

به نام خدایی که در این مرد است



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

## مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه دهانه ورودی بر عملکرد تونل‌های انتقال رسوب

نگارنده: پژمان امینیان

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

دکتر صمد امامقلی زاده

آذرماه ۱۳۹۸



شماره:  
تاریخ:  
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 پژمان امینیان دانشجوی دکتری رشته عمران- سازه های هیدرولیکی به شماره دانشجویی ۹۲۱۲۸۵ و ورودی مهرماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۹۸/۹/۶ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه دهانه ورودی بر عملکرد تونل های انتقال رسوب دفاع و با اخذ نمره ..... به درجه : عالی ..... نائل گردید.

|  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰    | <input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ |
| <input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵  | <input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد     |
| <input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد |  |

| ردیف | هیئت داوران            | نام و نام خانوادگی                              | مرتبه علمی | امضاء |
|------|------------------------|---|------------|-------|
| ۱    | دکتر احمد احمدی        | اساتید راهنما                                   | دانشیار    |       |
| ۲    | دکتر صمد امامقلی زاده  | استاد مشاور                                     | دانشیار    |       |
| ۳    | دکتر فضل الله ساغروانی | استاد مدعو داخلی                                | دانشیار    |       |
| ۴    | دکتر امیر عباس عابدینی | استاد مدعو داخلی                                | دانشیار    |       |
| ۵    | دکتر مهدی مفتاح هلفی   | استاد مدعو خارجی                                | دانشیار    |       |
| ۶    | دکتر مهدی عجمی         | سرپرست ( نماینده )<br>تحصیلات تکمیلی<br>دانشکده | استادیار   |       |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای پژمان امینیان بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به مهربانترین همراه زندگیم،

پدر،

که حضورش همیشه کرمابخش روح من بوده است،

و تقدیم می‌کنم به روح مادر بزرگ عزیزم،

که عاشقانه سوخت تا کرمابخش وجودم و روشنگر راهم باشد.

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهبانی اساتید بزرگ موفق به پیمان این رساله شده‌ام و غنیمت خود دانسته که نهایت پاسکولاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند  
رابطه عمل آورم:

در آغاز از استاد بزرگ و دانشمند جناب آقای دکتر احمد احمدی که راهبانی این پیمان نامه را به همه داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر صدر امامعلی زاده که استاد مشاور این پیمان نامه بوده‌اند نیز قدردانی می‌نمایم.

از داوران گرامی جناب آقای دکتر مهدی محتاج حلقی و جناب آقای دکتر فضل الله ساغروانی و جناب آقای دکتر امیر عباس حلبینی که زحمت داوری و تصحیح این

پیمان نامه را به همه داشتند کمال سپاس را دارم.

خالصانه از تمامی اساتید و محققان و مدرسانی که در مقطع مختلف تحصیلی به من علم آموختند و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده‌اند؛ تشکر می‌کنم.

در پیمان از کلیه هم‌دانشگاهیان و هم‌راهنان عزیزم، خصوصاً جناب آقای دکتر حامد حق نظر و دوست خوبم جناب آقای مهندس رضا حجی نهایت سپاس را دارم.

## تعمیر نامه

اینجانب پژمان امینیان دانشجوی دوره دکتری رشته عمران - سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه دهانه ورودی بر عملکرد تونل‌های انتقال رسوب تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 ۹۸/۹/۶

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .  
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

در چند دهه اخیر، هرچند سدسازی از نظر کمی و تعدد روند افزایشی داشته است، ولی متأسفانه اکثر این سدها در دوره بهره‌برداری با مشکل رسوب‌گذاری مواجه می‌باشند. به‌عنوان یک راه علمی می‌توان جهت رفع این مسئله به ساخت تونل‌های انتقال رسوب اشاره کرد. آن‌ها کانال‌های انحرافی هستند که جریان حاوی رسوبات را از بالادست مخزن سد به پایین‌دست آن منتقل می‌نمایند. در تحقیق حاضر توسط مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر عرض کانال انحرافی بر میزان دبی منحرف‌شده و رسوب انحرافی به کانال فرعی پرداخته شد. همچنین با اعمال صفحات مستغرق در ورودی کانال فرعی ۹۰ درجه انتقال رسوب، اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان و تغییرات زاویه صفحات بر میزان انتقال رسوب و جریان انحرافی بررسی شده و با حالت بدون استفاده از صفحات مستغرق مقایسه شد. آزمایش‌ها بر روی یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض کانال اصلی ۶۰ سانتی‌متر و عرض کانال فرعی ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر انجام شد. در این راستا در سه عرض مختلف کانال انحرافی و در سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، متغیرهای عدد فرود جریان و عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت. سپس تعداد ۱۸ آزمایش با مدل عددی SSIM2 شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت سنجی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد افزایش عدد فرود از مقدار ۰/۶۵ به ۰/۹۸ به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی منحرف‌شده و کاهش ۴۴ درصدی رسوب منحرف‌شده به کانال فرعی می‌شود، همچنین با افزایش ۱/۵ برابری عرض نسبی کانال انحرافی تأثیر تغییرات عمق جریان بر عملکرد به شدت کاهش می‌یابد ولی در نسبت عرضهای کمتر، حساسیت عملکرد تونلهای انحرافی نسبت به عمق جریان بسیار چشمگیر است بطوریکه با افزایش ۱/۵ برابری عرض نسبی کانال انحرافی از مقدار ۰/۳۳ به ۰/۵، ضریب عملکرد آن ۳۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ۲ برابری زاویه صفحات مستغرق از ۳۰ به ۶۰ درجه، میزان دبی منحرف‌شده، در عمق نسبی ۰/۰۸ حدود ۶ درصد و برای اعماق نسبی بالاتر (۰/۱۲ و ۰/۱۶) به حدود ۳ و ۱ درصد، کاهش می‌یابد بطوریکه در زوایای کمتر، حساسیت عملکرد تونلهای انحرافی نسبت به تغییر عمق جریان قابل چشم‌پوشی و در زاویه ۳۰ درجه

به ۱ درصد میرسد ولی با افزایش زاویه صفحات مستغرق به ۴۵ و ۶۰ درجه ، ضریب عملکرد تونلهای انتقال به ترتیب ۱۰ و ۲۴ درصد افزایش می یابد، بنابراین نشان داده شد با کاهش عمق جریان، صفحات مستغرق با زاویه ۶۰ درجه می توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نموده و بالاترین عملکرد را داشته باشند. بر اساس اندازه گیری های انجام شده بهترین رابطه توسط الگوریتم ژنتیک جهت محاسبه دبی رسوب منحرف شده پیشنهاد شده است. همچنین با مقایسه نتایج شبیه سازی شده مدل عددی SSIM2 نشان داده شد که درصد خطای مدل عددی حدود ۱۸ درصد و میانگین ضریب نش برای داده های آزمایشگاهی و عددی حدود ۰/۸۷ برآورد گردید که با توجه به این مقدار می توان به عملکرد صحیح مدل پی برد.

**کلید واژه:** تونلهای انتقال رسوب، صفحات مستغرق، مدیریت رسوب، دبی انحرافی، جریان ثانویه



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Aminian, P. & Ahmadi, A., & Emamgholizadeh, S. (2019). Experimental Investigation on the Deviated Sediment and Flow to Sediment Bypass Tunnels (SBTs) Using Submerged Plates. *Journal of Hydraulic Structures*, 5(2), 18-31.

