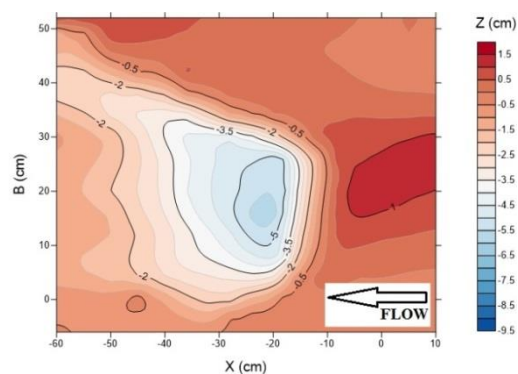
(ب)



(الف)



(د)



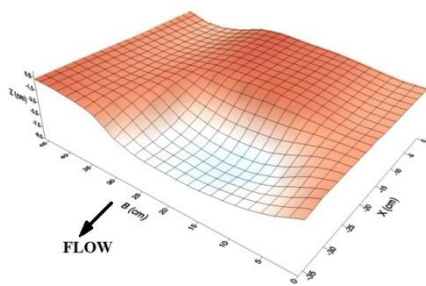
(ج)

شکل ۴-۴- تغییرات دو بعدی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{s}{b} = 20\%$

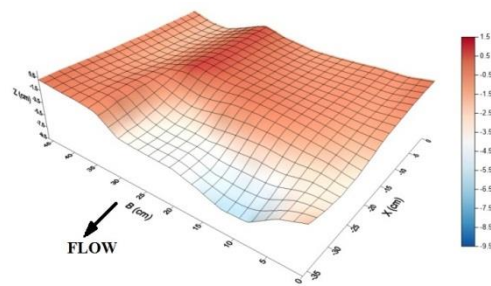
(الف) $\frac{l}{y} = 8$ (ب) $\frac{l}{y} = 12$ (ج) $\frac{l}{y} = 16$ (د) تک حفره

شکل ۴-۴- تغییرات سه بعدی حفره پایین دست و میزان پرشدگی آن را برای $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{s}{b} = 20\%$ و $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ و حالت تک حفره نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در $\frac{l}{y} = 8, 12, 16$ ، میانگین میزان پرشدگی حفره بالادست در دو آزمایش برای هر حالت به ترتیب $76/7\%$ ، $74/29\%$ ، $66/57\%$ و برای حالت تک حفره $67/97\%$ است. با توجه به شکل ۴-۴ می‌توان دریافت که اگر فاصله حفره‌ها بهم نزدیک باشد پرشدگی از سمت مرکز حفره اتفاق می‌افتد و هر چه فاصله افزایش یابد ناحیه پرشدگی به سمت راست حفره متمایل می‌شود. این امر به این علت اتفاق می‌افتد که وقتی

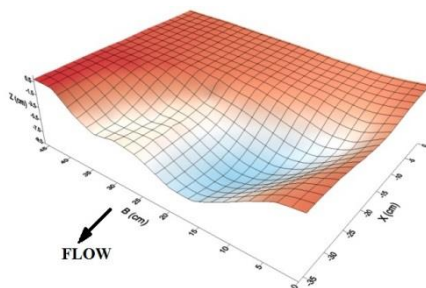
فاصله حفره ها نزدیک است جریان پس از خروج مورب از حفره اول سریعاً وارد حفره دوم شده و باعث می شود که حفره سریعاً از مرکز پر شود اما هر چه فاصله افزایش یابد جریان پس از خروج مورب از حفره بالادست با جریان اصلی مستقیم ترکیب می شود و حفره پایین دست جریان را مجدداً به سمت خود می کشد و سبب می شود حفره از سمت راست بیشتر پر شود.



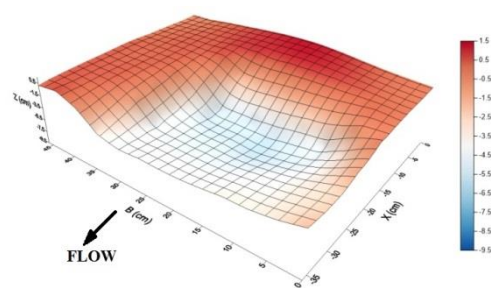
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۴۱- تغییرات سه بعدی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{S}{B} = 20\%$
 الف $\frac{l}{y} = 8$ ب $\frac{l}{y} = 12$ ج $\frac{l}{y} = 16$ د تک حفره

جدول ۳-۴ و ۴-۴ خلاصه ای از میزان میانگین پرشدگی حفره‌ها را در حالت های ذکر شده نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴-میزان پرشدگی حفره بالادست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $\frac{L}{b} = 0.78$

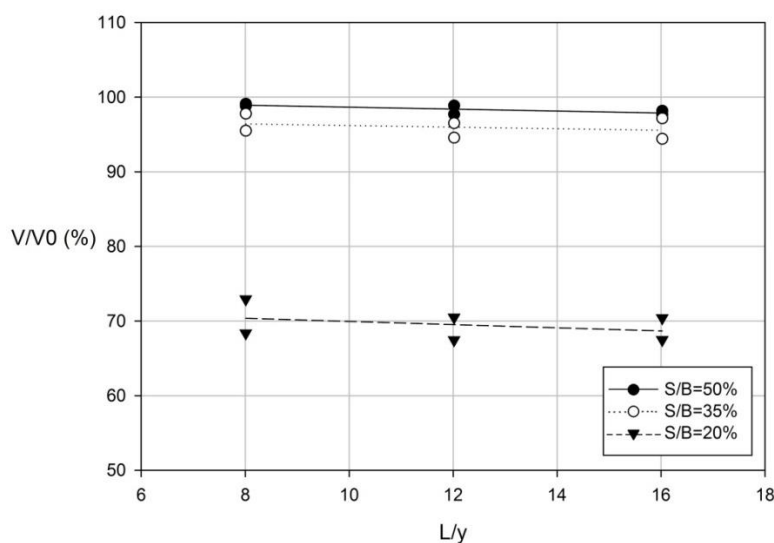
فاصله حفره ها جانمایی از دیواره	$\frac{L}{y} = 8$	$\frac{L}{y} = 12$	$\frac{L}{y} = 16$	تک حفره
$\frac{S}{B} = 20\%$	۷۰/۴۵	۶۸/۷۷	۶۸/۶۵	۶۷/۹۷
$\frac{S}{B} = 35\%$	۹۶/۶۴	۹۵/۵۴	۹۵/۸	۹۵/۰۴
$\frac{S}{B} = 50\%$	۹۸/۹۸	۹۷/۹۲	۹۸/۲۸	۹۷/۸۵

جدول ۴-۴-میزان پرشدگی حفره پایین دست بر حسب درصد در حالات مختلف در نسبت $\frac{L}{b} = 0.78$

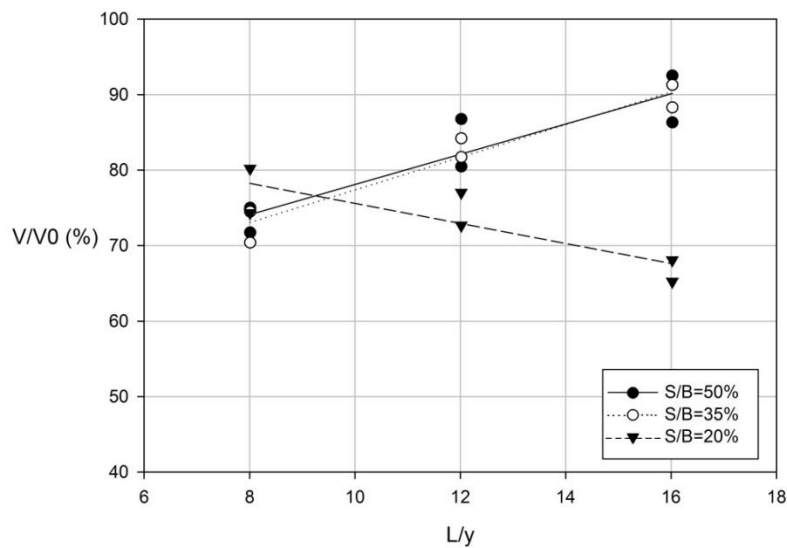
فاصله حفره ها جانمایی از دیواره	$\frac{L}{y} = 8$	$\frac{L}{y} = 12$	$\frac{L}{y} = 16$	تک حفره
$\frac{S}{B} = 20\%$	۷۶/۷	۷۴/۲۹	۶۶/۵۷	۶۷/۹۷
$\frac{S}{B} = 35\%$	۷۱/۸۸	۸۲/۸۹	۸۹/۸۶	۹۵/۰۴
$\frac{S}{B} = 50\%$	۷۲/۷۳	۸۳/۵۹	۸۹/۴۱	۹۷/۸۵

تاثیر فاصله بین حفره‌ها در تغییرات حجم حفره بالادست و پایین دست در قالب بهترین برازش از نقاط در شکل ۴-۴۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۴۲-الف مشاهده می‌شود دور تر شدن حفره پایین دست برای $\frac{S}{B} = 20\%$ ، $\frac{S}{B} = 35\%$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ ، تاثیری در تغییر حجم پرشدگی حفره بالادست ندارد.

نتایج نشان می‌دهد در حالتی که حفره نزدیک به دیواره است حجم پرشدگی حفره نزدیک به ۲۵ درصد نسبت به حالتی که نزدیک محور مرکزی کانال قرار داشته باشد کاهش می‌یابد. از طرفی در نسبت $\frac{l}{b} = 1/28$ نیز ۲۵ درصد از حجم پرشدگی کاسته می‌شود. بنابراین دیواره برای هر دو حالت $\frac{l}{b}$ تاثیر یکسان دارد و سبب کاهش حجم پر شده می‌شود. این امر به دلیل برخورد جریان به دیواره و انحراف آن صورت می‌گیرد و باعث می‌شود حفره فقط از سمت راست خود پر شود. در شکل ۴-۴۲-ب مشاهده می‌شود که در $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی افزایش می‌یابد و از نظر کمی نیز میزان پرشدگی برابر است. علت این امر در این است که حفره پایین‌دست در شرایطی که به حفره بالادست نزدیک است به واسطه فرسایش حفره بالادست سریع‌تر پر می‌شود اما پس از پر شدن چون که فرسایش بالادست همچنان ادامه دارد سبب پایین افتادگی سطح حفره می‌شود که حجم پر شده را کم می‌کند. با دورتر شدن حفره پایین‌دست رسوب کمتری به حفره می‌رسد و در $\frac{L}{y} = 16$ سطح حفره در طی زمان آزمایش به طور کامل پر نمی‌شود و از طرفی رسوب‌گذاری در بالادست و روی سطح سبب افزایش حجم پر شده می‌شود. در $\frac{S}{B} = 20\%$ عکس این قضیه اتفاق می‌افتد و با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پر شده حفره پایین دست کاهش می‌یابد. زیرا حفره پایین‌دست در این حالت به طور کامل پر نمی‌شود و عمل پایین افتادگی سطح حفره اتفاق نمی‌افتد.



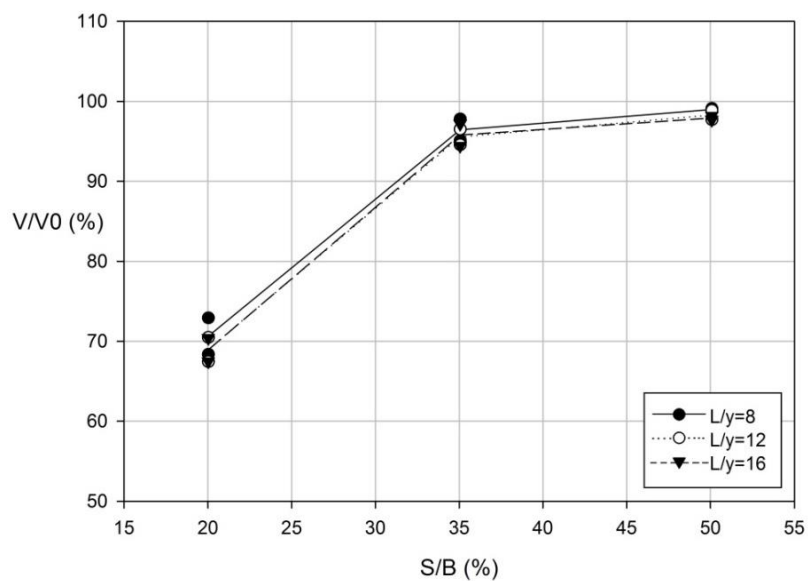
(الف)



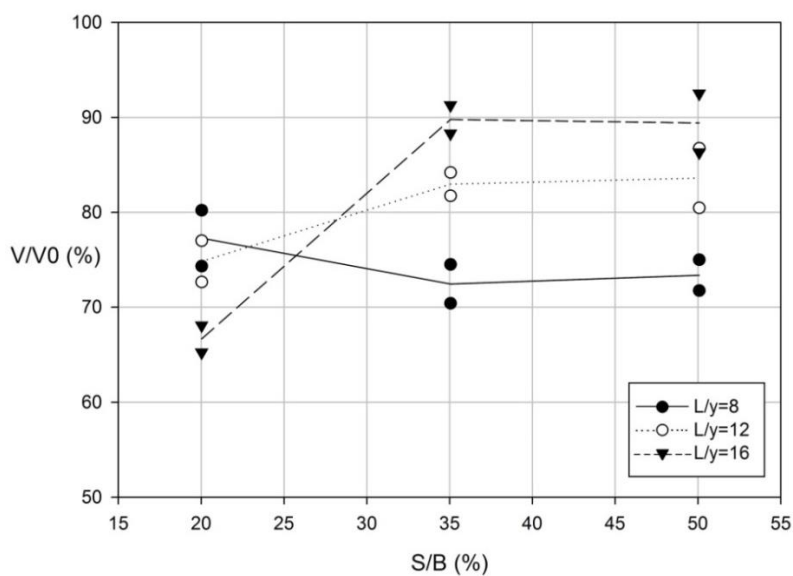
(ب)

شکل ۴-۴۲-تاثیر فاصله بین حفره ها بر پرشدگی آن ها در $\frac{l}{b} = 0.78$ (الف) حفره بالادست (ب) حفره پایین- دست

در شکل ۴-۴۳ اثر فاصله حفره ها از دیواره بر تغییرات حجم حفره ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۴۳-الف با حرکت حفره بالادست از سمت دیواره به مرکز کانال میزان پر شدن آن افزایش می یابد (حدود ۲۵ درصد) اما از $\frac{S}{B} = 0.35$ الی $\frac{S}{B} = 0.50$ میزان شیب پرشدگی ملایم تر می شود و تغییرات پرشدگی ناچیز است. در حالی که از $\frac{S}{B} = 0.20$ الی $\frac{S}{B} = 0.35$ این شیب شدید است. این امر نشان می دهد که دیواره کانال اثر قابل توجهی در کاهش حجم پرشدگی دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۴۳- تاثیر فاصله حفره‌ها از دیواره بر پرشدگی آن‌ها در $\frac{l}{b} = 0.78$

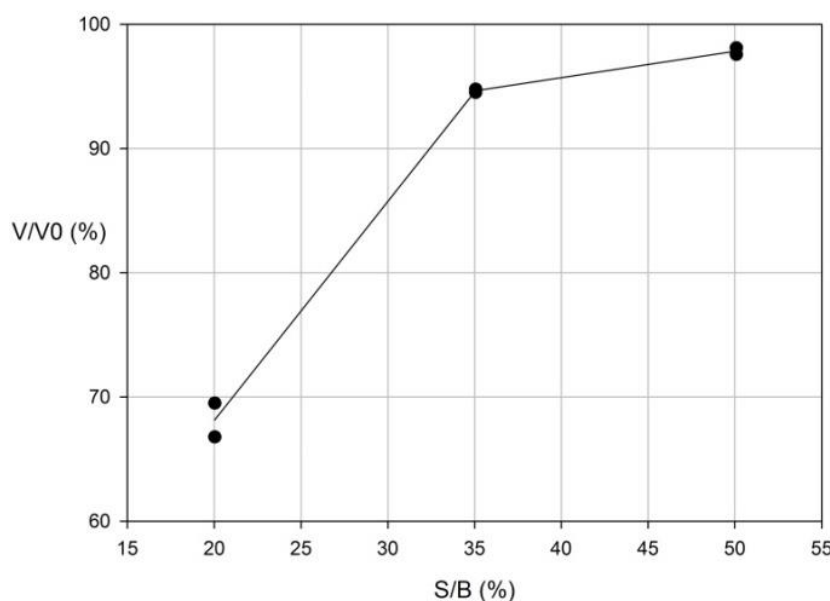
الف) حفره بالادست ب) حفره پایین‌دست

شکل ۴-۴۳- ب) اثر فاصله حفره پایین‌دست از دیواره را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان

دریافت روند تغییرات حجم پرشدگی از $\frac{S}{B} = 0.20$ الی $\frac{S}{B} = 0.35$ با افزایش فاصله بین حفره‌ها تغییر

می‌کند.

بدین صورت که با افزایش فاصله بین حفره بالادست تا پایین دست در محدوده $۸ \leq \frac{L}{y} \leq ۱۲$ دیواره تأثیری مطلوب بر پرشدگی حفره می‌گذارد که بر اساس شکل ۴-۴۲-ب این مقدار تقریباً برابر $\frac{L}{y} = ۹$ است (محل تقاطع نمودار $\frac{S}{B} = ۲۰\%$ با دو حالت دیگر) اما از $\frac{L}{y} = ۹$ به بعد دیواره اثر منفی گذاشته و حجم پر شده کاهش می‌یابد. در $\frac{S}{B} = ۳۵\%$ الی $\frac{S}{B} = ۵۰\%$ در تغییر حجم پر شده بی تأثیر بوده و این امر مستقل از فاصله بین حفره بالادست از پایین دست است. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله بین حفره‌ها تأثیری بر پرشدگی حفره بالادست ندارد اما بر حفره پایین دست بسیار تأثیرگذار است. تأثیر جانمایی حفره نسبت به دیواره در تغییرات حجم تک حفره در قالب بهترین برازش از نقاط در شکل ۴-۴۴ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله حفره از دیواره بر میزان پرشدگی افزوده می‌شود اما از نسبت $\frac{S}{B} = ۳۵\%$ الی $\frac{S}{B} = ۵۰\%$ نرخ تغییرات پرشدگی کاهش می‌یابد زیرا وجود دیواره در یک وجه حفره، سبب می‌شود که حفره از آن سمت عملکرد مناسبی در پرشدگی نشان ندهد.



شکل ۴-۴۴-تأثیر فاصله تک حفره از دیواره در $\frac{L}{b} = ۰/۷۸$ بر مقدار پرشدگی

به منظور دستیابی به حالت بهینه برای هر دو حفره بالادست و پایین‌دست که حجم پرشدگی بهتری داشته باشد بهینه‌ترین حالت زمانی است که حفره‌ها در $\frac{S}{B} = 50\%$ قرار بگیرند و حفره پایین‌دست در $\frac{L}{y} \geq 16$ حفر شود زیرا با توجه به شکل ۴-۴۴ و جدول ۴-۴ در $\frac{S}{B} = 50\%$ و در حالتی که حفره پایین‌دست به اندازه کافی دور است حجم پرشدگی افزایش می‌یابد اما تعیین مقدار دقیق $\frac{L}{y}$ با توجه به داده‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبوده و توسط مدل عددی بررسی می‌شود.