۲- امینیان، پژمان؛ احمدی، احمد و امامقلی زاده، صمد؛ (۲۰۱۹). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عوامل هیدرولیکی و هندسی تونل انتقال رسوب بر جریان و رسوب انتقال یافته. تحقیقات آب و خاک ایران، (۲) ۵۰، ۵۱۴-۵۰۵

3- Aminian, P. & Ahmadi, A., & Emamgholizadeh, S. (2019). Experimental and numerical study of the influence of inlet geometry on the performance of the sediment bypass tunnel (SBTs). *Flow Measurement and Instrumentation*, (Under Review)

۴- امینیان، پژمان؛ احمدی، احمد و امامقلی زاده، صمد؛ ۱۳۹۷، بررسی آزمایشگاهی تاثیر عرض کانال انحرافی ۹۰ درجه بر انتقال جریان و رسوب، هفدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد

۵- امینیان، پژمان؛ احمدی، احمد و امامقلی زاده، صمد؛ ۱۳۹۷، تاثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر میزان رسوب انتقال یافته به تونل های انتقال رسوب، یازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

## فهرست مطالب

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| فصل ۱-۱     | مقدمه و کلیات.....  | ۱  |
| ۱-۱-۱       | مقدمه و بیان مساله.....                                     | ۲  |
| ۱-۲-۱       | ضرورت انجام تحقیق.....                                      | ۳  |
| ۱-۳-۱       | فرضیات و سوالات تحقیق.....                                  | ۵  |
| ۱-۴-۱       | نوآوری تحقیق.....   | ۶  |
| ۱-۵-۱       | اهداف تحقیق.....  | ۶  |
| ۱-۶-۱       | روش انجام تحقیق.....  | ۶  |
| ۱-۷-۱       | ساختار پایان نامه.....                                      | ۷  |
| فصل ۲-۱     | مبانی نظری و مروری بر منابع.....                            | ۹  |
| ۲-۱-۱       | مقدمه.....  | ۱۰ |
| ۲-۲-۱       | کنترل رسوب گذاری در مخزن.....                               | ۱۰ |
| ۲-۳-۱       | تونل های انتقال رسوب (SBTs).....                            | ۱۳ |
| ۲-۳-۱-۱     | فرآیند ورود جریان رسوبی به تونل انتقال رسوبات SBTs.....     | ۱۵ |
| ۲-۳-۱-۱-۱-۱ | شرایط در نقطه انحراف.....                                   | ۱۷ |
| ۲-۳-۱-۱-۱-۲ | انتخاب نقطه انحراف.....                                     | ۱۹ |
| ۲-۳-۱-۱-۲-۱ | زائیه انحراف.....   | ۲۰ |
| ۲-۳-۱-۱-۲-۲ | منحرف کننده رسوبات.....                                     | ۲۲ |
| ۲-۳-۱-۱-۲-۳ | دفع کننده تونلی رسوبات.....                                 | ۲۳ |
| ۲-۴-۱       | مروری بر تحقیقات انجام شده در کانال های آبگیر.....          | ۲۴ |
| ۲-۵-۱       | مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی تونل های انتقال رسوب..... | ۲۷ |
| فصل ۳-۱     | مواد و روشها.....   | ۳۹ |
| ۳-۱-۱       | مقدمه.....  | ۴۰ |
| ۳-۲-۱       | تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده.....                        | ۴۰ |
| ۳-۲-۱-۱     | فلوم آزمایشگاهی.....  | ۴۰ |

|    |       |                                  |       |
|----|-------|----------------------------------|-------|
| ۴۰ | ..... | کانال آزمایشگاهی مستقیم          | ۲-۲-۳ |
| ۴۱ | ..... | مخزن ورودی و خروجی               | ۳-۲-۳ |
| ۴۲ | ..... | تکیه گاه ریلی و ارابه‌های روی آن | ۴-۲-۳ |
| ۴۲ | ..... | دریچه فولادی                     | ۵-۲-۳ |
| ۴۳ | ..... | سیستم آبرسانی                    | ۶-۲-۳ |
| ۴۶ | ..... | مصالح بستر                       | ۷-۲-۳ |
| ۴۷ | ..... | عمق سنج دیجیتال                  | ۸-۲-۳ |
| ۴۸ | ..... | آنالیز ابعادی                    | ۳-۳   |
| ۵۰ | ..... | نحوه انجام آزمایش‌ها             | ۴-۳   |
| ۵۵ | ..... | خطاهای آزمایشگاهی                | ۵-۳   |
| ۵۵ | ..... | خطای سیستماتیک                   | ۱-۵-۳ |
| ۵۵ | ..... | خطای انسانی                      | ۲-۵-۳ |
| ۵۶ | ..... | مدل عددی SSIIM :                 | ۶-۳   |
| ۵۶ | ..... | روش سطح پاسخ                     | ۷-۳   |
| ۵۷ | ..... | تابع مشخصه                       | ۱-۷-۳ |
| ۵۸ | ..... | محاسبه ضرایب $B_i$               | ۲-۷-۳ |
| ۵۹ | ..... | الگوریتم ژنتیک (GA)              | ۸-۳   |
| ۵۹ | ..... | مشخص کردن محدودیتها              | ۱-۸-۳ |
| ۶۰ | ..... | مرحله اول                        | ۲-۸-۳ |
| ۶۰ | ..... | مرحله دوم                        | ۳-۸-۳ |
| ۶۲ | ..... | مرحله سوم                        | ۴-۸-۳ |
| ۶۵ | ..... | مرحله چهارم                      | ۵-۸-۳ |
| ۶۵ | ..... | مرحله پنجم                       | ۶-۸-۳ |
| ۶۷ | ..... | ماتریس هسین                      | ۹-۳   |
| ۶۹ | ..... | معیار خطای مدل                   | ۱۰-۳  |
| ۷۳ | ..... | <b>فصل چهارم: نتایج و تفسیر</b>  |       |
| ۷۲ | ..... | مقدمه                            | ۱-۴   |
| ۷۲ | ..... | تاثیر تغییرات عرض کانال انحرافی  | ۲-۴   |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| ۳-۴   | تاثیر زاویه صفحات مستغرق  | ۸۰  |
| ۴-۴   | مقایسه وجود و عدم وجود صفحات مستغرق                                   | ۸۹  |
| ۵-۴   | بهینه‌سازی پارامترهای مدل با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین | ۹۷  |
| ۴-۵-۱ | پارامترهای پیاده‌سازی   | ۹۷  |
| ۴-۶-۱ | مدل عددی SSIM 2   | ۱۰۱ |
| ۴-۶-۱ | واسنجی مدل عددی   | ۱۰۱ |
| ۴-۶-۲ | ارزیابی دقت (اعتبارسنجی نتایج) مدل عددی                               | ۱۰۲ |
| ۴-۶-۳ | آنالیز حساسیت پارامترها   | ۱۰۹ |
| ۱۱۵   | فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات  |     |
| ۱-۵   | مقدمه   | ۱۱۴ |
| ۲-۵   | جمع بندی و نتیجه گیری   | ۱۱۴ |
| ۳-۵   | پیشنهادات   | ۱۱۷ |
| ۱۲۰   | پیوست   |     |
| ۱۱۹   | پیوست الف- نتایج آزمایشگاهی   |     |
| ۱۲۳   | پیوست ب- ۱- کد الگوریتم ژنتیک   |     |
| ۱۲۳   | پیوست ب- ۲- تابع Function   |     |
| ۱۲۵   | پیوست ج- مقایسه خطاها و ضریب همبستگی در فرمولهای الگوریتم ژنتیک       |     |
| ۱۲۹   | پیوست د- مراحل شبیه سازی در مدل عددی SSIM                             |     |
| ۱۲۹   | د- ۱- شبیه سازی کانال انحرافی   |     |
| ۱۲۹   | د- ۲- تولید شبکه  |     |
| ۱۳۶   | د- ۳- تعیین مقدار دبی   |     |
| ۱۳۷   | د- ۴- تکمیل فایل control  |     |
| ۱۳۹   | د- ۵- فایل conres/con2res   |     |
| ۱۴۲   | منابع   |     |

## فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مقادیر متغیرهای عمق، دبی و عدد فرود در آزمایش‌ها ..... ۵۴
- جدول ۲-۳ یک مثال ساده از همپوشانی یک نقطه ای ..... ۶۴
- جدول ۳-۳ یک مثال ساده از همپوشانی پنج نقطه ای ..... ۶۵
- جدول ۱-۴ نتایج مدل‌سازی صورت‌گرفته با ترکیب سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین ۱۰۱
- جدول ۲-۴ نمونه‌ای از آزمایش‌هایی که در اعتبارسنجی شرکت داده‌شدند (بدون صفحات مستغرق) ۱۰۵
- جدول ۳-۴ نتایج مدل عددی SSIM عددی و آزمایشگاهی (بدون صفحات مستغرق) ..... ۱۰۶
- جدول ۴-۴ نمونه‌ای از آزمایش‌هایی که در اعتبارسنجی شرکت داده‌شدند (با صفحات مستغرق) .. ۱۰۷
- جدول ۵-۴ نتایج مدل عددی SSIM و آزمایشگاهی (با صفحات مستغرق) ..... ۱۰۸
- جدول ۶-۴ نتایج مدل عددی SSIM برای مقادیر آزمایش نشده ..... ۱۰۹

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- توسعه حجم رسوب مخزن در سد Asahi ژاپن، قبل و بعد از راه اندازی یک SBT در سال ۱۹۹۸ ..... ۱۴
- شکل ۲-۲- تونل انتقال رسوبات بر روی رودخانه آلبولا ..... ۱۵
- شکل ۳-۲- الگوی جریان ورودی به کانال جانبی (تونل انحرافی یا کانال آبگیر) ..... ۱۶
- شکل ۴-۲- توزیع غلظت و سرعت رسوبات معلق در رودخانه میسوری در اوماها(بوندورانت، ۱۹۵۳) ..... ۱۸
- شکل ۵-۲- نمودار شماتیک جریان در انحنای کانال ها ..... ۱۹
- شکل ۶-۲- رابطه بین تقسیم دبی بار بستر، تقسیم دبی و زاویه انشعاب به صورت آزمایشگاهی .... ۲۱
- شکل ۷-۲- دفع کننده رسوب تونلی در سالامپور در کانال آبد در هند [۳۶] ..... ۲۴
- شکل ۸-۲- نمایش مسیر رسوب سدهادر ژاپن ..... ۲۹
- شکل ۹-۲- تونل عبوری رسوب در سد Nanobiki ..... ۲۹
- شکل ۱۰-۲- تونل عبوری رسوب در سد Matsukawa، طرح و مقایسه‌ی عملکرد عبوری رسوب ... ۳۰
- شکل ۱۱-۲- برنامه‌ریزی طراحی و مدیریت ساخت تونل‌های عبوری رسوب ..... ۳۰
- شکل ۱۲-۲- مسیرهای پیشنهادی برای تونل انتقال رسوبات و مشخصات کامل گزینه (A-1) ..... ۳۶
- شکل ۱۳-۲- آنالیز حساسیت ارزش برداشت رسوبات با تغییر دبی تخلیه‌ی طراحی تونل ..... ۳۷
- شکل ۱-۳- نمایی از کانال اصلی و انحرافی ..... ۴۱
- شکل ۲-۳- تکیه‌گاه ریلی و ارابه روی آن ..... ۴۲
- شکل ۳-۳- نمایی از دریچه انتهایی کانال اصلی ..... ۴۳
- شکل ۴-۳- فلومتر آلتراسونیک مذکور به همراه اتصال نوع V سنسورها ..... ۴۴
- شکل ۵-۳- سرریز مثلثی نصب شده به منظور اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از کانال فرعی ..... ۴۵
- شکل ۶-۳- منحنی دانه‌بندی آزمایش ها ..... ۴۷
- شکل ۷-۳- نمایی از عمق سنج دیجیتال ..... ۴۸
- شکل ۸-۳- شمای یک سرریز لبه تیز مثلثی و مقادیر  $K_H$  برحسب زاویه  $\theta$  ..... ۵۱
- شکل ۹-۳- مقادیر  $C_{de}$  برحسب زاویه  $\theta$  ..... ۵۱
- شکل ۱۰-۳- شسته شدن رسوبات در کانال اصلی ..... ۵۳

- شکل ۳-۱۱- ابعاد صفحات مستغرق در کانال اصلی ..... ۵۳
- شکل ۴-۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  .... ۷۶
- شکل ۴-۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  .... ۷۶
- شکل ۴-۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,08$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,12$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,16$  ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۰- تغییرات پارامتر عملکرد بر حسب عمق جریان برای عرض‌های مختلف کانال انحرافی . ۷۹
- شکل ۴-۱۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  ... ۸۴
- شکل ۴-۱۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  ... ۸۴
- شکل ۴-۱۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ... ۸۵
- شکل ۴-۱۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,08$  ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $y/B=0,12$  ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $y/B=0,16$  ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۰- تغییرات پارامتر عملکرد بر حسب عمق جریان برای زوایای مختلف صفحات مستغرق .. ۸۸

- شکل ۴-۲۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,08$  ... ۹۲
- شکل ۴-۲۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,12$  ... ۹۳
- شکل ۴-۲۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $yB = 0,16$  ... ۹۳
- شکل ۴-۲۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,08$  ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,12$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $yB = 0,16$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۳۰- تغییرات پارامتر عملکرد برحسب عمق جریان برای حالات وجود و عدم وجود صفحات مستغرق ..... ۹۶
- شکل ۴-۳۱- تغییرات تابع هزینه و همگرایی الگوریتم ژنتیک برای اجرای کمینه کردن میانگین مربعات خطا ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۲- تغییرات تابع هزینه و همگرایی الگوریتم ژنتیک برای اجرای بیشینه کردن ضریب همبستگی ..... ۹۹
- شکل ۴-۳۳- مقایسه خطای روشهای مختلف در دو دسته آموزش و آزمایش ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۴- مقایسه نتایج رسوب منحرف شده (آزمایشگاهی و مدل عددی SSIIM2) ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۵- مقایسه نتایج رسوب منحرف شده (آزمایشگاهی و مدل عددی SSIIM2) ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۶- مقایسه نتایج دبی منحرف شده نسبت رسوب منحرف شده ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۷- مقایسه نتایج عدد فرود نسبت رسوب منحرف شده ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۸- آنالیز حساسیت پارامتر دبی منحرف شده نسبت به رسوب منحرف شده ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۹- آنالیز حساسیت عدد فرود نسبت به رسوب منحرف شده ..... ۱۱۰



شکل ۴-۴۰- آنالیز حساسیت عرض نسبی نسبت به رسوب منحرف شده..... ۱۱۰

شکل ۴-۴۱- مقایسه نتایج عمق نسبی نسبت رسوب منحرف شده ..... ۱۱۱

شکل ۴-۴۲- آنالیز حساسیت زاویه صفحات مستغرق (بر حسب رادیان) نسبت به رسوب منحرف

شده..... ۱۱۱

فصل اول:

کلیات

## ۱-۱- مقدمه و بیان مساله

ایجاد سدهای مخزنی جدید و توسعه مخازن سدهای در دست بهره‌برداری در دنیا در سده گذشته توجه جدی به مدیریت رسوب و دیگر مسائل مربوط به آن را به صورت یک ضرورت اساسی مطرح کرده است. در سرزمین ایران نیز احداث سدهای جدید همچنان در کانون توجه قرار داشته و بسیاری از سدهای موجود نسبتاً جوان هستند. مجموع ذخیره مخازن در سطح دنیا در حدود ۷۰۰۰ میلیارد متر مکعب می‌باشد. برآوردها نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا به علت رسوبگذاری از دست می‌رود. این میزان در بعضی از کشورها بیش از ۱٪ است. میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز در ایران به دلایل مختلفی زیاد بوده و این نکته اهمیت پرداختن به مسائل رسوب در مخازن سدها را دوچندان می‌کند. در ایران نرخ رسوبگذاری در مخازن سدها در حدود ۰/۷۵ درصد تخمین زده می‌شود که معادل ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. [1] یکی از اثرات مهم پس از ساخت سدها مسئله رسوبگذاری در آنها می‌باشد که بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره‌شده در دریاچه سد را با مشکل مواجه می‌سازد. از این رو شناخت مسئله رسوبگذاری در سدها و چگونگی مقابله با آن بسیار با اهمیت است. در رابطه با رسوب مخزن سد، مسائل مختلفی از قبیل حجم مفید مخزن، محل رسوبگذاری، بالا آمدن سطح آب، جریان‌های غلیظ، گل‌آلودگی و کدورت آب، اثر رسوبات بر کیفیت آب، فرسایش سواحل کناره مخزن، تأثیر بر موقعیت کانال‌ها، تأثیر بر پایین‌دست، آبشستگی موضعی پای سد، سرریزها و تأثیر بر نیروگاه نیاز به توجه دارند. رسوبات حمل شده توسط جریان و ته‌نشین شدن آنها در مخزن سد سبب بروز مشکلاتی می‌شود که عمدتاً در زمینه کم‌شدن ظرفیت ذخیره مخزن، کنترل سیلاب در بخش بالادست مخزن و تحت تأثیر قرارداد عملکرد سامانه‌های خروجی سد می‌باشد. برای بررسی روند کاهش حجم مفید مخزن، ممکن است نیازی به مطالعه جزئیات مربوط به محل نشست رسوب نباشد. اما در بسیاری از موارد تأثیر محل نشست رسوبات بر منحنی حجم-سطح مخزن یا رابطه‌ی تراز آب با حجم آن قابل نظر نیست. زیرا معمولاً رسوبگذاری در حجم مفید مخزن پیش از پر