۴-۴- صحت سنجی مدل عددی

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها مشخص شد که هر چه حفره‌ها به سمت مرکز کانال حفر شوند نتایج بهتری به لحاظ حجم پرشدگی و سرعت مهاجرت حفره‌ها ایجاد خواهد شد. بنابراین تمرکز مدل عددی برپایه آزمایش‌هایی است که حفره‌ها در مرکز کانال حفر شده‌اند. به منظور مدل‌سازی عددی ابتدا باید توزیع سرعت در کانال بدست آمده و سپس مدل‌سازی انتقال رسوب بر پایه توزیع سرعت انجام شود. از طرفی به منظور اطمینان از عملکرد و محاسبات دقیق‌تر مدل، باید نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شوند. بنابراین نیاز بود که آزمایشی تحت عنوان برداشت سرعت اطراف حفره‌ها در آزمایشگاه انجام شود که در ادامه بحث خواهد شد.

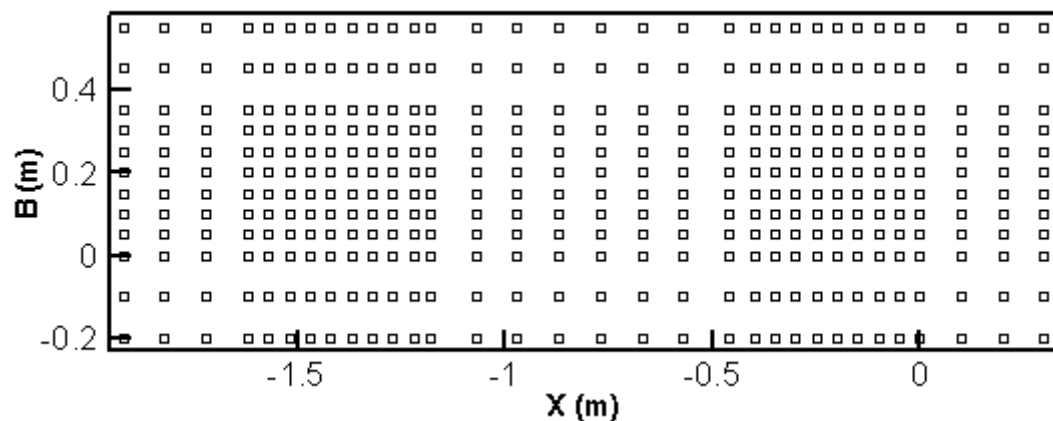
۴-۴-۱- آزمایش تعیین توزیع سرعت

به منظور برداشت توزیع سرعت در کانال و اطراف حفره‌ها، آزمایش با شرایط $\frac{L}{b} = 1/28$ ، 50% ، $\frac{S}{B} = 12$ و $\frac{L}{y} = 12$ انتخاب شد. شرایط هیدرولیکی مشابه آزمایش‌های انتقال رسوب بود با این تفاوت که عمق جریان ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. زیرا در عمق ۶ سانتی‌متر، مصالح در حال حرکت بوده و حفره در حال تغییر شکل است. از طرفی به علت دو بعدی بودن مدل و ارائه سرعت متوسط عمقی توسط آن، برداشت سرعت در تراز ۶/۶ سانتی متری از سطح آب (تراز سرعت متوسط) انجام شد. به منظور برداشت سرعت، از دستگاه سرعت سنج دو بعدی Electro Magnetic استفاده شد (شکل ۴-۴).

(۴۵) و پس از شبکه بندی در بالادست، پایین دست و اطراف حفره ها مقادیر سرعت طولی و عرضی جریان برداشت شد. شکل ۴-۴۶ شبکه بندی میدان برداشت سرعت را نشان می دهد.



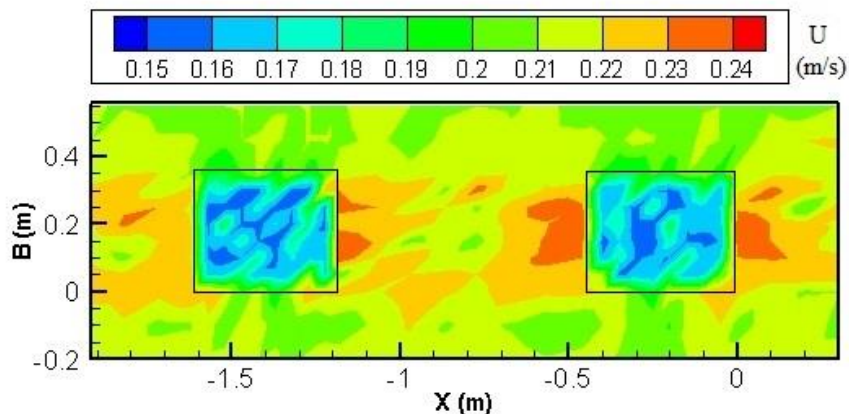
شکل ۴-۴۵- دستگاه سرعت سنج Electro Magnetic



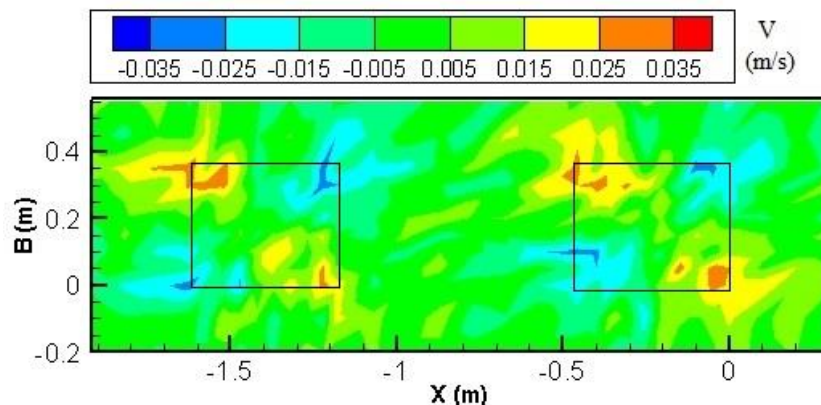
شکل ۴-۴۶- شبکه بندی حفره ها و اطراف آنها به منظور برداشت سرعت

داخل حفره ها از شبکه بندی ریزتر و اطراف آن از شبکه بندی درشت تر استفاده شد و در مجموع ۳۸۴ نقطه برداشت شد. نتایج برداشت سرعت به صورت توزیع سرعت طولی و عرضی در شکل ۴-۴۷ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود در لبه های بالادست و پایین دست حفره ها میزان مولفه طولی سرعت به دلیل کاهش موضعی عمق جریان، افزایش می یابد و در داخل حفره ها به دلیل

افزایش عمق از سرعت طولی کاسته می شود. همچنین نتایج توزیع سرعت عرضی نشان می دهد که لبه بالادست حفره ها انحراف جریان به سمت حفره وجود دارد در حالی در مرز پایین دست حفره ها انحراف جریان به سمت بیرون حفره متمایل است. با توجه به شکل ۴-۴۷ می توان دریافت که جریان از گوشه ها بالایی حفره وارد شده و از گوشه های پایینی خارج می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۴۷- نتایج توزیع سرعت جریان اندازه گیری شده در آزمایشگاه الف) مولفه طولی ب) مولفه عرضی

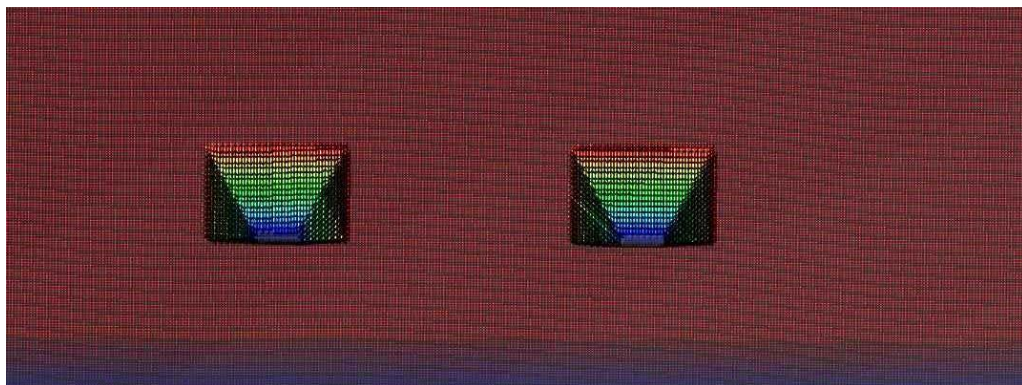
۴-۴-۲- مدل سازی توزیع سرعت توسط نرم افزار CCHE2D

برای مدل سازی توزیع سرعت با نرم افزار CCHE2D ابتدا نقاط مشخص کننده ی هندسه مدل توسط یک فایل با پسوند MESH-XYZ به نرم افزار معرفی شد. قبل از انجام محاسبات باید مدل در نرم افزار

پیش پردازنده ی CCHE -MESH ، شبکه بندی و رقوم دار شود. بنابراین توپوگرافی اولیه بستر و حفره ها به پیش پردازنده ی CCHE -MESH داده شد و پس از رقومی کردن محدوده، شبکه بندی انجام شد. بدین منظور سه شبکه M-0.5-0.5، M-1-1 و M-2-2 مطابق جدول ۴-۵ انتخاب شد تا تاثیر ابعاد شبکه بر نتایج توزیع سرعت مشخص شود. شکل ۴-۴۸ مدل رقومی و شبکه بندی شده حفره ها را در نرم افزار نشان می دهد.

جدول ۴-۵- مشخصات شبکه بندی

نام شبکه بندی	طول سلول (سانتی متر)	عرض سلول (سانتی متر)
M-0.5-0.5	۰/۵	۰/۵
M-1-1	۱	۱
M-2-2	۲	۲

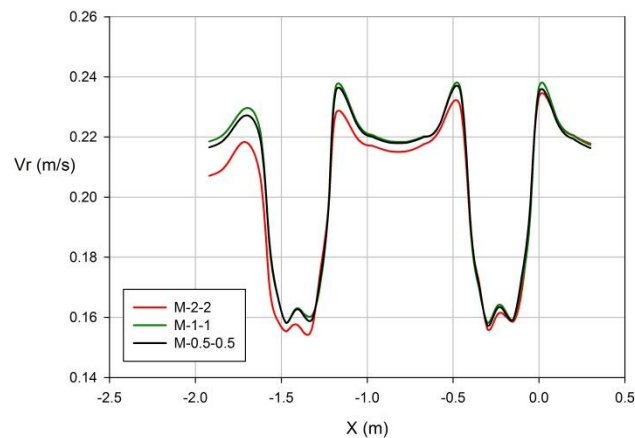


شکل ۴-۴۸- مدل رقومی و شبکه بندی شده حفره ها

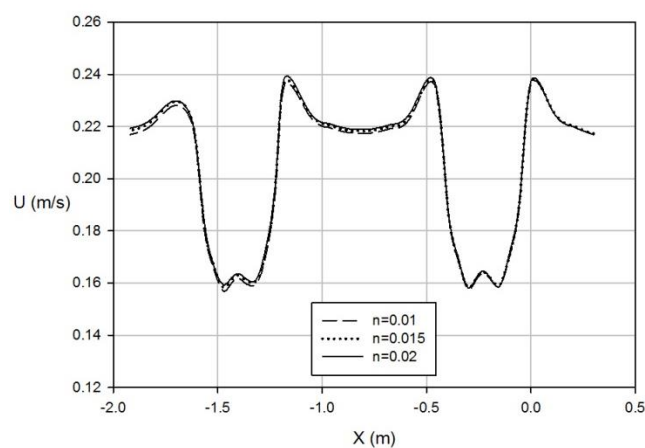
سپس فایل توپوگرافی و شبکه بندی شده برای تعیین شرایط اولیه و مرزی به نرم افزار CCHE-GUI ، معرفی شد. شرایط اولیه و مرزی مطابق مدل آزمایشگاهی به مدل داده شد. ضریب زبری (n) بر اساس رابطه استریکلر به صورت زیر محاسبه شد: [۲۰]

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (۴-۱)$$

که در آن d_{50} متوسط قطر مصالح بستر بر حسب متر است. با توجه به d_{50} مصالح بستر که برابر ۱ میلیمتر است، ضریب زبری به مقدار 0.15 به مدل معرفی شد. در مرز بالادست کانال (مرز ورودی) پارامتر دبی به میزان $34/4$ لیتر بر ثانیه به عنوان شرط مرزی بالادست به مدل ارائه شده و در مرز پایین دست (مرز خروجی) عمق آب به میزان 11 سانتی متر به عنوان شرط مرزی پایین دست در مدل وارد گردید. از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده و زمان شبیه سازی جریان با توجه به در نظر گرفتن زمان‌های مختلف و ارزیابی نتایج همگرایی، 200 ثانیه انتخاب شد و پس از شبیه‌سازی، نتایج برآیند سرعت برای 3 نوع شبکه‌بندی در راستای طول کانال و در محور مرکزی حفره‌ها از مدل استخراج شد. شکل ۴-۴۹-الف نتایج برآیند سرعت در راستای محور مرکزی حفره‌ها را برای سه نوع شبکه بندی نشان می‌دهد. همانگونه ملاحظه می شود شبکه $M-0.5-0.5$ و $M-1-1$ به لحاظ نتایج شبیه هم بوده و این نشان می‌دهد که ریزتر کردن شبکه از مقدار 1 سانتی‌متر، تاثیری بر نتایج ندارد. از طرفی ریزتر کردن شبکه زمان انجام محاسبات توسط نرم افزار را افزایش می‌دهد بنابراین مش نوع دوم ($M-1-1$) برای مدلسازی جریان و انتقال رسوب انتخاب گردید. پس از این مرحله مدل در ضریب زبری کالیبره شد. بدین صورت که مقادیر زبری بیشتر و کمتر از ضریب استریکلر به مدل ارائه شد و نتایج سرعت طولی جریان در راستای خط مرکزی حفره ها استخراج شد. (شکل ۴-۴۹-ب) نتایج نشان داد که افزایش یا کاهش ضریب زبری در نتایج تاثیری ندارد بنابراین ضریب زبری استریکلر جهت ادامه مدلسازی انتخاب گردید.



(الف)

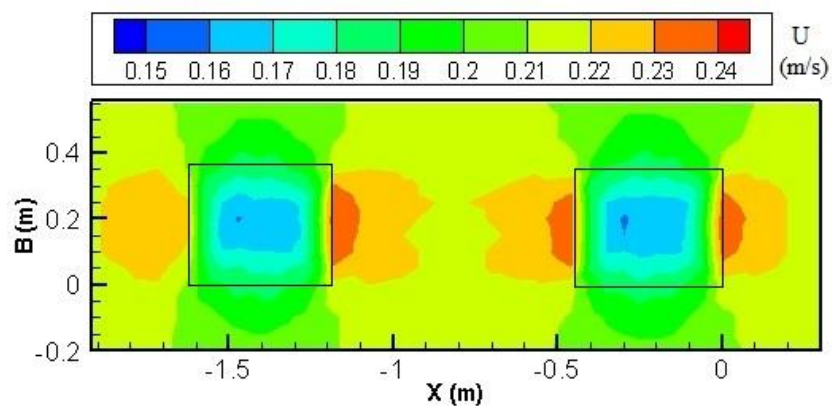


(ب)

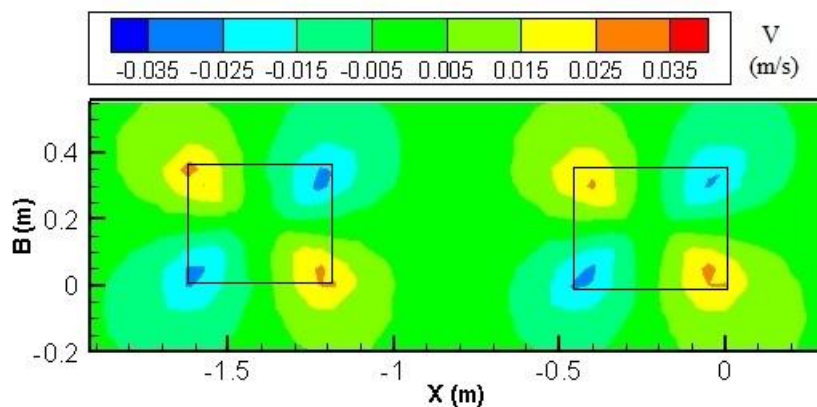
شکل ۴-۴۹- الف) نتایج برآیند سرعت در راستای محور مرکزی حفره ها برای سه نوع شبکه بندی ب)

تاثیر زبری بر نتایج سرعت طولی جریان در راستای خط مرکزی حفره ها

شکل ۴-۵۰ توزیع سرعت طولی و عرضی محاسبه شده توسط مدل را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود در لبه های بالادست و پایین دست حفره ها افزایش سرعت طولی به صورت موضعی اتفاق افتاده و در داخل حفره به واسطه افزایش عمق جریان، کاهش سرعت مشاهده می شود. همچنین در گوشه های حفره ها انحراف جریان مشخص بوده و این امر نتایج آزمایشگاهی را تایید می کند.