شدن حجم غیر فعال آن آغاز می‌شود. محل نشست رسوبات وارد شونده به مخزن از جنبه‌های دیگری نیز می‌تواند باعث بروز اشکال شود. مثلاً نشست رسوب در محل دریچه‌های آبیگری می‌تواند باعث اختلال در عملکرد آنها گردد. در مواردی می‌توان با روش‌های جدید انحراف رسوبات، زمان رسیدن رسوبات به دریچه‌های آبیگری را سال‌ها به تأخیر انداخت. با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی می‌توان چنین فرآیندهایی را با دقت پیش بینی کرد و روش‌های مدیریت مخزن را بهینه کرده و بازدهی عملیات رسوب‌زدایی را افزایش داد.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

در چند دهه اخیر، هر چند سد سازی از نظر کمی و تعدد روند افزایشی داشته است، ولی متأسفانه اکثر این سدها در دوره بهره‌برداری با مشکل رسوب‌گذاری مواجه می‌باشند. این مشکل به ویژه در مناطق استوایی و نیمه خشک به علت بالا بودن دبی جریان رسوب مشهودتر به نظر می‌رسد. [۲] به علت ورود رسوبات و تجمع آن در داخل مخزن سد، ظرفیت ذخیره موثر آب کاهش می‌یابد. این امر به نوبه خود باعث کاهش انرژی برق آبی، کاهش اراضی تحت پوشش آبیاری و از دست رفتن ظرفیت تعدیل طغیان خواهد شد. اگر رسوبات به بدنه سد برسند، امکان تجمع رسوب در خروجی‌ها و بلوکه کردن دریچه‌های آبیگر نیروگاه و خروجی‌های عمقی را سبب می‌شوند. به علاوه رسوباتی که به خروجی‌های مربوط به تاسیسات نیروگاه برق آبی می‌رسند می‌توانند توربین‌ها و حفاظ دریچه‌های تحتانی مخازن را دچار فرسایش و خوردگی نمایند. همچنین بار وارده به بدنه سد نیز افزایش خواهد یافت. ده‌ها سد مخزنی در ایران در حال بهره‌برداری بوده و موارد دیگری در حال طراحی یا ساخت می‌باشند. از این میان می‌توان سدهای در حال بهره‌برداری که با مشکل تجمع رسوب مواجه می‌باشند که برای مثال می‌توان به سد مخزنی دز [۳] و سد سفید رود [۴] اشاره نمود. این در حالی است که هنوز بسیاری از سدهای مخزنی کشور جوان هستند و انتظار می‌رود که با گذشت زمان اهمیت مشکل رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کشور بیشتر شده و نیاز به مقابله با آن محسوس‌تر گردد. یکی از راه‌حل‌های شناخته شده بین المللی

برای کاهش راندمان تله‌اندازی رسوب در مخزن، پایین‌آوردن تراز آب مخزن در هنگام سیلاب و مانور دریچه‌های عمقی می‌باشد. [۵] این روش می‌تواند باعث خروج قسمت قابل توجهی از رسوبات ورودی به صورت جریان غلیظ از دریچه‌های عمقی گردد. از سوی دیگر اگر عملیات مانور دریچه‌ها به درستی انجام نشود باعث افزایش بیشتر مشکلات رسوبی مخزن خواهد گردید. اگر در طول فصل طغیان و سیلاب، سطح آب مخزن بالا نگاه داشته شود، به دلیل کاهش سرعت جریان ورودی به مخزن، رسوبات وارده در نواحی بالادست مخزن ته‌نشین می‌شوند، در این حال رسوبات از سد و تأسیسات تخلیه دور خواهند ماند، اما رسوب‌گذاری در حجم مفید مخزن انجام می‌گیرد. از سوی دیگر اگر سطح آب مخزن قبل از فصل طغیان پایین آورده شود، جریان‌های وارده در فصل سیلابی موجب شسته‌شدن رسوبات و انتقال آنها به سمت بدنه سد می‌شود. اگر این روند باعث شود که رسوبات در منطقه حجم مرده مخزن ته‌نشین شوند، روند مفیدی خواهد بود، چرا که امکان بازدهی بیشتر حجم مفید مخزن فراهم می‌شود. در مواردی می‌توان با بازکردن کنترل شده‌ی دریچه‌های تخلیه‌ی عمقی، میدان جریان را به گونه‌ای سامان داد که هرچه بیشتر به تخلیه‌ی جریان‌های غلیظ کمک کند و حتی می‌توان به ایجاد جریان غلیظ کمک کرده و با استفاده از این فرآیند رسوبات را به صورت جریان‌های غلیظ از دریچه‌ها خارج کرد. اما بروز اشتباه در این عملیات می‌تواند با انتقال رسوبات به نزدیک دریچه‌ها و عدم خروج آنها مخاطراتی را برای تخلیه‌کننده‌های تحتانی بوجود آورد و یا غلظت بیش از حد جریان رسوبی از نظر عملکرد تونل تخلیه و یا استانداردهای زیست‌محیطی پایین دست مشکل‌ساز گردد که در چنین شرایطی مطالعات روش‌های دیگر ضروری به نظر می‌رسد. از این رو به عنوان یک راه علمی می‌توان به ساخت تونل‌های بای‌پس رسوب (Sediment Bypass Tunnels) یا همان SBTs که در چند سال اخیر در کشورهای ژاپن و سوییس مورد استفاده قرار گرفته‌اند اشاره کرد [۶ و ۵]

اگرچه با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته، هنوز جواب خوبی برای نیازهای خاص این روش و قوانین و دستورالعمل‌های طراحی و عملیاتی بدست نیامده است [۷]. بهینه‌سازی روش‌های موجود برای انتقال هرچه بهتر بار رسوب در زمان سیل‌های طبیعی از بالا دست مخزن به پایین دست سدها، کمک شایانی

به حفظ حجم مفید مخزن در دراز مدت و افزایش بهره‌وری تولید برق آبی می‌نماید که با مدیریت صحیح در این روش، می‌توان رسوبات را در مسافتی ایمن و دور از آبگیرهای نیروگاه و در مسیر پایین دست رودخانه ساماندهی کرد. سنجش امکان‌پذیری و تنظیم جزئیات این‌گونه مدیریت در یک مخزن خاص با استفاده از روش آزمایشگاهی قابل انجام می‌باشد.

### ۱-۳- فرضیات و سوالات تحقیق

فرضیات تحقیق عبارتند از:

- ۱- جریان در کانال بالادست دائمی، زیر بحرانی، یکنواخت و آشفته می‌باشد.
- ۲- کانال آزمایشگاهی دارای مقطع مستطیلی بوده و جداره‌ها فرسایش پذیر نمی‌باشند.
- ۳- دانه بندی مصالح استفاده شده در بستر کانال یکنواخت می‌باشد.
- ۴- جریان در دهانه ورودی تونل انحرافی بصورت آزاد و در انتهای آن به صورت ریزشی و آزاد فرض می‌گردد.
- ۵- به دلیل کوتاه بودن تونل فرضی از تغییرات جریان در بخش اصلی تونل عبوری صرفنظر می‌شود.