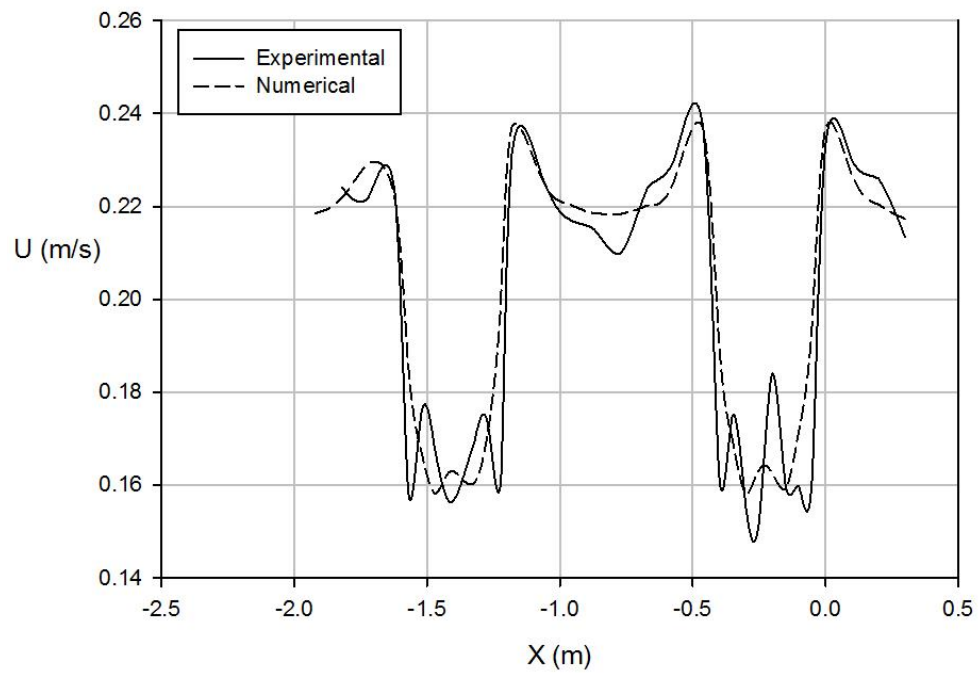
(الف)



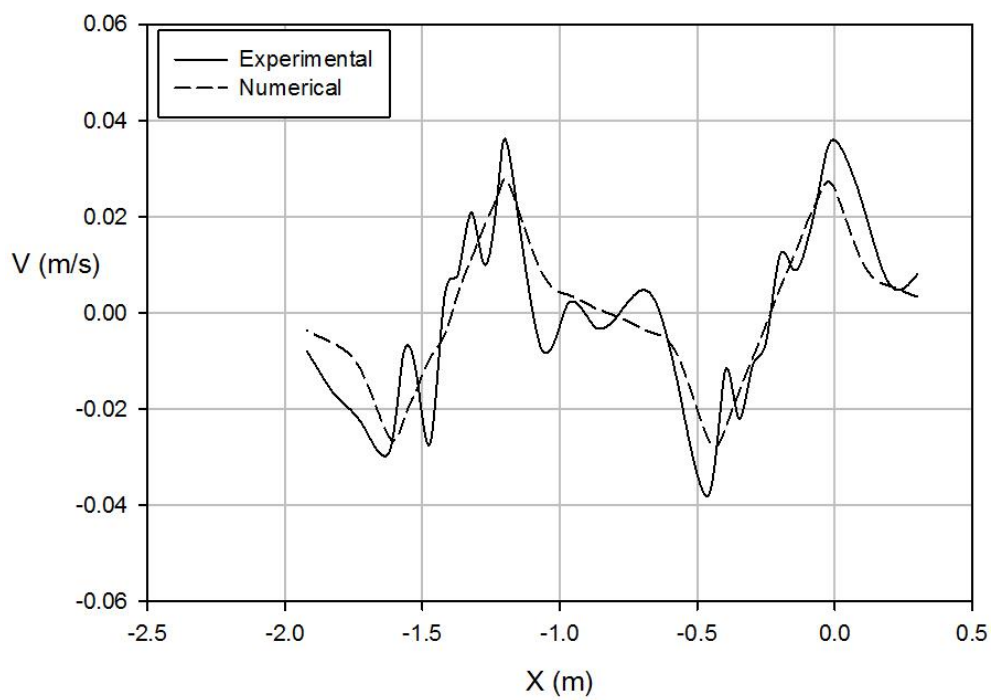
(ب)

شکل ۴-۵۰- نتایج توزیع سرعت جریان محاسبه شده در مدل عددی الف) مولفه طولی ب) مولفه عرضی

شکل ۴-۵۱- نشان دهنده مقایسه تغییرات سرعت طولی و عرضی بصورت کمی است. سرعت طولی در راستای طول کانال و محور مرکزی حفره‌ها و سرعت عرضی در راستای طول کانال و در لبه سمت چپ حفره‌ها مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج مدل عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تطابق دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵۱- مقایسه کمی تغییرات سرعت محاسبه شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

الف) مولفه طولی ب) مولفه عرضی

برای بدست آوردن خطا و ارزیابی مدل عددی CCHE2D از متوسط درصد خطای مطلق استفاده شده

است. شاخص درصد خطای مطلق این گونه تعریف می شود: [۱۹]

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\phi_i - \phi'_i}{\phi_i} \right| \times 100 \quad (۲-۴)$$

در این رابطه N تعداد داده ها، ϕ_i مقدار کمیت بدست آمده از اندازه گیری آزمایشگاهی و ϕ'_i نیز مقدار کمیت محاسبه شده توسط مدل عددی است. با توجه به نتایج بدست آمده مقادیر برآیند سرعت در کل محدوده ی اندازه گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده در مدل (۳۸۴ نقطه)، میزان خطا معادل ۸/۷۱ درصد بدست آمد.

۴-۳-۴-۳ مدل سازی انتقال رسوب توسط نرم افزار CCHE2D

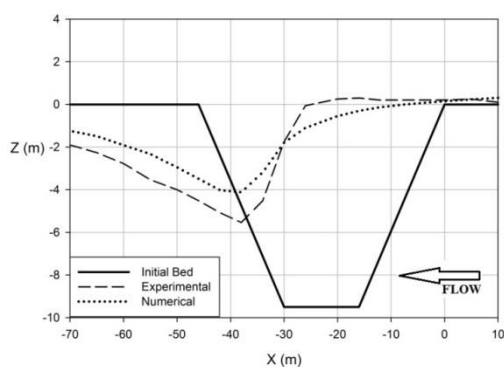
بعد از صحت سنجی جریان، به بررسی میزان پرشدگی حفره ها برای صحت سنجی قسمت رسوب می پردازیم. گام اول برای شبیه سازی انتقال رسوب، وارد کردن مشخصات رسوب است که از مهمترین آنها دانه بندی بستر است. دانه بندی با توجه به منحنی دانه بندی و به صورت کلاس بندی شده با توجه به میزان درصد عبوری از الک ها در مدل وارد شد. سپس مشخصات دیگر از قبیل وزن مخصوص و ضریب زبری، ضخامت لایه بستر، میزان تزریق بار بستر و معادله انتقال بار بستر به مدل ارائه شد. معادله انتقال بار بستر در این تحقیق معادله (2000) wu et al می باشد [۳۸]:

$$\phi_{SK} = 0.0000262 \left[\left(\frac{\tau}{\tau_{CK}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{SK}} \right]^{1.74} \quad (۳-۴)$$

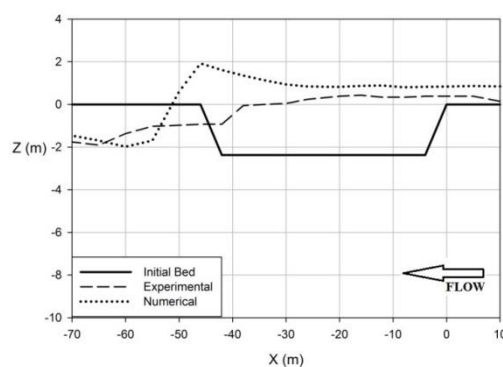
که در آن $\phi_{SK} = \frac{q_{s*k}}{\left[p_{bk} \sqrt{(\gamma/\gamma - 1)} g d_k^3 \right]}$ و q_{s*k} میزان انتقال رسوب بستر برحسب متر

مربع بر ثانیه است. زمان شبیه سازی ورودی مدل ۳۶۰۰ ثانیه بوده و اجرای مدل در حدود ۵ ساعت به طول می انجامید. همچنین از کامپیوتر با پردازنده پنج هسته ای با فرکانس کاری ۳/۱ گیگاهرتز استفاده شد. پس از اجرای مدل، تراز بستر در دو مقطع طولی استخراج شده و سپس توپوگرافی حفره ها نیز برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از مدل استخراج شد. ابتدا نمونه ای از نتایج صحت-سنجی حفره بالادست و پایین دست در شرایط برداشت در راستای طول کانال ($\frac{l}{b} = 1/28$) ارائه

شده و سپس نمونه ای از نتایج صحت‌سنجی حفره های برداشت در راستای عرض ($\frac{l}{b} = 0.78$) نمایش داده شده است. نتایج مقایسه تغییرات بستر حفره بالادست در شرایط برداشت در راستای طول کانال در شکل ۴-۵۲ ارائه شده است. همچنین مقایسه تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴-۵۳ ارائه شده است.



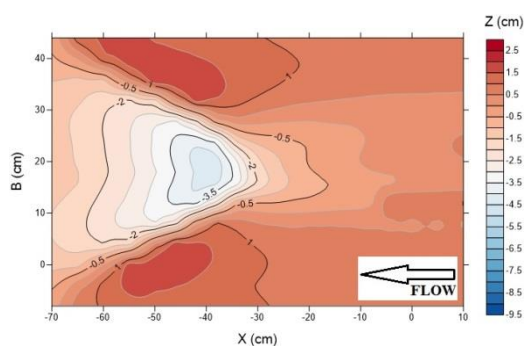
(ب)



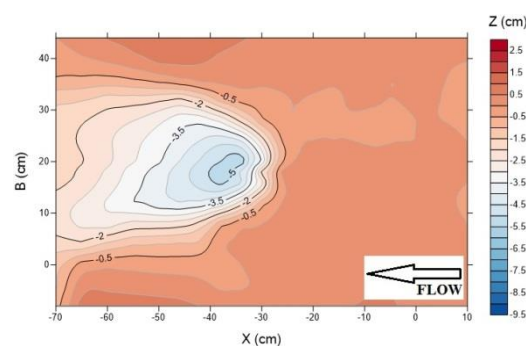
(الف)

شکل ۴-۵۲- تغییرات بستر حفره بالادست در راستای طول با $\frac{l}{b} = 1/28$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{l}{y} = 16$

الف (B=4 cm) خط مرکزی (B=18cm)



(ب)

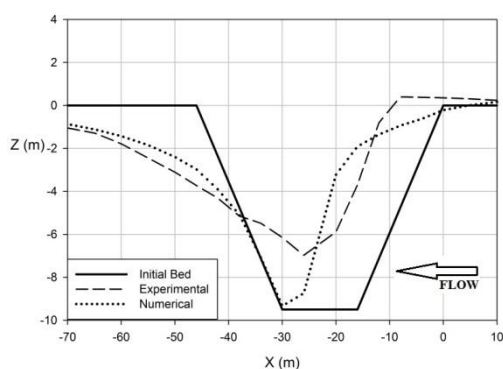


(الف)

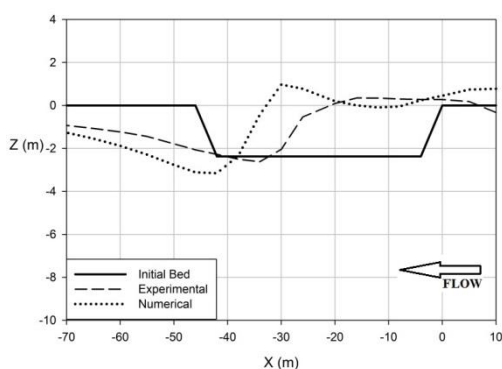
شکل ۴-۵۳- تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{l}{y} = 16$

الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل عددی

نتایج مقایسه تغییرات بستر حفره پایین‌دست در شرایط برداشت در راستای طول کانال در شکل ۴-۵۴ ارائه شده است. همچنین مقایسه تغییرات توپوگرافی حفره پایین‌دست و اطراف آن در مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴-۵۵ ارائه شده است.

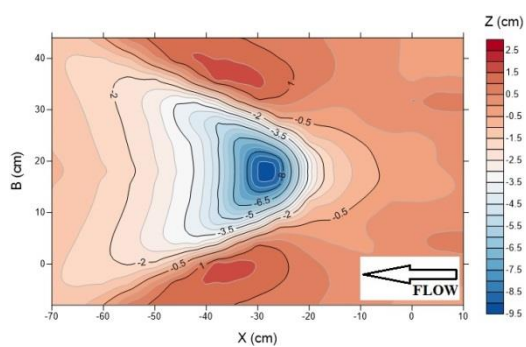


(ب)

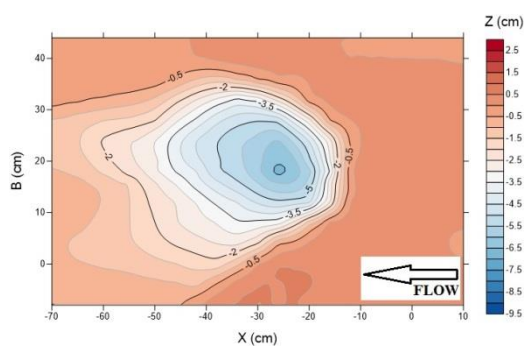


(الف)

شکل ۴-۵۴- تغییرات بستر حفره پایین دست در راستای طول با $\frac{l}{b} = 1/28$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{l}{y} = 16$



(ب)



(الف)

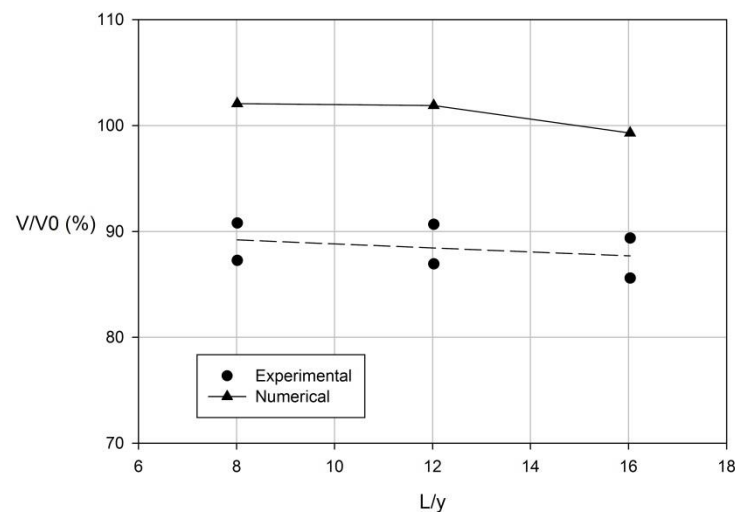
الف (B=4 cm) ب خط مرکزی (B=18cm) (جهت جریان از راست به چپ)

شکل ۴-۵۵- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{l}{y} = 16$

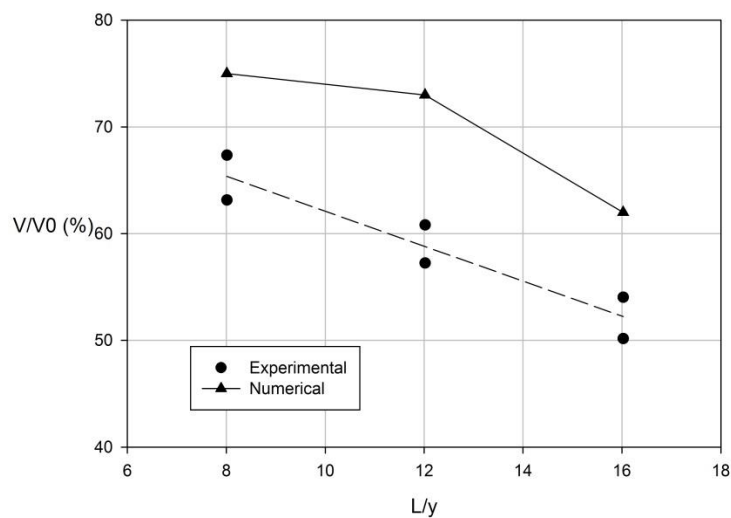
الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل عددی

همانگونه که در شکل ۴-۵۴-ب مشاهده می شود، به لحاظ پروفیل طولی بستر در خط مرکزی حفره، کف حفره در مدل آزمایشگاهی مقادیر پرشدگی بیشتری را نسبت به مدل عددی دارد. زیرا در مدل آزمایشگاهی، مقداری از مصالح قرار گرفته در شیب پایین دست حفره، در هنگام خروج جریان به دلیل عدم ناپایداری در لحظات اولیه به درون حفره ریزش می کند و این امر سبب می شود که تراز کف

حفره در مدل آزمایشگاهی بالاتر از مدل عددی قرار بگیرد. مقایسه توپوگرافی حفره ها نشان می دهد که در مدل عددی انباشت رسوب در دو جناح حفره بیشتر بوده و این باعث می شود شکل پرشدگی کشیده تر شود. مقایسه حجم پرشدگی حفره ها حاکی از آن است که مدل عددی پرشدگی بیشتری را نشان می دهد. اگرچه ریزش مصالح از شیب پایین دست در مدل آزمایشگاهی باعث می شود که حجم پر شده بیشتر به نظر برسد اما انباشت مصالح در جناحین حفره ها در مدل عددی بر آن غالب بوده و سبب بیشتر شدن حجم پر شده در مدل عددی می شود. شکل ۴-۵۶ نشان دهنده مقایسه میزان پرشدگی حفره های بالادست و پایین دست در مدل آزمایشگاهی و عددی است.



(الف)

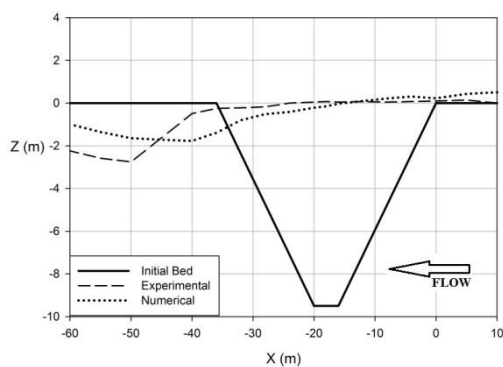


(ب)

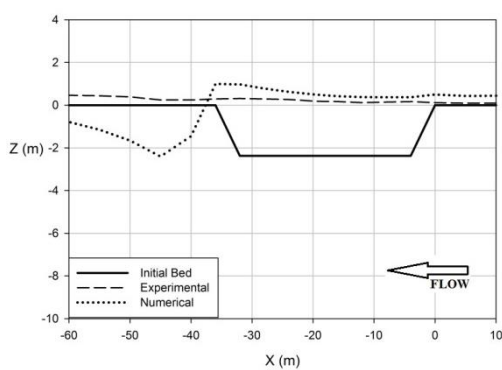
شکل ۴-۵۶- میزان پرشدگی حفره ها در مدل آزمایشگاهی و عددی برای $\frac{l}{b} = 1/28$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$

الف (حفره بالادست ب) حفره پایین دست

نتایج مقایسه تغییرات بستر حفره بالادست در شرایط برداشت در راستای عرض کانال در شکل ۴-۵۷ ارائه شده است. همچنین مقایسه تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴-۵۸ ارائه شده است.



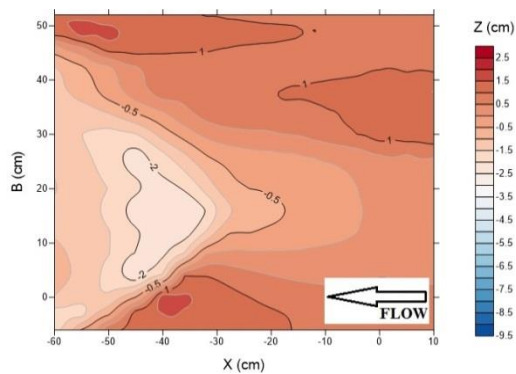
(ب)



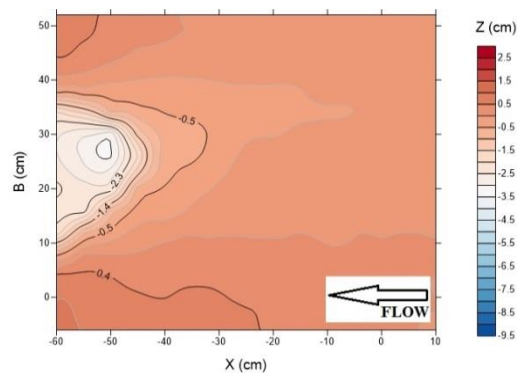
(الف)

شکل ۴-۵۷- تغییرات بستر حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 0/78$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{L}{y} = 8$

الف (B=4 cm) خط مرکزی (B=18cm)



(ب)

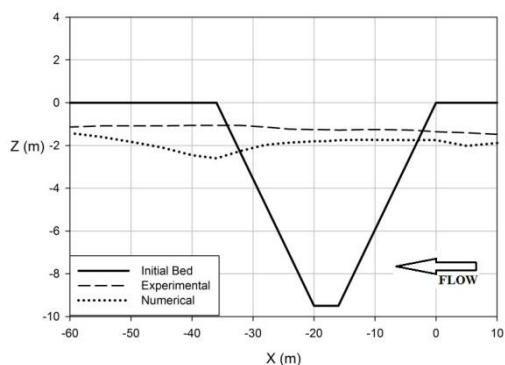


(الف)

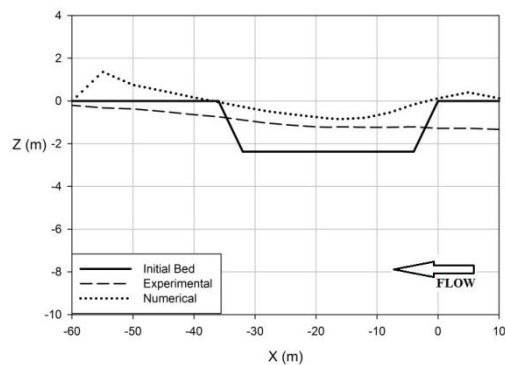
شکل ۴-۵۸ - تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ ، $\frac{S}{B} = 50\%$ ، $\frac{L}{y} = 8$

الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل عددی

نتایج مقایسه تغییرات بستر حفره پایین دست در شرایط برداشت در راستای عرض کانال در شکل ۴-۵۹ ارائه شده است. همچنین مقایسه تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴-۶۰ ارائه شده است.