سوالات تحقیق عبارتند از:

- ۱- عرض تونل انتقال رسوب چه تاثیری بر انحراف جریان و رسوب دارد؟
- ۲- تغییرات انحراف جریان و رسوب با تغییر عدد فرود جریان و عمق جریان در کانال اصلی چگونه است؟
- ۳- وجود صفحات مستغرق با زوایای مختلف چه تاثیری بر مقدار انحراف جریان و رسوب خواهد داشت؟

## ۴-۱- نوآوری تحقیق

اکثر مطالعات مربوط به تونل انتقال رسوب به صورت میدانی یا موردی بوده و در ارتباط با کانال‌های آبگیر و نیز اکثر تحقیقات بر روی الگوی جریان در کانال‌های انحرافی و بهینه‌سازی زاویه کانال فرعی و استفاده از سازه‌های کنترل رسوب جهت کاهش نرخ رسوب ورودی به کانال فرعی متمرکز بوده است؛ بنابراین جهت اینکه در جریان انحرافی رسوب بیشتری منتقل شود نیاز به مطالعه آزمایشگاهی جدیدی داشته تا تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن دیده شود. لذا در این تحقیق سعی بر آن شده است تأثیر عوامل هیدرولیکی و هندسی تونل انتقال رسوب بر جریان و رسوب انتقال یافته بررسی گردد و گزینه‌های مناسب جهت انتقال و انحراف بیشترین رسوب به همراه کمترین مقدار جریان خروجی پیشنهاد گردد که تاکنون از این منظر پژوهشی صورت نگرفته است.

## ۵-۱- اهداف تحقیق

اهم اهداف قابل دستیابی در این پژوهش عبارتند از:

- بررسی تأثیر عرض تونل انتقال رسوب بر مقدار رسوب و جریان انتقال یافته
- بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در کانال اصلی بر میزان انحراف جریان و رسوب
- بررسی تأثیر بکارگیری صفحات مستغرق با زوایای مختلف بر مقدار انحراف جریان و رسوب
- پیشنهاد گزینه‌های مناسب برای بهترین عملکرد تونل انتقال

## ۶-۱- روش انجام تحقیق

تحقیق حاضر به صورت آزمایشگاهی، بر روی یک فلوم تحقیقاتی شیب پذیر انجام شده است. آزمایشها در دو قسمت بدون صفحات مستغرق و با وجود صفحات مستغرق انجام شده است. ابتدا با توجه به پارامترهای موثر بدست آمده از آنالیز دینامیکی به تأثیر و تفسیر هر کدام پرداخته شده است بطوریکه ابتدا تأثیر عرض کانال انحرافی و زاویه صفحات مستغرق در اعماق مختلف بر روی دبی انحرافی و رسوب

انحرافی و ضریب عملکرد تونل‌های انتقال رسوب پرداخته شده است و نتایج برای حالت وجود و عدم وجود صفحات مستغرق مقایسه کلی شده است سپس برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل با پیاده‌سازی روش الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین، ۴ فرمول و در نهایت فرمول بهینه با کمترین درصد خطا و بیشترین ضریب همبستگی ارائه گردیده است و در آخر نیز مدل آزمایشگاهی با مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است تا اعتبار سنجی و دقت مدل مشخص شود.

## ۱-۷- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر پنج فصل می‌باشد که عبارتند از:

### فصل اول: کلیات تحقیق:

در این فصل به بیان مسأله، ضرورت انجام تحقیق، فرضیات، سوالات تحقیق، نوآوری، اهداف و روش انجام تحقیق پرداخته شده است.

### فصل دوم: مبانی نظری و مروری بر منابع:

در این فصل ابتدا به کنترل و روشهای مدیریت رسوب در مخازن سدها پرداخته شده است، سپس به تشریح روش انتقال رسوب به کمک تونل‌های انتقال رسوب (SBTs) و فرآیند ورود رسوبات به این تونلها و در آخر مروری بر تحقیقات انجام شده در ایران و خارج از کشور انجام شده است.

### فصل سوم: مواد و روش‌ها:

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 انتهای این فصل نیز به معرفی مدل عددی SSIIM و روش الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

### فصل چهارم: نتایج و تفسیر آن‌ها:



در این فصل ابتدا با توجه به پارامترهای موثر بدست آمده از آنالیز ابعادی به تاثیر و تفسیر هرکدام از آنها پرداخته شده است، بطوریکه ابتدا تاثیر عرض کانال انحرافی و زاویه صفحات مستغرق در اعماق مختلف بر روی دبی انحرافی و رسوب انحرافی و ضریب عملکرد تونل‌های انتقال رسوب پرداخته شده است و نتایج برای حالت وجود و عدم وجود صفحات مستغرق مقایسه کلی شده است، در ادامه برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل با پیاده‌سازی روش الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین، ۴ فرمول و در نهایت فرمول بهینه با کمترین درصد خطا و بیشترین ضریب همبستگی ارائه گردیده است و در آخر نیز نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی شده مدل عددی SSIM مقایسه شده است تا اعتبارسنجی و دقت مدل مشخص شود.

#### **فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها**

در این فصل نیز نتایج بدست آمده از این تحقیق و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه خواهد شد.

## فصل دوم:

مبانی نظری

و

مروری بر منابع

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به کنترل و روش‌های مدیریت رسوب در مخازن سدها پرداخته شده است، سپس به تشریح روش انتقال رسوب به کمک تونلهای انتقال رسوب (SBTs) و فرآیند ورود رسوبات به این تونل‌ها و در آخر مروری بر تحقیقات انجام شده در ایران و خارج از کشور انجام شده است.

## ۲-۲- کنترل رسوب‌گذاری در مخزن

قبل از هر چیز باید گفت که با مطالعات دقیق آبخیزداری می‌توان به‌گونه‌ای پیشگیرانه قبل از احداث سد به مقابله با عمل رسوب‌گذاری پرداخته شود اما پس از احداث نیز می‌توان با راه‌کارهای پربازده به مقابله با این پدیده پرداخت. مدیریت رسوب مخازن را می‌توان با یک یا چند روش به طور موفقیت‌آمیزی انجام داد. این روش‌ها را می‌توان در قالب موارد زیر دسته‌بندی کرد [8]:

کاهش جریان‌های رسوبی واردشونده (نظیر مدیریت حوضه‌آبریز، سازه‌های کنترلی بالادست و انحراف جریان از مخازن)، مدیریت رسوب در مخزن (نظیر دستورالعمل‌های بهره‌برداری و روش‌های لایروبی)، تخلیه رسوبات از مخزن به منظور احیای حجم از دست رفته (نظیر تخلیه‌ی رسوبات نهشته‌شده، شستشو با جریان آب، دست‌خورده‌کردن رسوبات تحکیم‌یافته و هواده‌ی جریانات غلیظ) و بالاخره اضافه‌کردن حجم مفید برای جایگزینی حجم از دست‌رفته (نظیر افزایش ارتفاع سد و یا ساخت سد جدید).

رسوب‌گذاری در مخزن پشت سد را می‌توان تا حدودی با ایجاد دریچه‌های تخلیه تحتانی در محل‌های مناسب که بتواند آب با غلظت زیاد را خارج کند کنترل کرد. با هدایت آب گل‌آلود با غلظت زیاد (قبل از اینکه ذرات معلق ته‌نشین شوند) به دریچه‌های تخلیه می‌توان در مواقع سیلابی مقدار اضافی آب را تخلیه کرد. این روش در مناطقی که جریان پر گل و لای رودخانه پس از ورود به مخزن بصورت جریانی در بستر و زیر آب ساکن مخزن (بصورت جریان گل‌آلود) حرکت می‌کند مؤثر می‌باشد.

در اکثر مناطق خشک، مخصوصاً در ایران در زمان‌های کوتاه سیلاب‌هایی اتفاق می‌افتد که مقدار زیادی لای و رس با خود حمل می‌کنند، لذا هنگامی که این جریان‌های سیلابی به محل مخزن سد وارد می‌شوند، آب گل‌آلود (چون سنگین‌تر از آب صاف است) در ورود به مخزن به عمق فرو می‌رود و در کف در امتداد شیب مخزن بصورت لایه‌ای از جریان پر از ذرات معلق به حرکت خود ادامه می‌دهد. این جریان بنام جریان غلیظ (جریان گل‌آلود) معروف است و در مخازن دریاچه مید در آمریکا و بسیاری از مناطق دیگر و مخصوصاً در ایران در سفیدرود، لتیان، میناب، و غیره مشاهده شده و در سفیدرود تا حدودی اندازه‌گیری و مطالعه شده است [9].

در طول مسیر وقتی که مخزن گشاد می‌شود، جریان غلیظ در تمام کف پخش شده و سرعت آن بشدت کاسته می‌شود و حتی جریان تحتانی پر از ذرات (جریان گل‌آلود) نیز ممکن است طبیعت خود را بصورت جریان غلیظ از دست بدهد و قبل از رسیدن به انتهای مسیر (بعلت عمق و سرعت کم در زمان طولانی طی مسافت) اکثر ذرات آن سقوط کرده و در بالادست در مخزن رسوب می‌کنند [10].