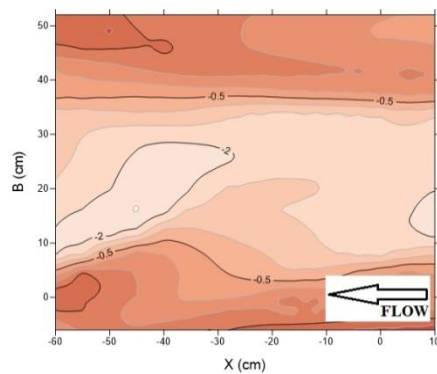
(ب)



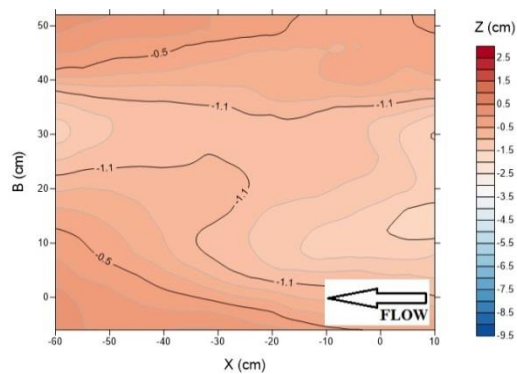
(الف)

شکل ۴-۵۹ - تغییرات بستر حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 0.78$ ، $\frac{S}{B} = 50\%$ ، $\frac{L}{y} = 8$

الف) B=4 cm (ب) خط مرکزی (B=18cm)



(ب)

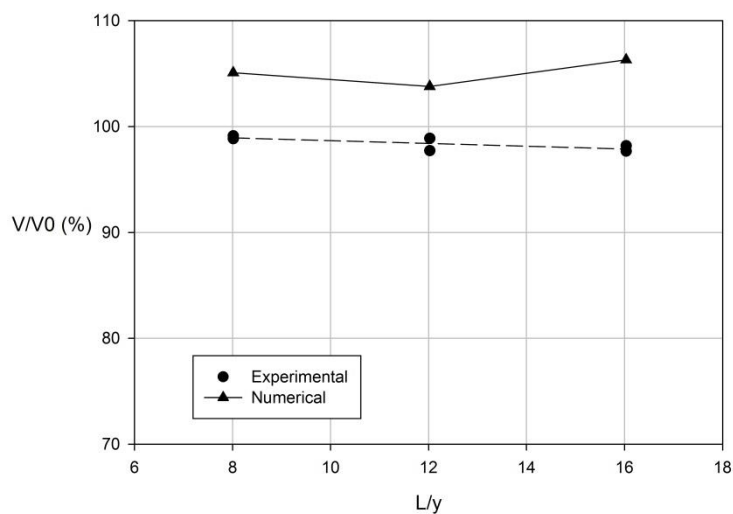


(الف)

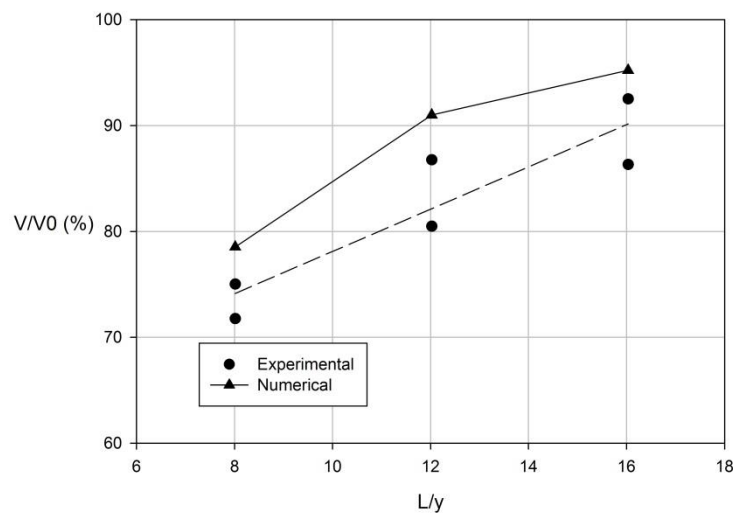
شکل ۴-۶- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$ ، $\frac{l}{y} = 8$

(الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل عددی

در شرایط برداشت در راستای عرض کانال نیز مشابه حالت قبل مدل عددی مقدار پرشدگی بیشتری را نشان می‌دهد. شکل ۴-۶۱ نشان دهنده مقایسه میزان پرشدگی حفره‌های بالادست و پایین دست در مدل آزمایشگاهی و عددی است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۶۱- میزان پرشدگی حفره ها در مدل آزمایشگاهی و عددی برای $\frac{l}{b} = 0.78$ ، $\frac{s}{B} = 50\%$

الف (حفره بالادست ب) حفره پایین دست

برای تعیین خطا در پروفیل سطح پرشده حفره ها از درصد خطای مطلق استفاده شد. به منظور تعیین درصد خطا برای مدل های عددی انجام شده، مقادیر نقطه به نقطه پروفیل سطح حفره اندازه گیری شده در آزمایشگاه و مدلسازی شده در نرم افزار، محاسبه شده است و با توجه به رابطه درصد خطای مطلق، مقادیر خطا برای حفره ها محاسبه شده است. با توجه به جدول ۴-۶ میانگین خطا ۲۰/۸۴ درصد است.

جدول ۴-۶ مقادیر خطا برای حجم پروفیل سطح حفره های بالادست و پایین دست بر حسب درصد

	حفره بالادست	حفره پایین دست
$\frac{l}{b} = 1/28$	۲۰/۱۷	۲۸/۶۵
$\frac{l}{b} = 0.78$	۱۷/۲۹	۱۷/۲۶

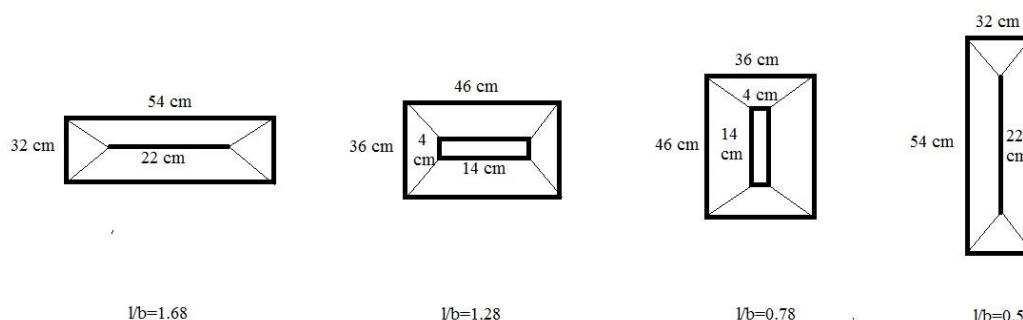
۴-۵- بررسی تاثیر شکل برداشت ($\frac{l}{b}$) بر پرشدگی حفره ها

به منظور بررسی تاثیر شکل برداشت بر میزان حجم پر شده حفره ها از چهار نسبت $\frac{l}{b} = 0.59, 0.78, 1.28, 1.68$ استفاده شد. مدلسازی ابتدا برای حالت تک حفره انجام شده تا تاثیر شکل برداشت در این حالت مشخص شود سپس گزینه های مناسب برای ادامه مدلسازی انتخاب شوند. ابعاد حفره در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۷ ابعاد حفره ها در سطح و کف

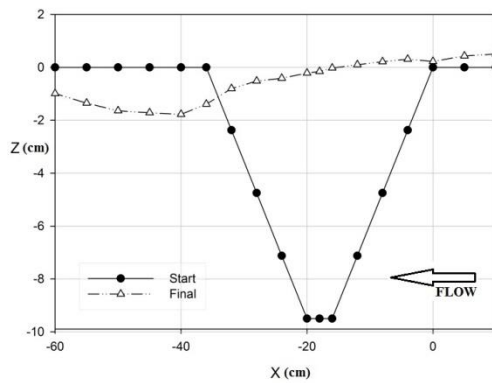
$\frac{l}{b}$	۰/۵۹	۰/۷۸	۱/۲۸	۱/۶۸
ابعاد حفره در سطح بر حسب سانتی متر (عرض × طول)	۳۲×۵۴	۳۶×۴۶	۴۶×۳۶	۵۴×۳۲
ابعاد حفره در کف بر حسب سانتی متر (عرض × طول)	۰×۲۲	۴×۱۴	۱۴×۴	۲۲×۰

ابعاد به گونه ای انتخاب شده اند که حجم خالی حفره ها در همه حالات ذکر شده ثابت باشد. در شکل ۴-۶۲ پلان حفره ها به همراه ابعاد نمایش داده شده است.

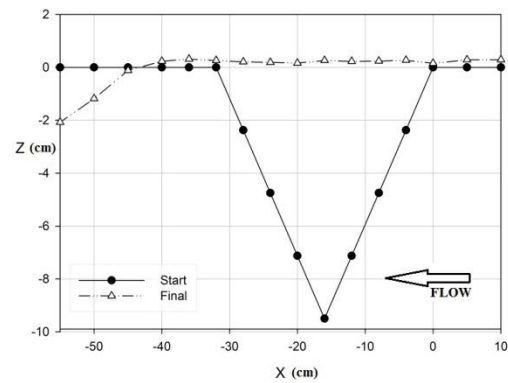


شکل ۴-۶۲- پلان حفره ها به همراه ابعاد آنها

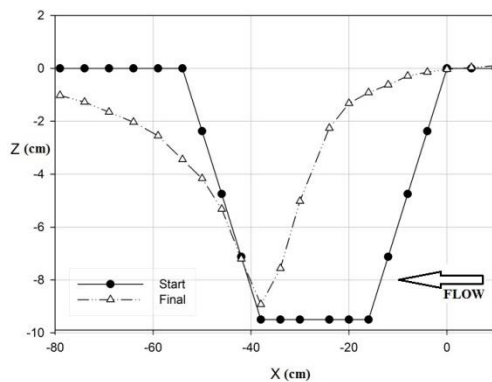
شکل ۴-۶۳ تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره و شکل ۴-۶۳ تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن را نمایش می‌دهد.



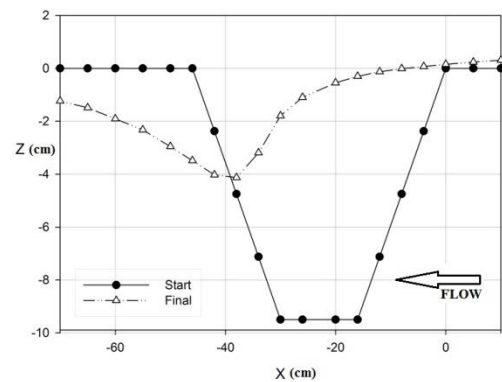
(ب)



(الف)



(د)

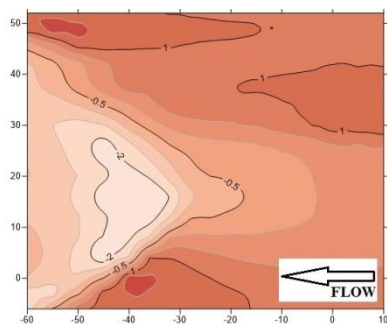


(ج)

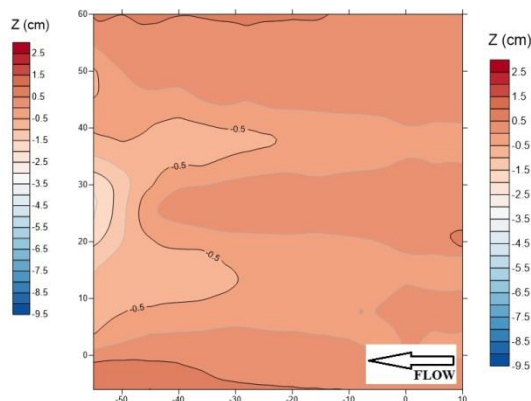
شکل ۴-۶۳- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره در $\frac{S}{B} = 50\%$ (الف) $\frac{l}{b} = 0.59$.

$$\left(\frac{l}{b} = 0.78 \text{ (ب)}, \frac{l}{b} = 1.28 \text{ (ج)}, \frac{l}{b} = 1.68 \text{ (د)} \right)$$

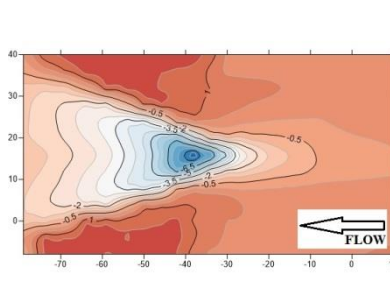
همانگونه که در شکل ۴-۶۳ مشاهده می‌شود افزایش طول برداشت به همراه کاهش عرض سبب کاهش چشمگیر میزان پرشدگی و مهاجرت حفره به سمت پایین‌دست می‌شود به گونه ای که در $\frac{l}{b} = 0.59$ اثری از حفره مشاهده نمی‌شود اما در $\frac{l}{b} = 1.68$ نه تنها حفره کامل پر نشده بلکه ماکزیمم عمق حفره نیز تغییری نکرده و همانند حالت ابتدای برداشت است.



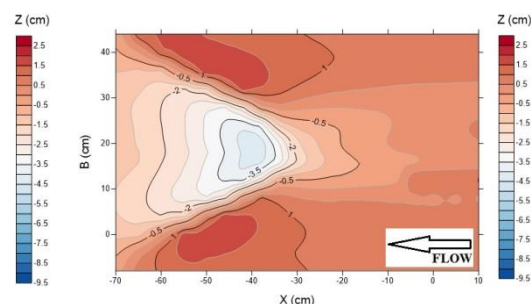
(ب)



(الف)



(د)



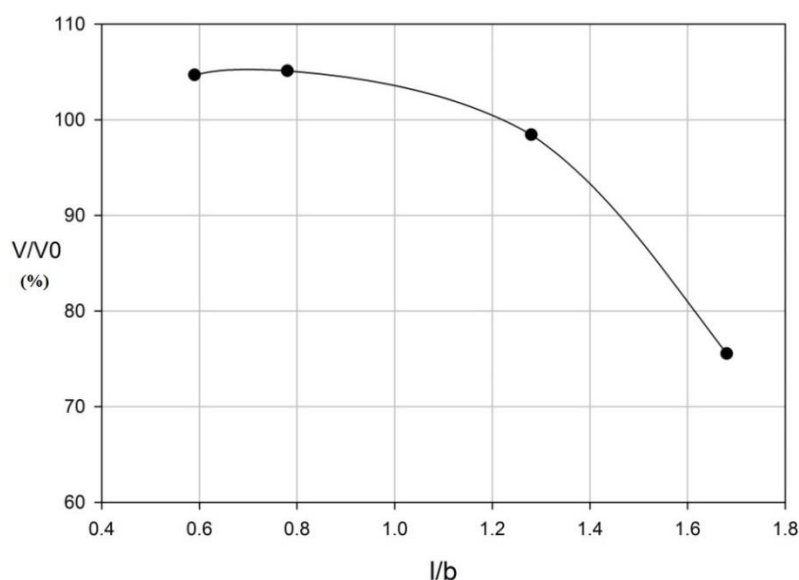
(ج)

شکل ۴-۶۴- تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن در $\frac{S}{B} = 50\%$ (الف $\frac{l}{b} = 0.59$ ، ب $\frac{l}{b} = 0.78$ ، ج $\frac{l}{b} = 0.78$)

$$\frac{l}{b} = 1/28 \text{ (د)}, \frac{l}{b} = 1/68$$

شکل ۴-۶۴ نیز مطالب فوق را تایید می کند و با افزایش نسبت طول به عرض حفره از میزان پرشدگی و مهاجرت حفره به سمت پایین دست کاسته شده و ماکزیمم عمق حفره افزایش می یابد. این امر بدلیل تاثیر محسوس فاصله شیب بالادست تا پایین دست حفره است. زیرا شیب پایین دست حفره نقش موثری در تسریع پرشدگی دارد. اگر زمان شروع پرشدگی تا رسیدن شیب بالادست به پایین دست را دوره انتقال و پس از آن تا پرشدگی کامل و محو شدن حفره را دوره پخشیدگی بنامیم، دوره پخشیدگی دارای سرعت بیشتری بوده و نقش مهمی در افزایش حجم پر شده دارد زیرا باعث بالا آمدن قعر حفره خواهد شد. در نتیجه هرچه شیب پایین دست دورتر شود، شیب بالادست دیرتر به آن رسیده و دوره انتقال افزایش می یابد. شکل ۴-۶۵ تاثیر شکل برداشت بر میزان حجم پر شده حفره را

نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود دو برابر کردن نسبت طول به عرض حفره سبب کاهش حدود ۳۰ درصد از حجم پر شده خواهد شد. از طرفی با توجه به نمودار ملاحظه می‌شود که برای نسبت‌های کوچکتر از $\frac{l}{b} = 1/2$ حفره کاملاً پر می‌شود و شکل برداشت بی‌تاثیر است.