در مخازنی که پهنای سطح مقطع آن کم و یا شیب کف زیاد است، سرعت جریان غلیظ بیشتر بوده و تا انتها با غلظت و سرعت بیشتری حرکت می‌کند. در قسمت دره‌ای بعضی مخازن (در کشورهای شوروی و آمریکا) سرعت‌های ۳ کیلومتر در ساعت اندازه‌گیری شده است. در صورتی که در همان مخازن در مقاطع پهن سرعت جریان غلیظ به حدود یک کیلومتر در ساعت یا کمتر تقلیل یافته است. در مخزن سفیدرود اندازه‌گیری‌های ابتدایی سرعت‌های ۰/۳۵ تا ۲/۲ کیلومتر در ساعت در نقاط مختلف را نشان دهد. [10].

کانالیزه کردن جریان غلیظ در قسمت عمیق مخزن، ارتفاع و در نتیجه سرعت آنرا افزایش می‌دهد و این جریان با غلظت بیشتر می‌تواند سریعتر به انتهای مخزن برسد. کانالیزه کردن را می‌توان مصنوعاً با ایجاد کانال در قسمت میانی مخزن بوجود آورد و یا می‌توان از راه اصلی رودخانه و یا قسمتی که در اثر شستشوی سیلاب در مواقع پائین بودن آب بوجود آمده استفاده کرد. وقتی جریان غلیظ از مسیر کانالیزه

به انتها می‌رسد می‌توان این جریان پر از لای و رس را از دریچه‌های تحتانی و یا بوسیله سیفون از راه‌های خروجی تخلیه کرد. لذا بدین ترتیب درصد بالائی از ذرات معلق قبل از اینکه رسوب کنند از مخزن سد خارج خواهند شد.

بعنوان مثال با کانالیزه کردن جریان غلیظ در سفیدرود عمق جریان را می‌توان حدود ۴ تا ۱۶ برابر و سرعت آنرا ۲ تا ۴ برابر کرد. در این حالت ۹۰ تا ۹۹ درصد ذرات در حالت شناور باقی مانده و قبل از اینکه رسوب کنند از دریچه‌های زیرین تخلیه خواهند شد. در صورتی‌که بدون کانالیزه کردن، عمق و سرعت جریان غلیظ بسیار کم بوده و احتمالاً بیشتر از ۵۰ درصد ذرات قبل از رسیدن به انتها رسوب خواهند کرد. با توجه به اینکه ذرات رودخانه‌های قزل اوزن و شاهرود اکثراً بسیار ریز و زیر اندازه ۱۰ میکرون هستند می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورتی‌که کانالیزه کردن جریان غلیظ و تخلیه اکثر آن در زمان‌های سیلابی شدید (که اکثر مواد رسوبی در این زمان‌ها آورده می‌شود) می‌توان بیشتر از ۵۰ درصد رسوبات سالیانه ورودی به مخزن سفیدرود را قبل از ته‌نشین شدن به پایاب منتقل کرد.[10].

عملیات شستشوی رسوب با جریان آب که به نام عملیات فلاشینگ (شاس) شناخته می‌شود، در بسیاری از موارد یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تخلیه رسوب می‌باشد. این روش بر اساس تخلیه رسوبات مخزن از طریق تخلیه‌کننده‌های تحتانی با استفاده از پایین‌آوردن سطح آب مخزن عمل می‌کند. کاهش تراز آب مخزن به مدت چند هفته تا چند ماه در فصل سیلابی نیز نوعی فلاشینگ محسوب می‌شود. این روش معمولاً در مخازن کم‌عرض بیشترین بازدهی را دارد. از مهمترین معایب آن کم‌بودن بازدهی در بسیاری از مخازن موجود، نیاز به تخلیه حجم زیادی از آب و نیاز به تخلیه مخزن برای انجام آن می‌باشد. در عین حال در بعضی از مخازن بازدهی این روش بسیار مناسب است [11]. همچنین در مواردی علیرغم بازدهی کم، تنها روش منطقی برای افزایش عمر مفید مخزن می‌باشد. عملیات فلاشینگ می‌تواند با تخلیه کامل یا تخلیه ناقص آب مخزن انجام گیرد، اما معمولاً انجام آن بدون تخلیه کامل آب مخزن، بازدهی زیادی ندارد. میزان بازدهی عملیات فلاشینگ علاوه بر مشخصات مخزن و سیلاب‌ها و

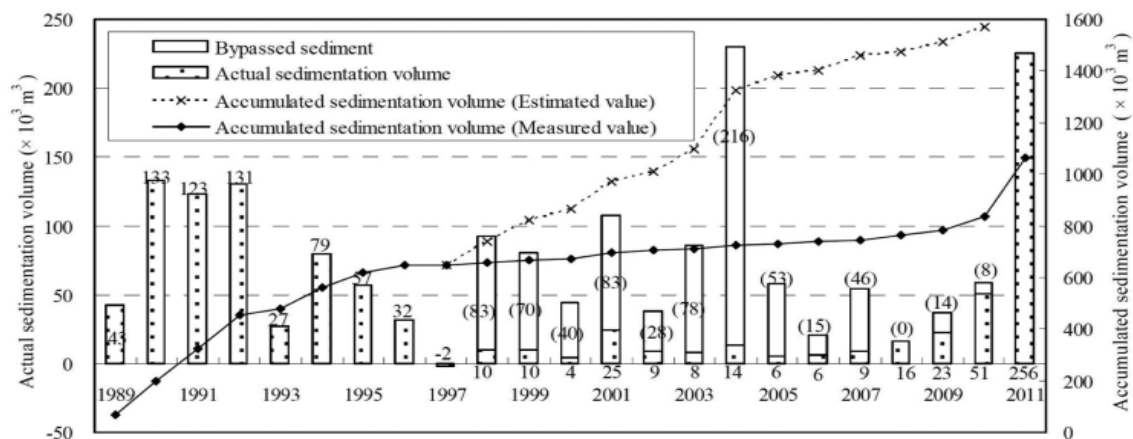
رسوبات و دریچه‌های تخلیه، به نحوه مدیریت رسوب مخزن و روند مانور دریچه‌های تحتانی نیز بستگی دارد [12].

از میان تمام روشهای مدیریت رسوب در مخازن شدف انحراف جریان از بالادست مخزن به پایین دست آن توسط تونل‌های انتقال رسوب SBTs که روش بسیار جدید، کارآمد و موثری می‌باشد موضوع این پایان‌نامه می‌باشد که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

## ۲-۳- تونل‌های انتقال رسوب (SBTs)

تونل‌های انتقال رسوب به‌عنوان یک تونل و کانال انحرافی در بالادست مخازن سدها، انتقال رسوبات رودخانه به پایین دست آن را فراهم می‌نمایند. اولین (SBTs) در اواخر قرن ۲۰ در ژاپن و سوئیس توسط ویشر (vischer) و همکاران و (سومی sumi و همکاران ۱۹۹۷) ساخته شده است و حدود یک دهه روی کاهش نرخ ساخت آن (یعنی تا سال ۲۰۱۰) کار کردند [۶]. این تونل‌ها برای جریان آزاد با سرعت حدود ۷ تا ۱۵ m/s و مقطع هیدرولیکی بین ۲۰ تا ۳۰ متر مربع و شیبی حدود ۱ تا ۴٪ و دبی حدود ۴۰ تا ۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه طراحی شده و کمتر از ۳۰ روز در سال مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. طراحی معمولاً شامل یک دریچه قطاعی به عنوان تنظیم‌کننده جریان ورودی و یک مقطع با شیب معمول می‌باشد. (SBTs)ها به دلیل افزایش نگرانی در مورد پایداری عمر مخازن و پیشرفت آن‌ها در مورد کاهش تله‌اندازی رسوب در مخازن و بهره‌وری و تضمین بهتر انتقال رسوبات به پایینی دست رودخانه محبوب‌تر می‌باشند. تله‌اندازی رسوبات به طور همزمان با کاهش مقدار رسوبات حیاتی و مورد نیاز در پایین دست سبب کاهش امنیت و تنوع زیستی می‌گردد و جای تعجب ندارد که تعداد زیادی از کشورها اقدامات و سیاست‌های مهمی را برای تقویت نظارت و کنترل رسوبات در مدیریت حوضه رودخانه‌ها اتخاذ نموده‌اند. مطابق با یافته‌های Auel & Boes 2011، یک SBT متشکل از یک ساختار هدایتی نصب‌شده در مخزن، یک مدخل آبگیری با یک دریچه، یک مقطع شتاب‌دهنده‌ی شیب تند و