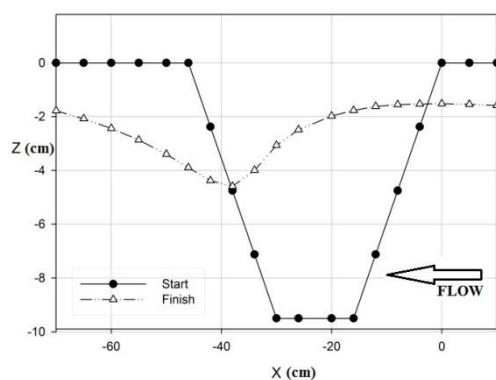
شکل ۴-۶۵- تاثیر شکل برداشت (نسبت طول به عرض حفره) بر میزان پرشدگی

۴-۶- بررسی تاثیر فاصله بین حفره ها ($\frac{L}{y}$) بر پرشدگی حفره

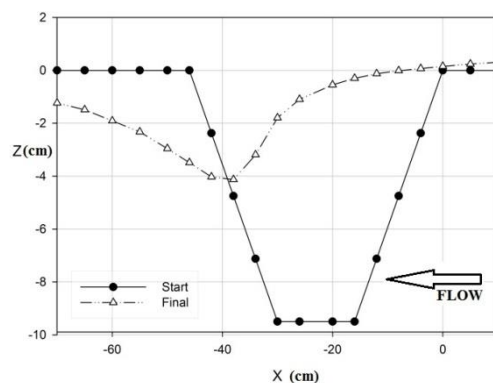
با توجه به نتایج بدست آمده از قسمت آزمایشگاهی مشخص شد که فاصله بین حفره ها در پرشدگی حفره پایین‌دست تاثیر گذار بوده در حالی که در پرشدگی حفره بالادست تاثیری ندارد. از طرفی با توجه به نتایج قسمت قبل مشخص شد که حفره با نسبت $\frac{l}{b} = 1/68$ عملکرد ضعیفی در پرشدگی داشته است. بنابراین در این قسمت دورتر شدن حفره پایین‌دست برای نسبت های $1/28$ ، $0/78$ ، $0/59$ ، $\frac{l}{b}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$4-6-1 \quad \text{نسبت } \frac{l}{b} = 1/28$$

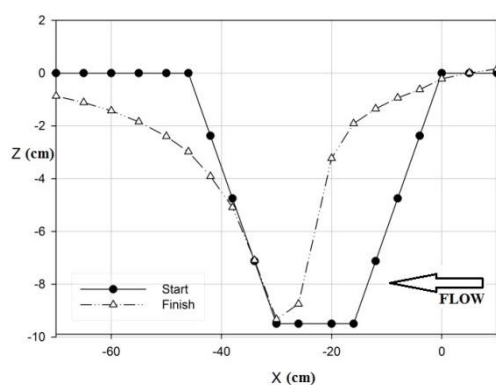
نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین حفره‌ها، حجم پرشده حفره پایین‌دست کاهش می‌یابد اما اگر حفره به اندازه کافی دور شود مجدداً حجم پر شده افزایش یافته و به صورت تک حفره عمل می‌کند. در این قسمت فاصله حفره پایین‌دست از حفره بالادست در مدل عددی دورتر شده تا فاصله مناسب برای پرشدگی توامان حفره بالادست و پایین‌دست تعیین شود. شکل ۴-۶۶ تاثیر دورتر شدن حفره پایین‌دست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره را نشان می‌دهد.



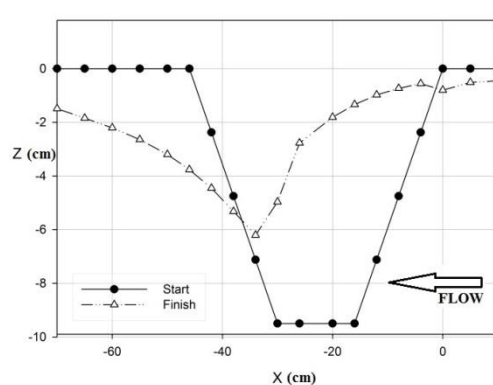
(ب)



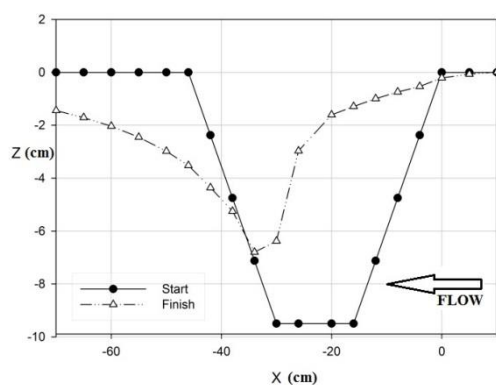
(الف)



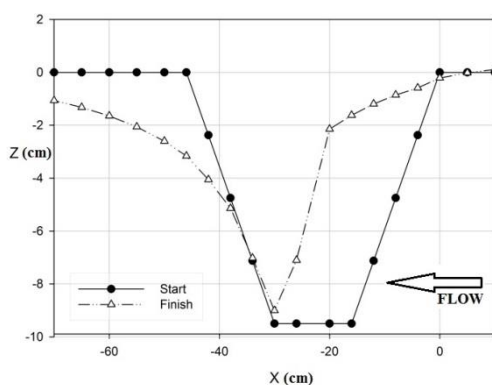
(د)



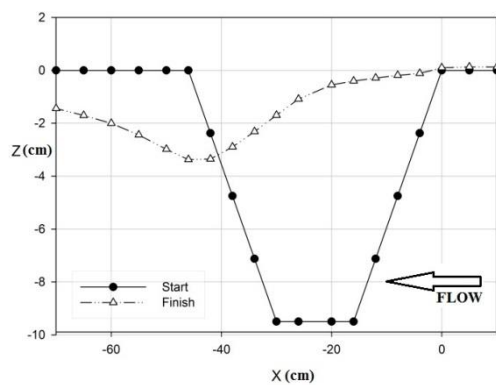
(ج)



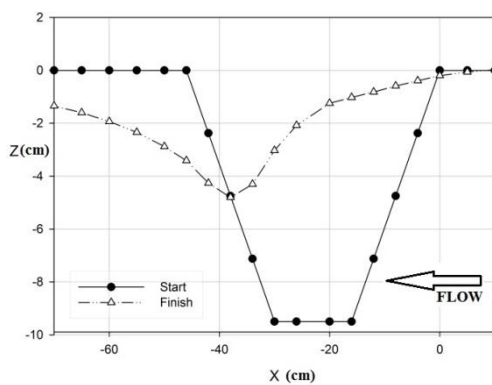
(و)



(ه)



(ز)

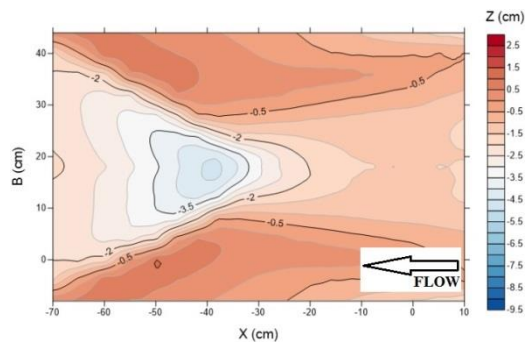


(ط)

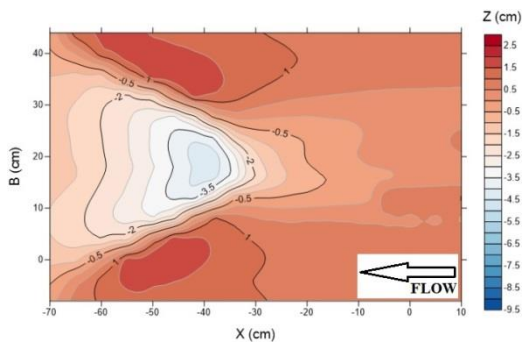
شکل ۴-۶۶- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$

الف) تک حفره، ب) $\frac{l}{y} = 8$ ، ج) $\frac{l}{y} = 12$ ، د) $\frac{l}{y} = 16$ ، ه) $\frac{l}{y} = 20$ ، و) $\frac{l}{y} = 24$ ، ط) $\frac{l}{y} = 28$ ، ز) $\frac{l}{y} = 32$

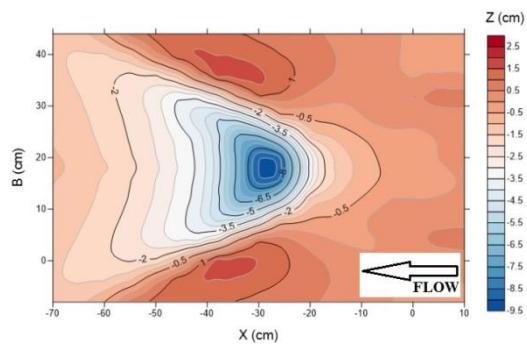
همانگونه که از شکل ۴-۶۶ مشاهده می شود با دورتر شدن حفره پایین دست ابتدا حجم پرشدگی کاهش یافته و مجددا افزایش می یابد و در فاصله ۳۲ برابر عمق جریان، حجم پرشده حفره پایین دست برابر حجم حالت تک حفره می شود. در شکل ۴-۶۷ تاثیر دورتر شدن حفره پایین دست بر تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن نمایش داده شده است.



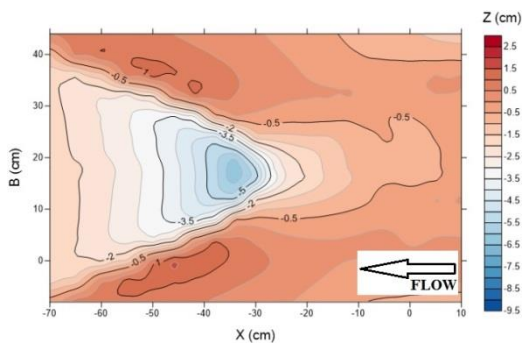
(ب)



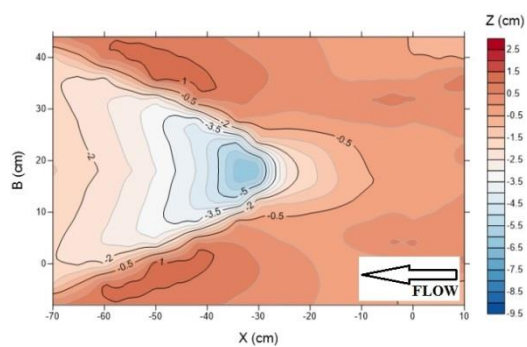
(الف)



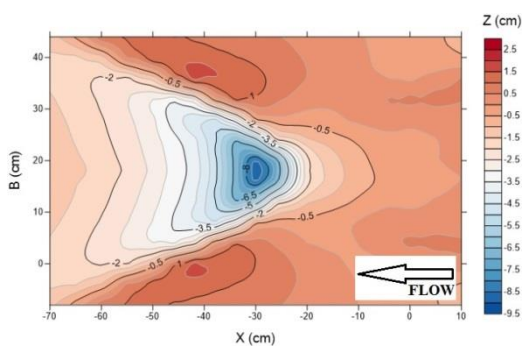
(د)



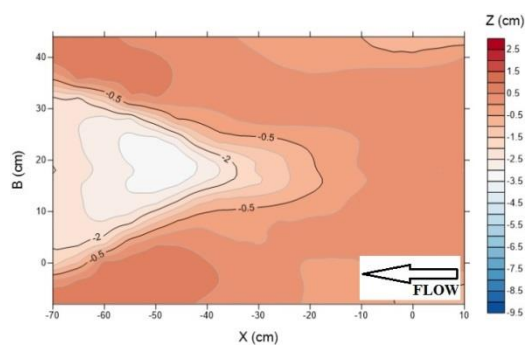
(ج)



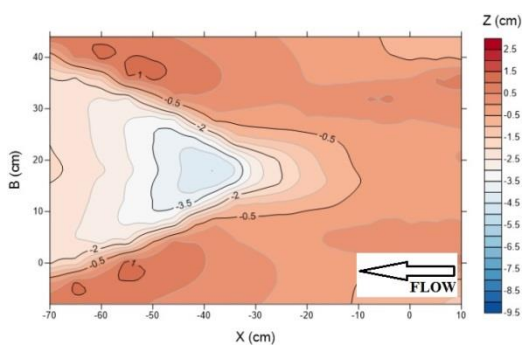
(و)



(هـ)



(ز)



(ط)

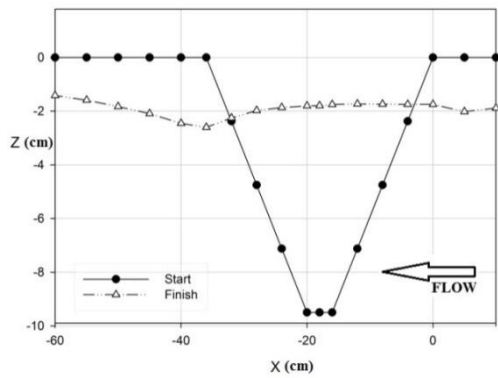
شکل ۴-۶۷- توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ (الف) تک حفره،

$$\text{ب) } \frac{l}{y} = 8 \text{ (ج) } \frac{l}{y} = 12 \text{ (د) } \frac{l}{y} = 16 \text{ (ه) } \frac{l}{y} = 20 \text{ (و) } \frac{l}{y} = 24 \text{ (ط) } \frac{l}{y} = 28 \text{ (ز) } \frac{l}{y} = 32$$

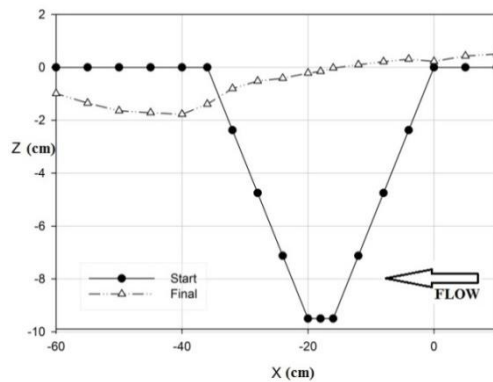
شکل ۴-۶۷ نشان دهنده این مطلب است که پرشدگی و پیشروی حفره پایین دست با افزایش فاصله بین حفره‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. زیرا پرشدگی حفره پایین دست بر اساس فرسایش حفره بالادست است. با افزایش فاصله بین حفره‌ها زمان رسیدن رسوبات فرسایش یافته از حفره بالادست به پایین دست بیشتر می‌شود و حجم کمتری از آن به درون حفره می‌ریزد. از طرفی مشارکت بار بستر در فواصل کم بین حفره‌ها پایین بوده و رسوبات فرسایش یافته از حفره بالادست نقش تعیین کننده در تغذیه رسوب حفره پایین دست را دارند. اما با افزایش بیشتر فاصله بین حفره‌ها، بستر نیز در پرکردن حفره پایین دست مشارکت می‌کند و در نتیجه مجدداً حجم پرشده افزایش می‌یابد.

$$\frac{l}{b} = 0/78 \text{ نسبت } 4-6-2$$

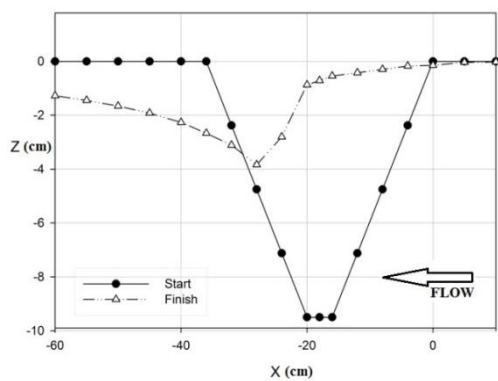
نتایج مطالعه آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در این حالت با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشده حفره پایین دست افزایش می‌یابد. در این قسمت فاصله حفره پایین دست از حفره بالادست در مدل عددی دورتر شده تا فاصله مناسب برای پرشدگی توأمان حفره بالادست و پایین دست تعیین شود. شکل ۴-۶۸ تاثیر دورتر شدن حفره پایین دست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره را نشان می‌دهد.



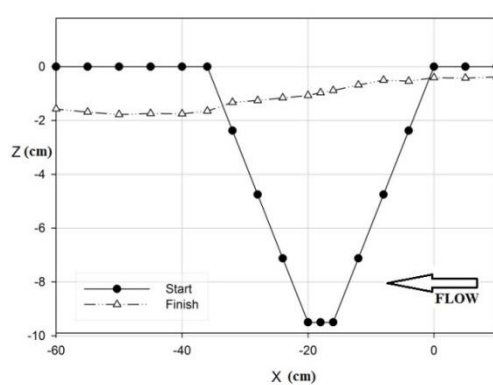
(ب)



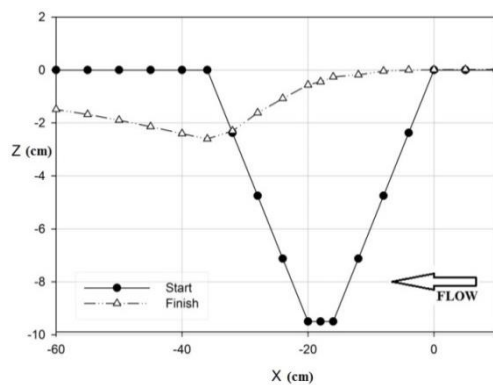
(الف)



(د)



(ج)

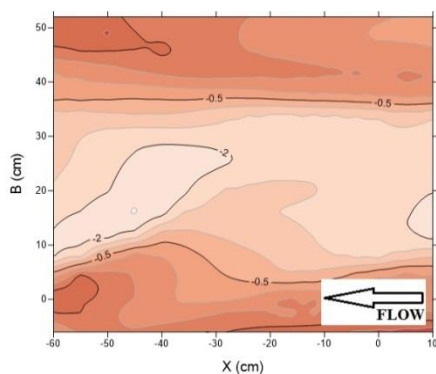


(ه)

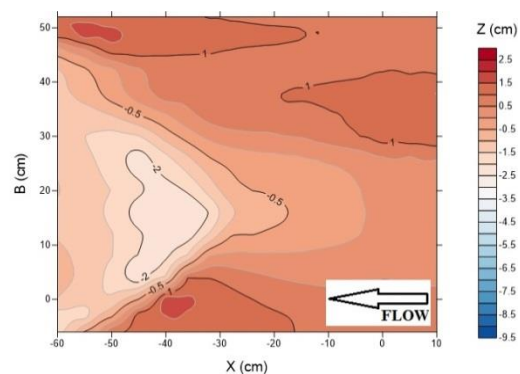
شکل ۴-۶۸- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $\frac{L}{b} = 0.78$ و 50%

$\frac{S}{B} =$ (الف) تک حفره، (ب) $\frac{L}{y} = 8$ ، (ج) $\frac{L}{y} = 12$ ، (د) $\frac{L}{y} = 16$ ، (ه) $\frac{L}{y} = 20$

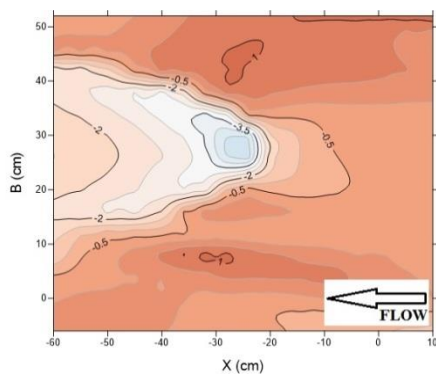
همانگونه که در شکل ۴-۶۸ مشاهده می شود با افزایش فاصله بین حفره ها رفته رفته بر حجم پرشدگی حفره پایین دست افزوده می شود و در فاصله ۲۰ برابر عمق جریان حجم پر شده حفره پایین دست با حالت تک حفره برابر می شود. در شکل ۴-۶۹ تاثیر دورتر شدن حفره پایین دست بر تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن نمایش داده شده است.



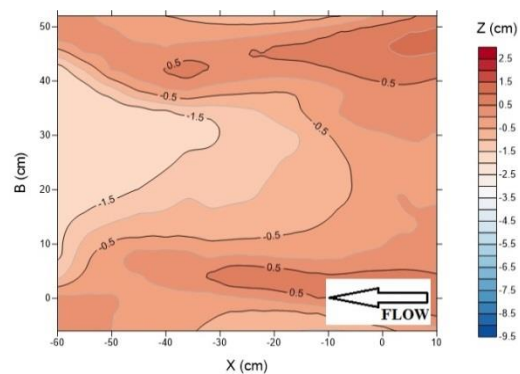
(ب)



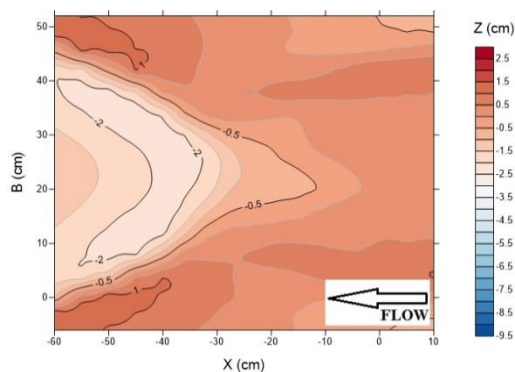
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

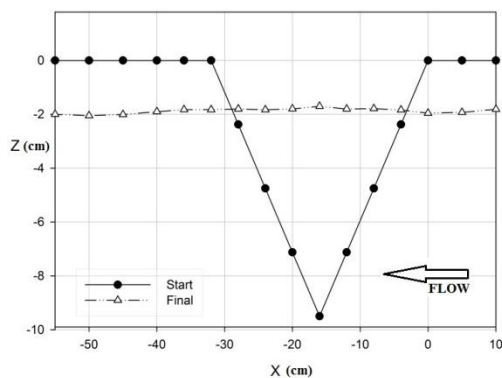
شکل ۴-۶۹- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.78$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ (الف) تک

$$\text{حفره، ب) } \frac{l}{y} = 8, \text{ ج) } \frac{l}{y} = 12, \text{ د) } \frac{l}{y} = 16, \text{ ه) } \frac{l}{y} = 20$$

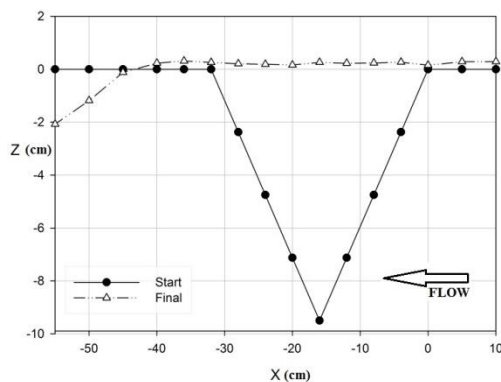
با توجه به شکل ۴-۶۸ و ۴-۶۹ می توان دریافت که اگرچه حفره پایین دست در فواصل نزدیک به حفره بالادست، کاملاً پر شده است اما تراز بستر کاهش یافته و حجم پرشدگی کمتری نسبت به فواصل دورتر خواهد داشت. علت این امر به دلیل نزدیک شدن شیب پایین دست حفره به شیب بالادست آن است که باعث تسریع در روند پرشدگی خواهد شد. از طرفی فاصله بین حفره ها کم بوده و رسوبات فرسایش یافته از بالادست سریعاً به حفره پایین دست می رسد و شیب بالادست بر پایین دست سوار شده که این امر پرشدگی را سرعت می بخشد و با افزایش زمان کاهش تراز بستر اتفاق می افتد. اما با افزایش فاصله بین حفره ها، رسوبات فرسایش یافته از بالادست دیرتر به پایین دست منتقل شده اما بستر نیز در پرشدگی حفره مشارکت می کند و شیب بالادست حفره به شیب پایین دست سوار می شود و سبب می شود کاهش تراز بستر ایجاد نشود و این امر سبب افزایش حجم پر شده حفره پایین دست خواهد شد.

$$\frac{l}{b} = 0.59 \text{ نسبت } 4-6-3$$

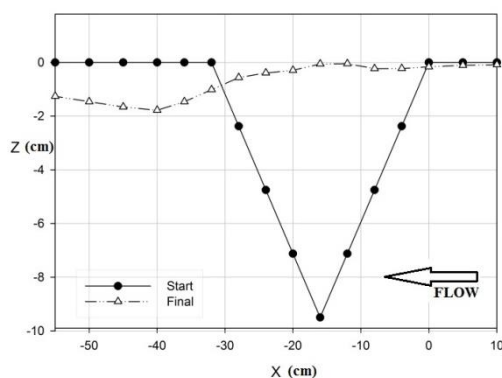
عملکرد حفره پایین دست در این حالت نیز مشابه حالت $\frac{l}{b} = 0.78$ است زیرا طول حفره کاهش یافته و بر عرض آن افزوده شده است. اما کاهش نسبت $\frac{l}{b}$ بر کاهش فاصله بین حفره ها تاثیرگذار خواهد بود. شکل ۴-۷۰ تاثیر دورتر شدن حفره پایین دست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره را نشان می دهد.



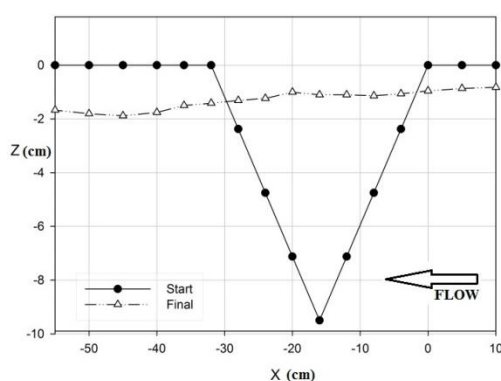
(ب)



(الف)



(د)

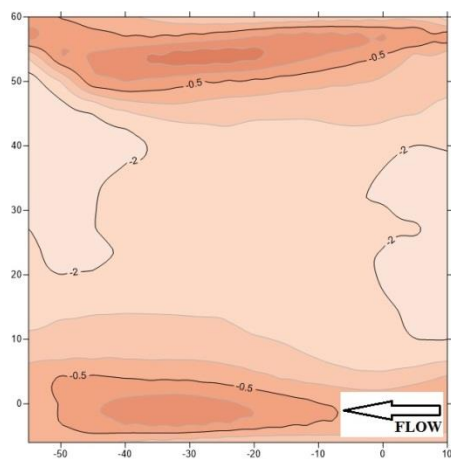


(ج)

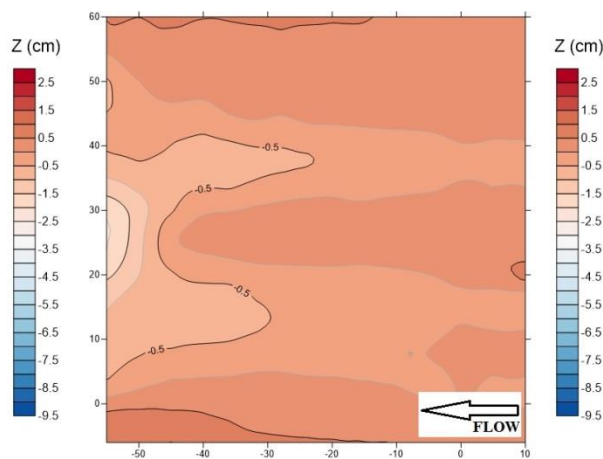
شکل ۴-۷۰- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 0.59$ و

$$\frac{L}{y} = 16 \text{ (د)}, \frac{L}{y} = 12 \text{ (ج)}, \frac{L}{y} = 8 \text{ (ب)}, \frac{L}{y} = 4 \text{ (الف) تک حفره}, \frac{s}{B} = 50\%$$

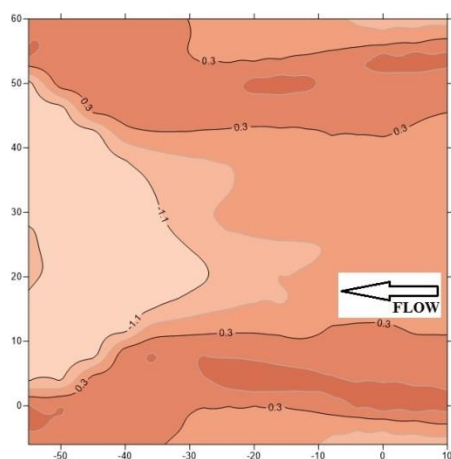
با توجه به شکل ۴-۷۰ می توان نتیجه گرفت که کاهش نسبت طول به عرض حفره، فاصله بین حفره ها برای دستیابی حجم حفره پایین دست به حجم حالت تک حفره کاهش می یابد. در این حالت فاصله ۱۶ برابر عمق جریان سبب پر شدن حفره پایین دست به اندازه حالت تک حفره خواهد شد. در شکل ۴-۷۱ تاثیر دورتر شدن حفره پایین دست بر تغییرات توپوگرافی حفره و اطراف آن نمایش داده شده است.



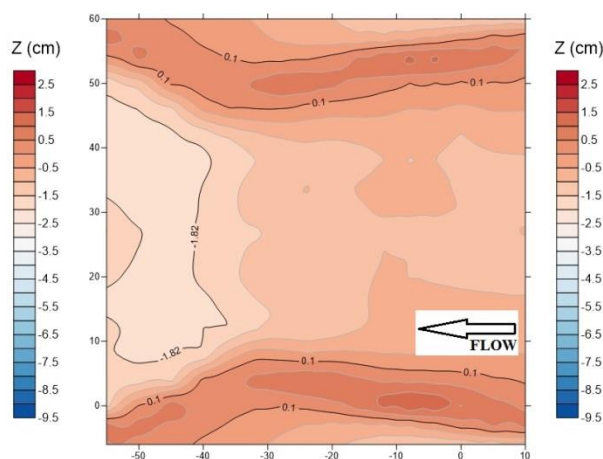
(ب)



(الف)



(د)



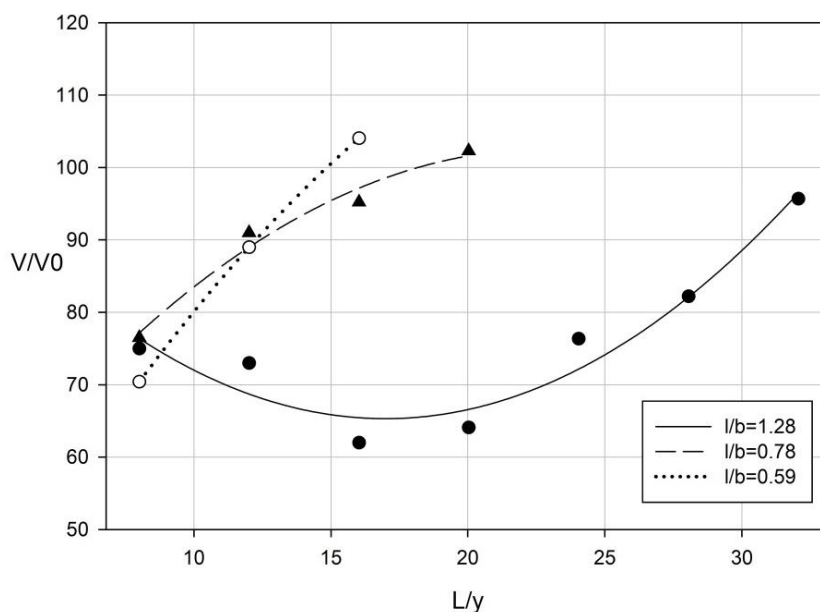
(ج)

شکل ۷۱-۴- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 0.59$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ (الف) تک حفره،

$$\text{ب) } \frac{l}{y} = 8, \text{ ج) } \frac{l}{y} = 12, \text{ د) } \frac{l}{y} = 16$$

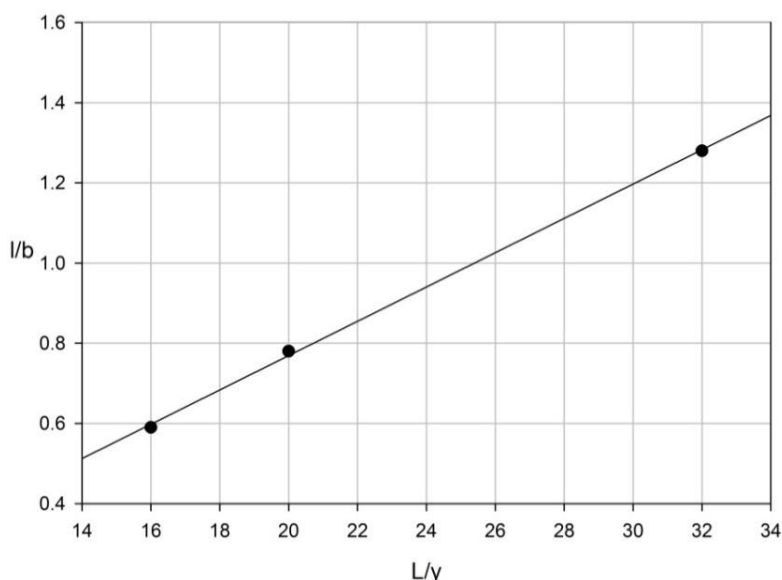
با توجه به شکل های ۷۰-۴ و ۷۱-۴ می توان دریافت که عملکرد حفره پایین دست در این حالت مشابه حالت $\frac{l}{b} = 0.78$ است و مکانیزم پرشدگی یکسان است اما دلیل کم شدن فاصله بین حفره ها به دلیل نزدیک تر شدن شیب بالادست حفره به شیب پایین دست است که روند پرشدگی را تسریع می کند. شکل ۷۲-۴ تاثیر فاصله بین حفره ها بر حجم پرشدگی حفره پایین دست را برای مقادیر مختلف $\frac{l}{b}$ نمایش می دهد. با توجه به شکل ۷۲-۴ می توان نتیجه گرفت که در حالت برداشت در راستای طول کانال، با افزایش فاصله بین حفره ها حجم پرشدگی حفره پایین دست تا فاصله ۱۶ الی

۲۰ برابر عمق جریان کاهش یافته و پس از آن مجدداً افزایش می‌یابد و در فاصله ۳۲ برابر عمق جریان به حجم پرشدگی حالت تک حفره خواهد رسید. اما در حالت برداشت در راستای عرض کانال با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی حفره پایین دست افزایش یافته و روند صعودی دارد و حجم پرشده برای $\frac{l}{b} = 0.78$ در فاصله ۲۰ برابر عمق جریان و برای $\frac{l}{b} = 0.59$ در فاصله ۱۶ برابر عمق جریان به حجم پرشده در حالت تک حفره می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت $\frac{l}{b} = 0.59$ شیب نمودار تندتر از حالت $\frac{l}{b} = 0.78$ است که این امر کوتاه‌تر شدن فاصله برداشت را توجیه می‌کند و به دلیل نزدیک شدن شیب پایین دست حفره به شیب بالادست حفره است. با توجه به نتایج بدست آمده در صورتی که برداشت در راستای طول کانال انجام شود فاصله بین نقاط برداشت افزایش یافته و به لحاظ اقتصادی مناسب نیست. حال آنکه هرچه برداشت، بیشتر در راستای عرض کانال انجام شود فاصله بین نقاط برداشت کاهش می‌یابد. با توجه به محدوده پارامترهای بدون بعد تحقیق حاضر، در صورتی که نسبت طول به عرض حفره برابر $1/28$ و فاصله برداشت ۱۶ الی ۲۰ برابر عمق جریان باشد ضعیف‌ترین عملکرد در پرشدگی را خواهیم داشت. حال آنکه اگر برداشت با نسبت طول به عرض حفره برابر 0.59 و فاصله نقاط برداشت ۱۶ برابر عمق جریان باشد بهترین عملکرد پرشدگی حاصل خواهد شد.



شکل ۷۲-۴- تاثیر فاصله بین حفره ها بر حجم پرشدگی حفره پایین دست را برای مقادیر مختلف $\frac{l}{b}$

شکل ۷۳-۴ تاثیر متقابل شکل برداشت بر فاصله برداشت را نشان می دهد. با توجه به شکل ۷۳-۴ می توان دریافت که بین شکل برداشت و فاصله آن ارتباط خطی وجود داشته به گونه ای که با حدود دو برابر کردن نسبت طول به عرض حفره، فاصله برداشت حفره ها تا دو برابر افزایش می یابد. به عبارت دیگر هر چه برداشت در راستای طول انجام شود فاصله برداشت حفره ها افزایش می یابد و رابطه بین این دو خطی است.



شکل ۷۳-۴- تاثیر متقابل شکل برداشت بر فاصله برداشت

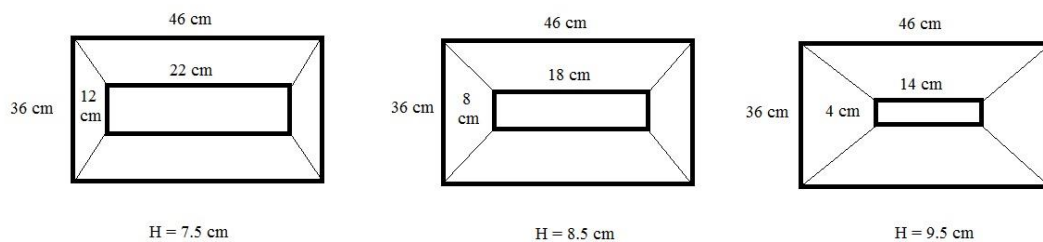
۷-۴- بررسی تاثیر عمق برداشت $(\frac{H}{y})$ بر پرشدگی حفره

با توجه به نتایج قسمت قبل مشخص شد که در صورتی که نسبت طول به عرض حفره برابر $1/28$ و فاصله برداشت ۱۶ الی ۲۰ برابر عمق جریان باشد ضعیف ترین عملکرد در پرشدگی را خواهیم داشت. حال در این قسمت پرشدگی حفره بالادست و پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{L}{y} = 16$ به منظور تاثیر یا عدم تاثیر عمق برداشت در بهبود عملکرد حفره ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. سه عمق $8/5$ ، $7/5$ و $9/5$ سانتی متر برای بررسی اثر این پارامتر بر پرشدگی حفره در نظر گرفته شده است. در این قسمت

عمق حفره با ثابت ماندن نسبت طول به عرض در سطح حفره تغییر می‌کند. بنابراین دو حالت اتفاق می‌افتد: حالت اول اینکه عمق حفره بدون تغییر حجم اولیه کاهش یابد و حالت دوم اینکه کاهش عمق حفره با کاهش حجم اولیه همراه باشد. در حالت اول به منظور ثابت نگه داشتن حجم اولیه برداشت، ابعاد حفره در کف تغییر می‌کند. اما در حالت دوم ابعاد در کف نیز ثابت مانده و فقط عمق حفره کاهش می‌یابد. تاثیر هر دو حالت بر پرشدگی حفره بالادست و پایین‌دست در ادامه بررسی شده است.