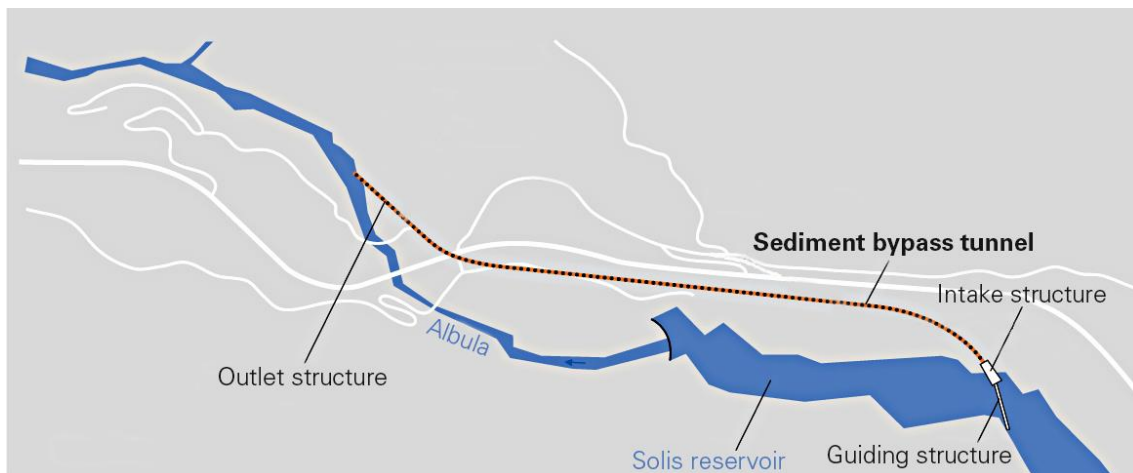
کوتاه، بخش تونل عبوری با شیب ملایم و یک ساختار خروجی می‌باشد. بسته به موقعیت مدخل آبگیر، یعنی اینکه آیا در راس و یا میانه مخزن باشد، عموماً دو نوع SBT مختلف وجود دارد. برای نوع A جریان ورودی با شرایط سطح آزاد در دلتا و نوع B که معمولاً در زیر رسوبات، به صورت تحت فشار عمل می‌کند. این تونل‌های انحرافی بایستی به اندازه کافی شیب داشته باشند تا از رسوب‌گذاری در آنها جلوگیری شود و در عین حال بایستی این شیب تا حد ممکن ملایم باشد که با محدود کردن سرعت جریان از فرسایش در آنها جلوگیری شود. [۱۳] ویژگی‌های SBT نسبت به دیگر روش‌های متقابل دارای چندین مزیت است. اول اینکه، آنها اثرات مثبتی در زمینه‌های اکولوژی دارند زیرا انتقال رسوب ممکن است میزان خوردگی در بستر رودخانه را کاهش دهد و یا حتی متوقف کند و تغییر ساختار جریان پائین‌دست از یک سد را کاهش دهد. اصولاً رسوبات جریان بالادست رودخانه در داخل SBT انتقال داده می‌شوند و حتی سبب حرکت رسوبات جمع‌شده در مخازن به سمت این تونل‌ها را فراهم می‌نماید. برای مثال، SBT نوع A از سد Asahi در کشور ژاپن (شکل ۱-۲) به طور زیادی حجم رسوبات شکل گرفته بعد از راه‌اندازی آن در سال ۱۹۹۸ را کاهش داده و حتی کمک شایانی به انحراف مسیر رسوبات در طی یک سیل بزرگ رخ داده در سال ۲۰۱۱، نموده است. [۱۴]



شکل ۱-۲- توسعه حجم رسوب مخزن در سد Asahi ژاپن، قبل و بعد از راه‌اندازی یک SBT در سال

[۱۵]۱۹۹۸

همچنین می‌توان به سالیس اشاره نمود که پیش از ساخت تونل انتقال رسوبات، حدود ۸۰,۰۰۰ متر مکعب رسوب از رودخانه آلبولا ساله وارد مخزن آن می‌شد بطوریکه بعد ۲۶ (۲۰۱۲-۱۹۸۶) سال این سد نصف حجم مخزن خود را از دست داد (شکل ۲-۲)، اما بعد از بهره‌برداری از تونل انحراف رسوب آن، روند ورود رسوبات به مخزن سد به طرز چشمگیری کاهش یافت.



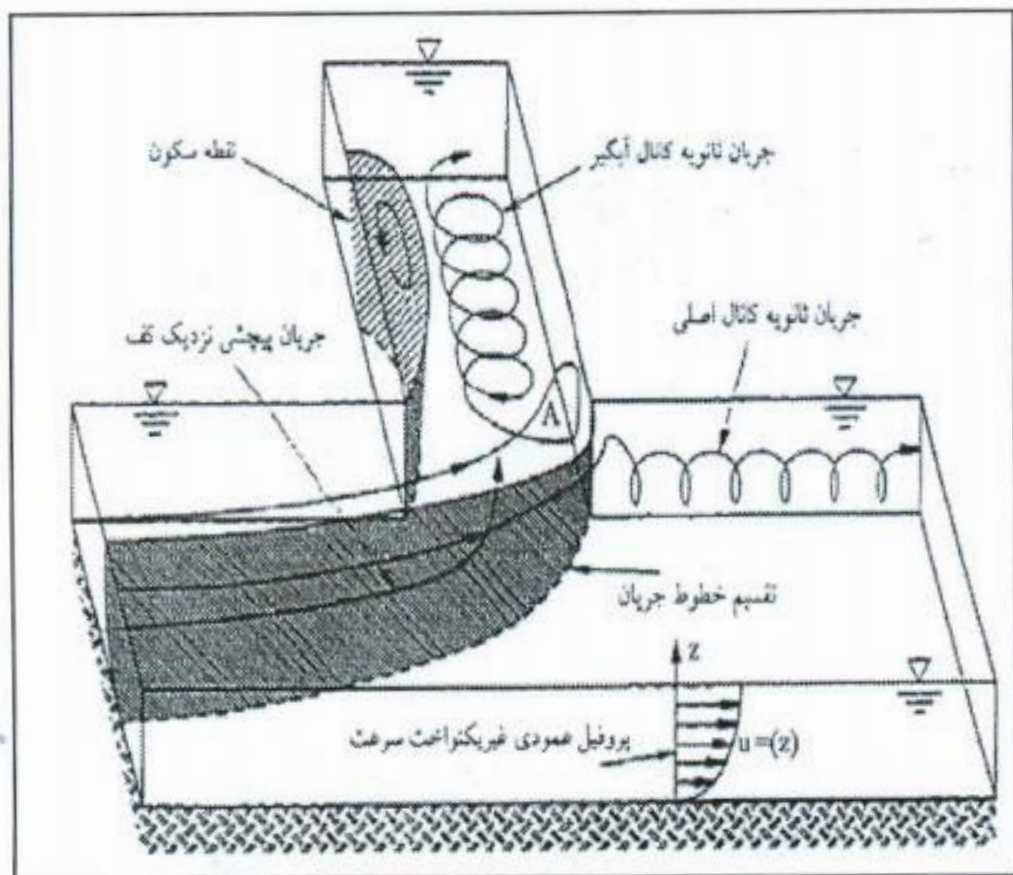
شکل ۲-۲- تونل انتقال رسوبات بر روی رودخانه آلبولا