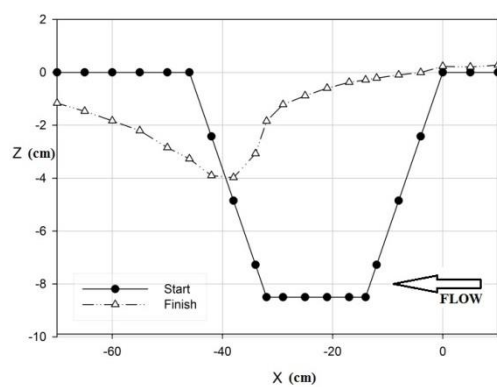
۴-۷-۱- تاثیر عمق برداشت با حجم اولیه ثابت در پرشدگی حفره ها

در این حالت به منظور ثابت نگه داشتن حجم ابعاد حفره در کف تغییر می‌کند. شکل ۴-۷۴ مشخصات ابعاد حفره ها را نمایش می‌دهد.

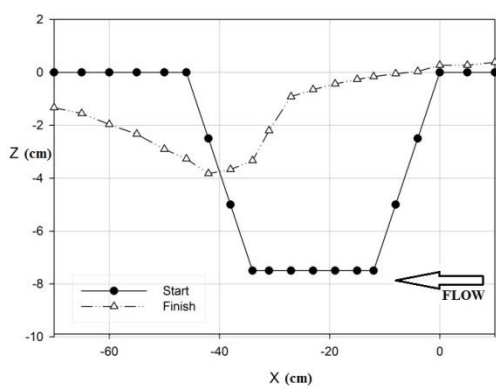


شکل ۴-۷۴- مشخصات ابعاد حفره‌ها در حالت حجم اولیه ثابت

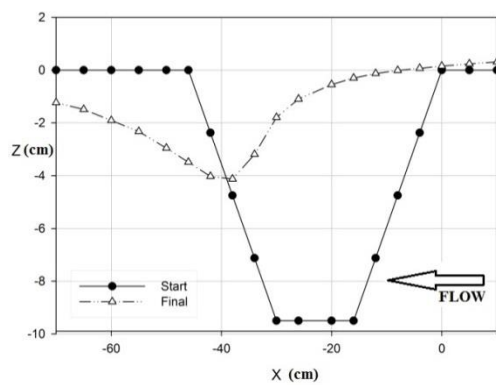
شکل ۴-۷۵ تاثیر عمق حفره بالادست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره و شکل ۴-۷۶ تاثیر عمق حفره بر تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش عمق حفره میزان پرشدگی و پیشروی به لحاظ کیفی تغییری نمی‌کند. در هر سه حالت شیب بالادست به پایین‌دست سوار شده و در انتها پروفیل طولی حفره و همچنین تغییرات توپوگرافی تغییر آنچنانی نمی‌کند.



(ب)



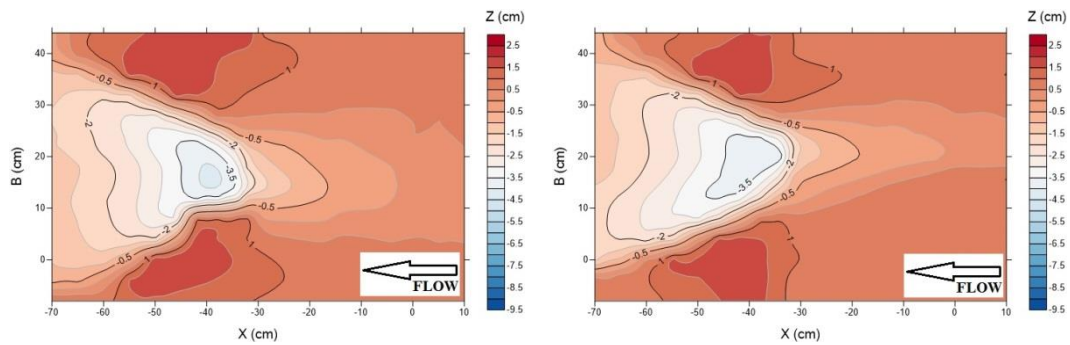
(الف)



(ج)

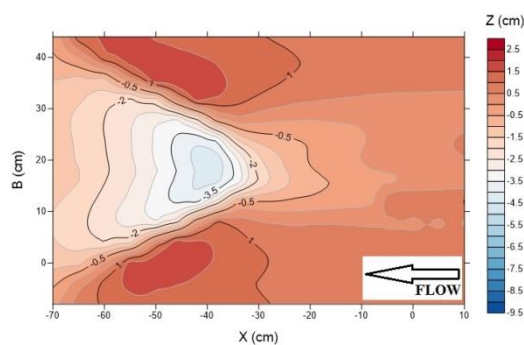
شکل ۴-۷۵- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره بالادست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ و $\frac{L}{y} = 16$

(الف) $\frac{H}{y} = 1/25$ ، (ب) $\frac{H}{y} = 1/42$ ، (ج) $\frac{H}{y} = 1/59$



(ب)

(الف)

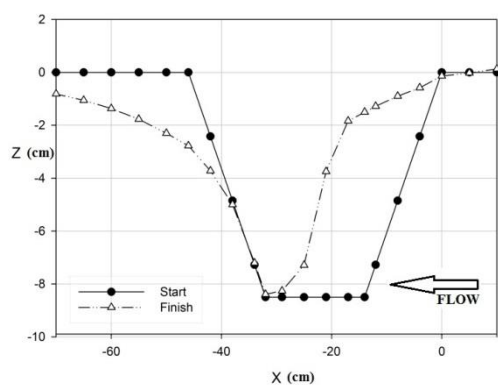


(ج)

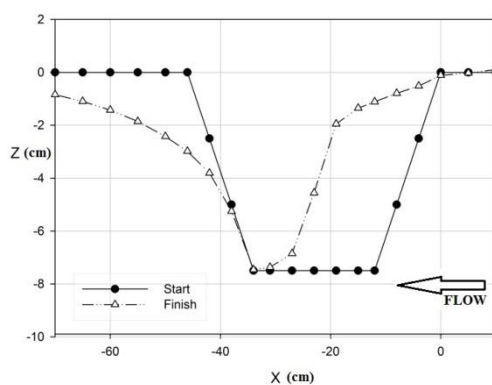
شکل ۴-۷۶- تغییرات توپوگرافی حفره بالادست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ و $\frac{l}{y} = 16$

الف $\frac{H}{y} = 1/25$ ، ب $\frac{H}{y} = 1/42$ ، ج $\frac{H}{y} = 1/59$

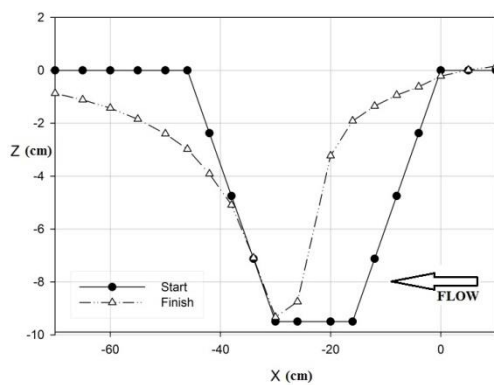
شکل ۴-۷۷ تاثیر عمق حفره پایین دست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره و شکل ۴-۷۸ تاثیر عمق حفره بر تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که همانند حفره بالادست، افزایش عمق در حجم پر شده و پیشروی حفره پایین دست نیز به لحاظ کیفی بی تاثیر است. در هر سه حالت شیب بالادست بر پایین دست سوار نشده و همین امر سبب می شود که حفره پایین دست نسبت به حفره بالادست حجم پرشدگی کمتری داشته باشد.



(ب)



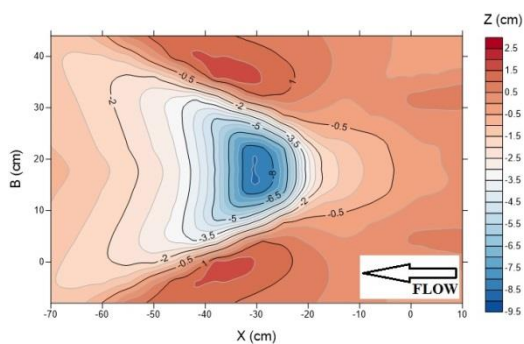
(الف)



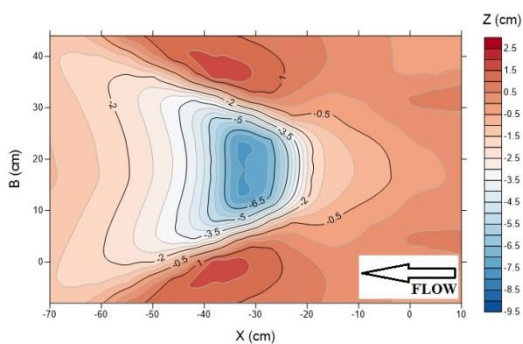
(ج)

شکل ۴-۷۷- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و

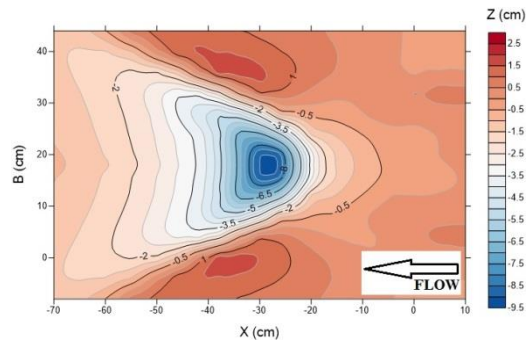
$$\frac{H}{y} = 1/59 \text{ (ج)}, \frac{H}{y} = 1/42 \text{ (ب)}, \frac{H}{y} = 1/25 \text{ (الف)} \quad \frac{L}{y} = 16 \text{ و } \frac{S}{B} = \%. 50$$



(ب)



(الف)

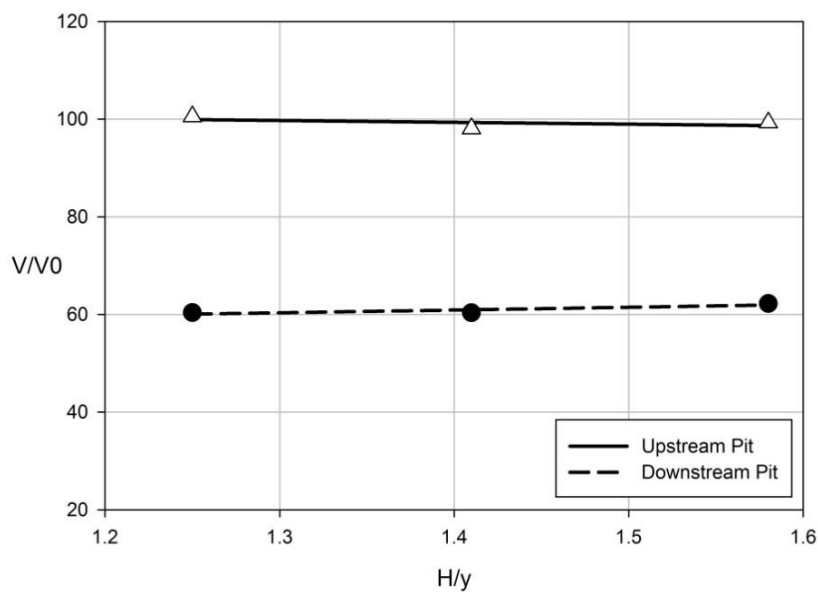


(ج)

شکل ۴-۷۸- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{L}{y} = 16$

الف) $\frac{H}{y} = 1/25$ ، ب) $\frac{H}{y} = 1/42$ ، ج) $\frac{H}{y} = 1/59$

شکل ۴-۷۹- تاثیر عمق حفره با حجم اولیه ثابت را بر مقدار پرشدگی حفره های بالادست و پایین دست نشان می دهد.



شکل ۴-۷۹- تاثیر عمق حفره با حجم اولیه ثابت بر مقدار پرشدگی حفره های بالادست و پایین دست در

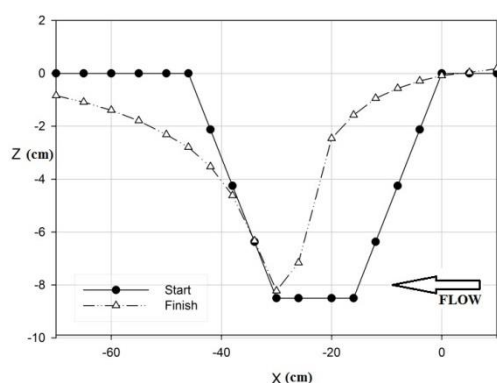
$$\frac{L}{y} = 16 \text{ و } \frac{S}{B} = 50\% \text{ و } \frac{l}{b} = 1/28$$

همانگونه که مشاهده می شود به لحاظ کمی نیز تغییری در حجم پر شده حفره بالادست و پایین دست دیده نمی شود. علت این امر را می توان این گونه توجیه کرد که با افزایش عمق حفره فاصله بین شیب بالادست و شیب پایین دست حفره در کف کاهش می یابد و بالعکس. افزایش عمق حفره به

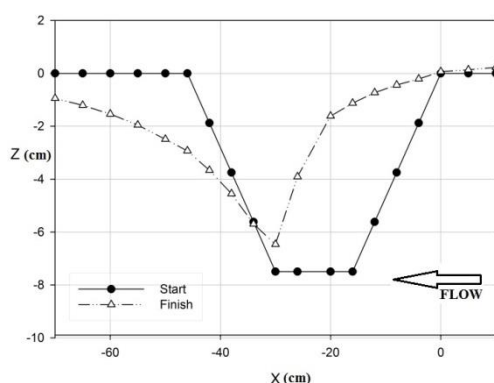
تنهایی باعث کاهش حجم پر شده می‌شود و نزدیک شدن شیب بالادست به پایین‌دست حفره سبب تسریع در روند پرشدگی خواهد شد. این دو عامل به صورت همزمان اثر کرده و تاثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند و سبب می‌شوند که تغییر همزمان عمق حفره و ابعاد کف حفره، تغییری در حجم پر شده ایجاد نکند.

۴-۷-۲- تاثیر عمق برداشت با حجم اولیه متغیر در پرشدگی حفره‌ها

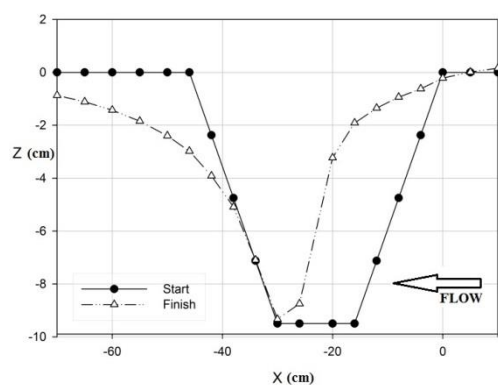
در این حالت ابعاد سطح و کف حفره ثابت مانده و عمق حفره تغییر می‌یابد. به دلیل اینکه عمق‌های در نظر گرفته شدن کمتر از حالت اولیه (۹/۵ سانتی‌متر) می‌باشند و چون حفره بالادست در این حالت بصورت کامل پر شده است بنابراین کاهش عمق تغییری در حجم پر شده حفره بالادست ایجاد نخواهد کرد. شکل ۴-۸۰ تاثیر عمق حفره پایین‌دست بر تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره و شکل ۴-۸۱ تاثیر عمق حفره بر تغییرات توپوگرافی حفره پایین‌دست و اطراف آن را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود کاهش عمق حفره سبب می‌شود که شیب بالادست بر روی شیب پایین‌دست حفره سوار شده و این امر پرشدگی را تسریع می‌کند اما با توجه به شکل، بالا آمدن قعر حفره محسوس نیست و این امر باعث می‌شود که با کاهش عمق حفره در این بازه مورد نظر، حجم پرشدگی بصورت جزئی افزایش یابد.



(ب)



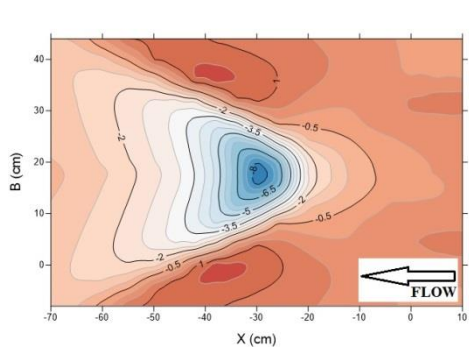
(الف)



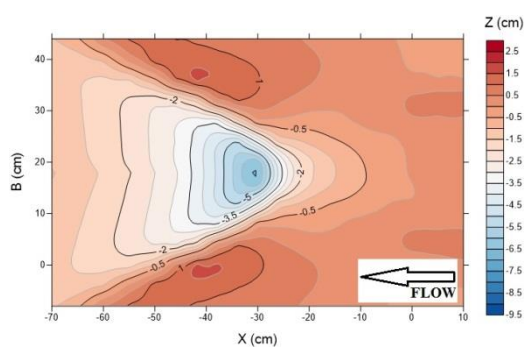
(ج)

شکل ۴-۸۰- تغییرات بستر در راستای طول کانال و خط مرکزی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$

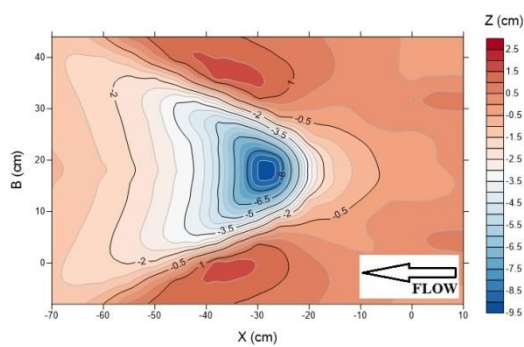
$$\frac{H}{y} = 1/59 \text{ (ج)}, \frac{H}{y} = 1/42 \text{ (ب)}, \frac{H}{y} = 1/25 \text{ (الف)} \quad \frac{L}{y} = 16 \quad \text{و} \quad \frac{s}{B} =$$



(ب)



(الف)

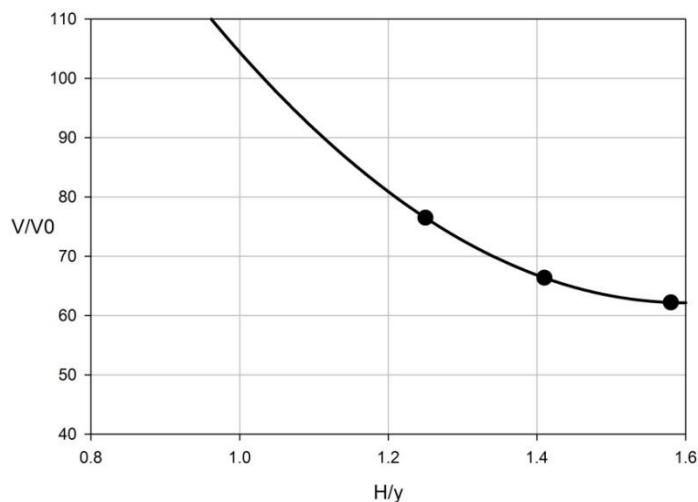


(ج)

شکل ۴-۸۱- تغییرات توپوگرافی حفره پایین دست و اطراف آن در $\frac{l}{b} = 1/28$ و $\frac{s}{B} = 50\%$ و $\frac{L}{y} = 16$

$$\frac{H}{y} = 1/59 \text{ (ج)}, \frac{H}{y} = 1/42 \text{ (ب)}, \frac{H}{y} = 1/25 \text{ (الف)}$$

شکل ۴-۸۲ تاثیر عمق حفره با حجم اولیه متغیر را بر مقدار پرشدگی حفره پایین دست نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با کاهش عمق برداشت و تغییر نسبت $\frac{H}{y} = \frac{1}{59}$ تا $\frac{H}{y} = \frac{1}{25}$ حجم پرشده حفره پایین دست در حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴-۷۶ می‌توان دریافت در صورتی که نسبت عمق حفره به عمق جریان برابر ۱ باشد یا به عبارت دیگر اگر عمق برداشت برابر عمق جریان باشد کل حفره پر خواهد شد.



شکل ۴-۸۲- تاثیر عمق حفره با حجم اولیه متغیر بر مقدار پرشدگی حفره پایین دست در $\frac{l}{b} = \frac{1}{28}$ و

$$\frac{L}{y} = 16 \text{ و } \frac{S}{B} = 50\%$$

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی می‌توان نتیجه گرفت که برداشت در راستای عرض کانال به مراتب بهتر از برداشت در راستای طول کانال است و هر چه نسبت طول به عرض حفره کمتر باشد پرشدگی بهتر بوده و فاصله نقاط برداشت کاهش می‌یابد. به گونه ای که نصف شدن نسبت طول به عرض حفره سبب افزایش حدود ۳۰ درصد از حجم پر شده خواهد شد و اگر نسبت طول به عرض $\frac{1}{2}$ شود فاصله حفره‌های متوالی برداشت به نصف کاهش می‌یابد که از لحاظ اقتصادی به صرفه است. در صورتی که برداشت در راستای طول انجام شود باید سعی شود که برداشت بصورت سطحی و در عمق‌های کمتر صورت پذیرد زیرا هرچه عمق برداشت کمتر باشد قعر حفره

سریعا بالا آمده و تاثیرات مخرب حفره کاهش می‌یابد. در صورتی که عمق برداشت برابر عمق جریان حفر شود پرشدگی همانند برداشت در راستای عرض کانال شده و فواصل نقاط برداشت نیز همانند آن نصف می‌گردد و در واقع نتایج برداشت در راستای عرض و طول کانال مشابه هم و مناسب می‌باشند.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی و عددی مکان‌یابی و تاثیر جانمایی حفره‌های برداشت مصالح بر میزان پرشدگی آنها پرداخته شد. بدین صورت که پارامترهای شکل برداشت، فاصله بین حفره‌ها و فاصله حفره‌ها از دیواره در قالب پارامترهای بدون بعد در قسمت آزمایشگاهی بررسی شد و در قسمت عددی پس از صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی توسعه داده شد و نتایج پارامترهای شکل برداشت و فاصله بین حفره‌ها تکمیل شده و تاثیر عمق برداشت نیز بررسی شد. در این قسمت نتایج بدست آمده از این تحقیق و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه خواهد شد.

۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد:

۱- در شرایط برداشت در راستای طول کانال، دور تر شدن حفره پایین‌دست، تاثیری بر حجم پر

شده حفره بالادست ندارد همچنین میزان پرشدگی حفره بالادست برای $\frac{S}{B} = 50\%$ و

$\frac{S}{B} = 35\%$ تقریباً یکسان بوده اما در $\frac{S}{B} = 20\%$ در حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. این

امر بدلیل عملکرد متفاوت جریان در این حالت اتفاق می‌افتد.

۲- در شرایط برداشت در راستای طول کانال، با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی حفره

پایین‌دست کاهش می‌یابد و این کاهش حجم در موقعیت نزدیک دیواره کانال شدیدتر است

و این امر بدلیل تاثیر دیواره روی جریان و الگوی پرشدگی حفره است.

۳- در شرایط برداشت در راستای عرض کانال، دورتر شدن حفره پایین‌دست نیز تاثیری در تغییر

حجم پرشدگی حفره بالادست ندارد. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که حفره نزدیک به دیواره

است حجم پرشدگی حفره نزدیک به ۲۵ درصد نسبت به حالتی که نزدیک محور مرکزی

کانال قرار داشته باشد کاهش می‌یابد. این امر به دلیل برخورد جریان به دیواره و انحراف آن صورت می‌گیرد و باعث می‌شود حفره فقط از سمت راست خود پر شود.

۴- در شرایط برداشت در راستای عرض کانال، در $\frac{S}{B} = 50\%$ و $\frac{S}{B} = 35\%$ با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی افزایش می‌یابد و از نظر کمی نیز میزان پرشدگی برابر است و این امر بدلیل پایین افتادگی سطح پرشده حفره در فواصل کوتاه بین حفره‌ها است اما در 20% $\frac{S}{B} =$ عکس این قضیه اتفاق می‌افتد و با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشده حفره پایین‌دست کاهش می‌یابد. زیرا حفره پایین‌دست در این حالت به طور کامل پر نمی‌شود و عمل پایین افتادگی سطح حفره اتفاق نمی‌افتد.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد:

۱- میزان خطای مقادیر برآیند سرعت در کل محدوده‌ی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده در مدل معادل $8/71$ درصد است. همچنین میانگین خطا پروفیل سطح حفره برای حفره‌ها $20/84$ درصد است.

۲- با افزایش نسبت طول به عرض حفره از میزان پرشدگی و پیشروی حفره به سمت پایین دست کاسته شده و ماکزیمم عمق حفره افزایش می‌یابد. این امر بدلیل تاثیر محسوس فاصله شیب بالادست تا پایین دست حفره است.

۳- دو برابر کردن نسبت طول به عرض حفره سبب کاهش حدود 30 درصد از حجم پر شده خواهد شد. از طرفی برای نسبت‌های کوچکتر از $1/2 = \frac{l}{b}$ حفره کاملاً پر می‌شود و شکل برداشت بی‌تاثیر است.

۴- در حالت برداشت در راستای طول کانال، با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی حفره پایین‌دست تا فاصله 16 الی 20 برابر عمق جریان کاهش یافته و پس از آن مجدداً افزایش می‌یابد و در فاصله 32 برابر عمق جریان به حجم پرشدگی حالت تک حفره خواهد رسید.

۵- در حالت برداشت در راستای عرض کانال با افزایش فاصله بین حفره‌ها حجم پرشدگی حفره

پایین دست افزایش یافته و روند صعودی دارد و حجم پرشده برای $\frac{l}{b} = 0.78$ در فاصله ۲۰

برابر عمق جریان و برای $\frac{l}{b} = 0.59$ در فاصله ۱۶ برابر عمق جریان به حجم پر شده در

حالت تک حفره می‌رسد.

۶- بین شکل برداشت و فاصله آن ارتباط خطی وجود داشته به گونه ای که با حدود دو برابر

کردن نسبت طول به عرض حفره، فاصله برداشت حفره‌ها تا دوبرابر افزایش می‌یابد.

۷- با تغییر عمق حفره با حجم ثابت اولیه، تغییری در حجم پر شده حفره بالادست و پایین‌دست

اتفاق نمی‌افتد. زیرا افزایش عمق حفره به تنهایی باعث کاهش حجم پرشده می شود و نزدیک

شدن شیب بالادست به پایین دست حفره سبب تسریع در روند پرشدگی خواهد شد. این دو

عامل به صورت همزمان اثر کرده و تاثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند و سبب می‌شوند که تغییر

همزمان عمق حفره و ابعاد کف حفره، تغییری در حجم پر شده ایجاد نکند.

۸- با کاهش عمق حفره با حجم متغیر، حجم پرشده حفره پایین‌دست در حدود ۱۵ درصد

افزایش می‌یابد. در صورتی که نسبت عمق حفره به عمق جریان برابر ۱ باشد یا به عبارت

دیگر اگر عمق برداشت برابر عمق جریان باشد کل حفره پر خواهد شد.

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی می‌توان نتیجه گرفت که

برداشت در راستای عرض کانال به مراتب بهتر از برداشت در راستای طول کانال است و هر چه نسبت

طول به عرض حفره کمتر باشد پرشدگی بهتر بوده و فاصله نقاط برداشت کاهش می‌یابد که از لحاظ

اقتصادی مقرون به صرفه است. در صورتی که برداشت در راستای طول انجام شود باید سعی شود که

برداشت بصورت سطحی و در عمق‌های کمتر صورت پذیرد زیرا هرچه عمق برداشت کمتر باشد قعر

حفره سریعاً بالا آمده و تاثیرات مخرب حفره کاهش می‌یابد. در حالت برداشت در راستای طول کانال،

اگر عمق برداشت برابر عمق جریان حفر شود پرشدگی همانند برداشت در راستای عرض کانال شده و

فواصل نقاط برداشت نیز کاهش یافته و در واقع نتایج برداشت در راستای عرض و طول کانال مشابه هم و مناسب می باشند.

۵-۳- پیشنهادها

- بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر احیای حفره ها
- بررسی آزمایشگاهی و عددی دانه بندی بستر و ضریب یکنواختی بر پرشدگی حفره های برداشت
- بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر جریان غیردائمی در مدیریت بهره برداری و برداشت مصالح
- بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر پرشدگی حفره های برداشت مصالح در خم رودخانه ها

منابع و مراجع

- [۱] نشریه شماره ۳۳۶، (۱۳۸۴)، "راهنمای برداشت مصالح رودخانه ای"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۷۵)
- [۲] نشریه شماره ۵۶۳، (۱۳۹۰)، "ضوابط زیست محیطی برداشت مصالح رودخانه‌ای"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۵۴)
- [۳] فرهاد زاده ح، (۱۳۷۹)، "جابجایی حفره ناشی از برداشت شن و ماسه در بستر از کانال" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۱۷)
- [۴] اقبال زاده ا، (۱۳۸۰)، "جابجایی حفره ناشی از برداشت ماسه در بستر کانال دارای انحنا" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۸۸)
- [۵] امینی ع، (۱۳۸۰)، "بررسی صحرایی و آزمایشگاهی نحوه جابجایی حفره برداشت مصالح" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۱۳)
- [۶] نوحه گر ا، محمودی ف، (۱۳۸۲)، "اثرات برداشت شن و ماسه بر شکل بستر و رژیم رودخانه میناب" پژوهشهای جغرافیایی، شماره ۴۵
- [۷] موذن ا، (۱۳۸۵)، "بررسی اثرات زیست محیطی برداشت بی رویه از معادن شن و ماسه بستر رودخانه ها (مطالعه موردی: رودخانه جراحی)" اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست،
- [۸] عصمت م، جوان ز، (۱۳۸۷)، "بررسی اثرات زیست محیطی برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه بر اکولوژی رودخانه (مثال موردی رودخانه نازلوجای ارومیه)" سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز،
- [۹] عسگری م، (۱۳۸۸)، "تاثیرات برداشت شن و ماسه و مصالح رودخانه ای بر روی سواحل و عرض رودخانه ها و مسیل ها و اثرات زیست محیطی آنها" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۴۲)
- [۱۰] فقیهی ع، (۱۳۸۸)، "اثرات برداشت شن و ماسه بر مورفولوژی و هیدرولیک رودخانه کرخه با توجه به بهره برداری از سد مخزنی کرخه" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۱۷)
- [۱۱] هدایتی پور ک، (۱۳۸۹)، "تاثیر برداشت شن و ماسه بر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS.04" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد، (۱۴۰)

[۱۲] امیری تکلدانی ا، عزیزیان ا، (۱۳۸۹)، "تعیین مکانهای مناسب جهت برداشت مصالح رودخانه ای با استفاده از مدل

عددی HEC-RAS.04 " پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

[۱۳] غفوری آذر م، داوودی م، امیری تکلدانی ا، (۱۳۹۰)، "اثرات ناشی از حفره برداشت مصالح شن و ماسه بر پروفیل

بستر رودخانه " ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

[۱۴] روشن ح، وهاب زاده ق، سلیمانی ک، خالدی ع، (۱۳۹۰)، "برآورد بار کل رسوبی و تعیین ظرفیت برداشت مصالح

بستر رودخانه زارم رود (استان مازندران)" اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های

برقابی،

[۱۵] قهرمانی ن، غفوری م، لشکری پور غ، غلامی غ، (۱۳۹۰)، "بررسی اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از برداشت

بی رویه مصالح رودخانه ای (شن و ماسه) در محورهای اصلی برداشت شهر مشهد" فصلنامه زمین شناسی کاربردی،

سال ۷، شماره ۱

[۱۶] اسدی ز، (۱۳۹۰)، "برآورد رسوب و تعیین ظرفیت برداشت شن و ماسه رودخانه لار با استفاده از مدل ریاضی"

پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (۱۱۷)

[۱۷] شایان س، شریفی نیا م، دهستانی ه، (۱۳۹۲)، "استخراج و اندازه گیری تغییرات مورفولوژیکی رودخانه کشکان

ناشی از برداشت منابع شن و ماسه" فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، شماره ۴۳

[۱۸] خیرفام ح، صادقی ح، (۱۳۹۳)، "تاثیر برداشت شن و ماسه بر میزان بار رسوبی و دانه بندی بار بستر در رودخانه

کجور" نشریه علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۶

[۱۹] سلیمانی ن، (۱۳۹۶)، "مدل سازی انتقال رسوب در محل برخورد دو رودخانه" پایان نامه کارشناسی ارشد،

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود،

[۲۰] حسینی م، ابریشمی ج، (۱۳۸۶)، "هیدرولیک کانال های باز" چاپ هفدهم، انتشارات آستان قدس رضوی،

(۶۱۶)

[۲۱] واقفی م، قدسیان م، ادیب آ، (۱۳۸۹)، "نگرشی بر خطاهای موجود در برداشت داده های آزمایشگاهی" نهمین

کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس

[22] Kondolf, G. M. (1997). PROFILE: hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. Environmental management, 21(4), 533-551.

[23] Lee, H.Y., Fu, D.T., Song, M.H. (1993) Migration of Rectangular mining pit composed of uniform sediment, Journal of Hydraulic Engineering 119 (1), 64-80

- [24] Decker, C., Keyes, J., Jackson, C. R., Shelton, J., & Jackson, B. (1999). Effects of Sand Dredging on Channel Morphology, Proceedings of the 1999 Georgia Water Resources Conference.
- [25] Ramon, J. B. (2003). Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. Are view with examples from NE Spain. Cuaternario y Geomorfología, 2003, núm. 17, p. 79-91.
- [26] Boudaghpour, S., & Hashemi Monfared, S.A. (2008). Environmental Effects of Irregular Extracting of Gravel from River Beds Wseas Transaction on Enviroment and Development, 4 (5),430-435
- [27] Erskine, W.D., Geary, P.M., Outhet, D.N. (1985). Potential impacts of sand and gravel extraction on the Hunter River, New South Wales. , Australian Geographical studies. 23(1):71-86.
- [28] Padmalal, D., Maya, K., Sreebha, S., Sreeja, R. (2008). Environmental effects of river sand mining: a case from the river catchments of Vembanad lake, Southwest coast of India. Enviromental Geology, 54(4), 879-889.
- [29] 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
- [30] Ashraf, M.A., Jamil Maah, M., Yusoff, I., Wajid, A., Mahmood, K. (2011). Sand Mining Effects, Causes And Concerns: A Casestudy From Bestari Jaya, Selangor, Peninsular Malaysia, SRE 6 (6),1216-1231.
- [31] Li, J., Qi, M., Jin, Y. (2013). Experimental and Numerical Investigation of Riverbed Evolution in Post-Damaged Conditions, Proceeding of 2013 IAHR World Congress,China
- [32] Madyise, T. (2013).Case study og enviromental impacts of sand mining and gravel extraction for urban development in Gaborone, M.Sc thesis, University of South Africa.
- [33] Mattamana, B. A., Varghese, S., & Paul, K. (2013). River sand inflow assessment and optimal sand mining policy development. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 3.
- [34] Ako, T.A., Onoduku, U.S., Oke, S.A., Essien, B., Idris, F.N., Umar, A.N., Ahmed, A.A. (2014). Environmental Effects of Sand and Gravel Mining on Land and Soil in

Luku, Minna, Niger State, North Central Nigeria. *Journal of Geosciences and Geomatics* 2(2), 42-49

[35] Bayram, A., & Önsoy, H. (2015). Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey). *Environmental earth sciences*, 73(5), 1997-2011

[36] Lu, J., Liu, C. J., Guan, J. Z., Liu, L., & Liu, H. F. (2015). Sand and Gravel Mining in the Upstream of the Yangtze River and Its Effects on the Three Gorges Reservoir. In *World Environmental and Water Resources Congress 2015*, Austin, Texas (pp. 1821-1830).

[37] Calle, M., Alho, P., Benito, g.(2017).Channel Dynamics and Geomorphic Resilience in an Ephemeral Mediterranean River Affected by Gravel Mining, *Geomorphology* 285, 333-346.

[38] Zhang, Y. (2005). CCHE2D-GUI–graphical user interface for the CCHE2D model user’s manual–version 2.2. Mississippi, US: National Center for Computational Hydroscience and Engineering.

ABSTRACT:

In the present study, using experimental and numerical method, the management and harvesting of river-bed materials have been investigated with regard to the river flow for better recovery of pits. In this regard, the variables of the shape of extraction, the distance between the pits, the distance between the pits from the wall and the depth of extraction were evaluated. The experimental channel used in this study was straight, with a rectangular section, 14 m long, 1.5 m wide and 0.5 m deep, and materials with a mean diameter of 1 mm were used. CCHE2D software was also used for numerical modeling. The results of experimental study and numerical modeling show that the moving of the downstream pits does not affect the volume of the filled upstream pits, but the extraction near of the channel wall leads to a 25% reduction in the volume of the upstream pit filled up compared to the extraction at the center of the channel. Which is independent of the shape of the extraction. In terms of extraction along the length of the channel, with increasing the distance between the pits, the filling volume of the downstream pits is reduced, which is independent of the pit distance to the wall, but under extraction conditions along the channel width and in the center of the channel, by increasing the distance between the pits, The volume of the filled downstream pit increases and will decrease in the near-wall extraction. By increasing the length to width ratio of the pits, the fill and migration of the pits are reduced to the downstream side and the maximum depth of the pits increases. The doubling of the length to pits width will reduce about 30% of the filled volume. On the other hand, for pits length- width ratios of less than 1.2, the pit is completely filled and the shape of the extraction is not affected. By changing the depth of the pits with a fixed initial volume, a change in the filled volume of upstream and downstream pits does not occur, but by decreasing the depth of the pits with variable volume, the infilling volume of the pits increases up to 15%. According to the results of the experimental study and numerical modeling, it can be concluded that the extraction along the channel width is far better than extraction along the length of the channel, and the lower the ratio of the length to the width of the pits, the better filling and the distance of the extraction points Which is economically feasible. If extraction is done in the longitudinal direction, it should be done to make the extraction in the surface layers of the bed.

Keyword: Mining pit, Infilling, Extraction Management, River Bed Materials



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

PhD Dissertation in Water Engineering and Hydraulic Structures

**Management of Utilization and river material extraction due
to the river sediment with Laboratory and numerical method**

By: Hamed Haghazari

Supervisors:

Dr Ramin Amini

Dr Mojtaba Saneie

January 2018