### ۲-۳-۱- فرآیند ورود جریان رسوبی به تونل انتقال رسوبات SBTs

هنگامی که جریان آب رودخانه به محدوده تونل انتقال رسوبات SBTs می‌رسد متناسب با شدت جذب کانال، قسمتی از جریان به سمت آن منحرف می‌شود. این انحراف جریان سبب ایجاد تغییراتی در شرایط هیدرولیکی رودخانه می‌گردد. جریان سیال ورودی از کانال اصلی به داخل کانال انشعاب یک منطقه جداسازی در دیواره بالادست کانال انشعابی ایجاد می‌کند. علت تشکیل این منطقه تفاوت اندازه حرکت در کانال اصلی و کانال فرعی می‌باشد. بررسی پروفیل سرعت نشان می‌دهد که جریان ثانویه‌ای شبیه آنچه در پیچ رودخانه وجود دارد در اینجا قابل مشاهده است. جریان ثانویه در کانال انشعابی به این سبب بوجود می‌آید که جریان پر سرعت در سطح آب نسبت به جریان کم سرعت کف کانال احتیاج به نیروی بیشتری برای تغییر مسیر دارد. هر چه نسبت سرعت جریان ورودی به انشعاب به سرعت جریان در کانال اصلی افزایش پیدا کند بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده افزوده می‌گردد. لذا هر اقدامی که جهت افزایش جریان‌های گردابی و ثانویه در دهانه تونل انتقال رسوبات SBTs صورت پذیرد، افزایش



رسوبات ورودی به کانال جانبی را به همراه خواهد داشت (Neary (1992), Neary et al. (1999). [۱۶] و [۱۷]. پیچیدگی و سه بعدی بودن جریان در محدوده دهانه تونل انتقال رسوبات SBTs، پیچیدگی پدیده حمل رسوب، تأثیر افزایش رسوبات ورودی و افزایش ظرفیت حمل رسوب در کانال اصلی بر مورفولوژی بستر، سبب می‌گردد که تحقیق در این زمینه ادامه یابد. طبق مطالعات (Neary et al. (۱۹۹۹) الگوی جریان سه بعدی به کانال جانبی همانند شکل زیر می‌باشد. [۱۷]



شکل ۲-۳- الگوی جریان ورودی به کانال جانبی (تونل انحرافی یا کانال آبگیر)

وقتی جریان به کانال جانبی نزدیک می‌شود، به دلیل فشار مکشی انتهای کانال جانبی، جریان دارای شتاب عرضی شده و بخشی از جریان در کانال اصلی توسط مجرای جریان جدا و وارد کانال جانبی می‌شود و مابقی جریان به سمت پایین دست کانال اصلی ادامه مسیر می‌دهد. مقطع عرضی مجرای

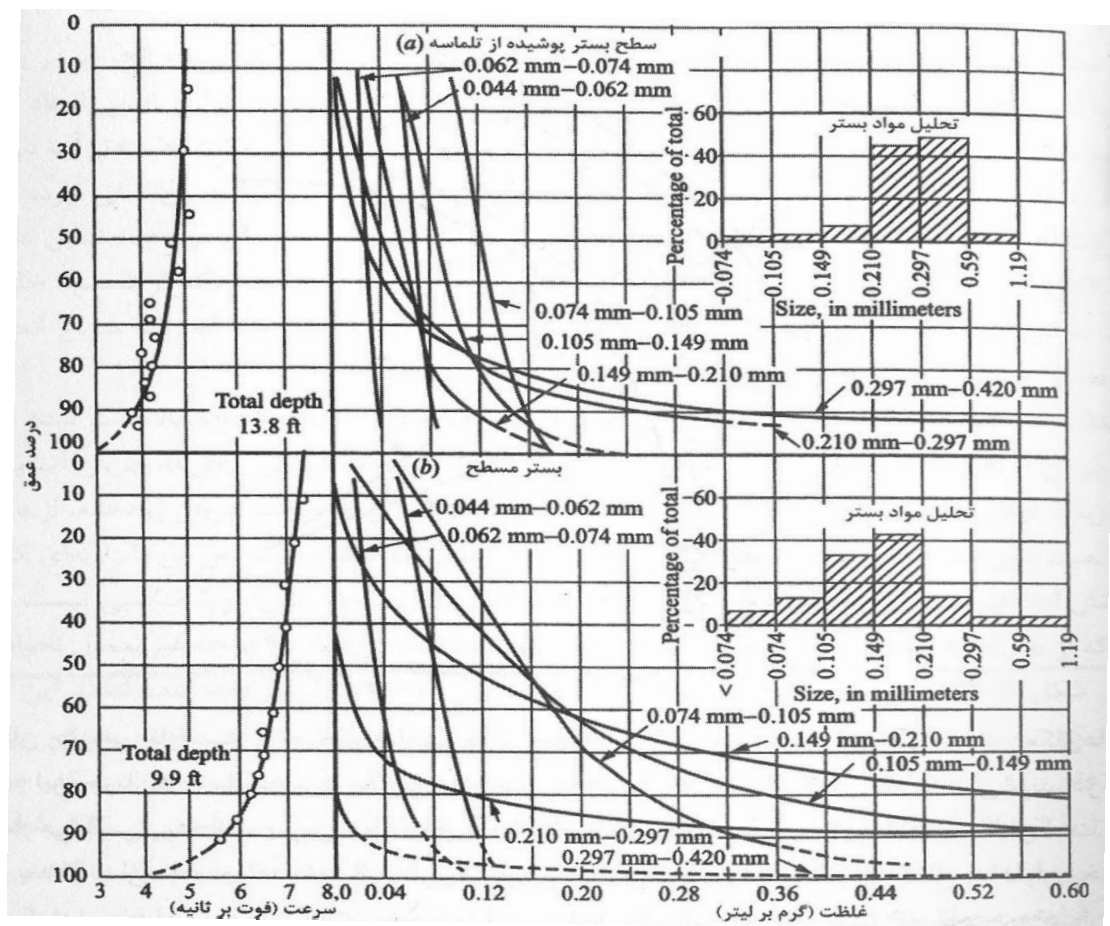
جریان، تقریباً به شکل دوزنقه با قاعده بزرگ‌تر در کف می‌باشد. الگوهای دیگری نیز در آبگیرهای جانبی تشخیص داده شده است که در این شکل نشان داده شده‌اند. گردابه‌ی حلزونی عمودی ساعتگرد در کف کانال فرعی چسبیده به دیواره‌ی آن تشکیل می‌گردد، که آن عامل اصلی انتقال بار بستر به کانال جانبی می‌باشد. گردابه‌ی افقی که در ناحیه جدا شده در طول دیواره داخلی آبگیر (ناحیه A) تشکیل و باعث تنگ شدن مقطع کانال فرعی می‌شود و از سطح مقطع موثر آبگیر می‌کاهد. این الگوی جریان به صورتی می‌باشد که باعث تجمع رسوبات ورودی به کانال جانبی شده در ناحیه A می‌گردد و از میزان دبی ورودی به آن می‌کاهد.

از آن جا که رسوب‌گذاری در محدوده گردابی در ورودی کانال جانبی انجام می‌شود و این محدوده تعیین‌کننده عرض مفید برای عبور جریان در کانال جانبی می‌باشد، از این رو شناخت ابعاد ناحیه گردابی در ورودی آبگیر جانبی، شرایط در نقطه انحراف، انتخاب نقطه انحراف، منحرف‌کننده رسوبات و خاکریزها و دیواره‌های هادی (تنظیم‌کننده) از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین منظور در این پایان‌نامه در ادامه به تفصیل به این موارد اشاره شده است.

## **۲-۳-۱-۱- شرایط در نقطه انحراف**

رسوبات انتقال‌یافته به وسیله یک رودخانه اغلب بار بستر و بار معلق هستند. بار معلق اغلب شامل ذرات ریزدانه مانند سیلت و رس است. بار بستر بیشتر شامل ذرات درست‌دانه‌ای است که در امتداد بستر به صورت جهشی حرکت می‌کنند. رسوبات معلق اغلب حاوی ذرات در محدوده اندازه از رس ریزدانه تا ماسه درشت‌دانه هستند. ماسه‌ها به‌طور معمول در اندازه‌های بزرگ و مقادیر غلظت بیشتر در نزدیک بستر رودخانه وجود دارند و این مقادیر از کف بستر تا سطح آب کاهش می‌یابد. ذرات رسوبی بسیار ریزدانه مانند سیلت و رس که مطابق با قانون استوکس ته‌نشین می‌شوند به‌طور معمول به‌طور یکنواختی در سرتاسر عمق جریان توزیع خواهند شد. ماسه ریزدانه نیز به‌طور یکنواختی در سرتاسر عمق جریان پخش می‌شود. در جریان‌های بسیار متلاطم بخش درشت‌دانه که اغلب در بستر حرکت

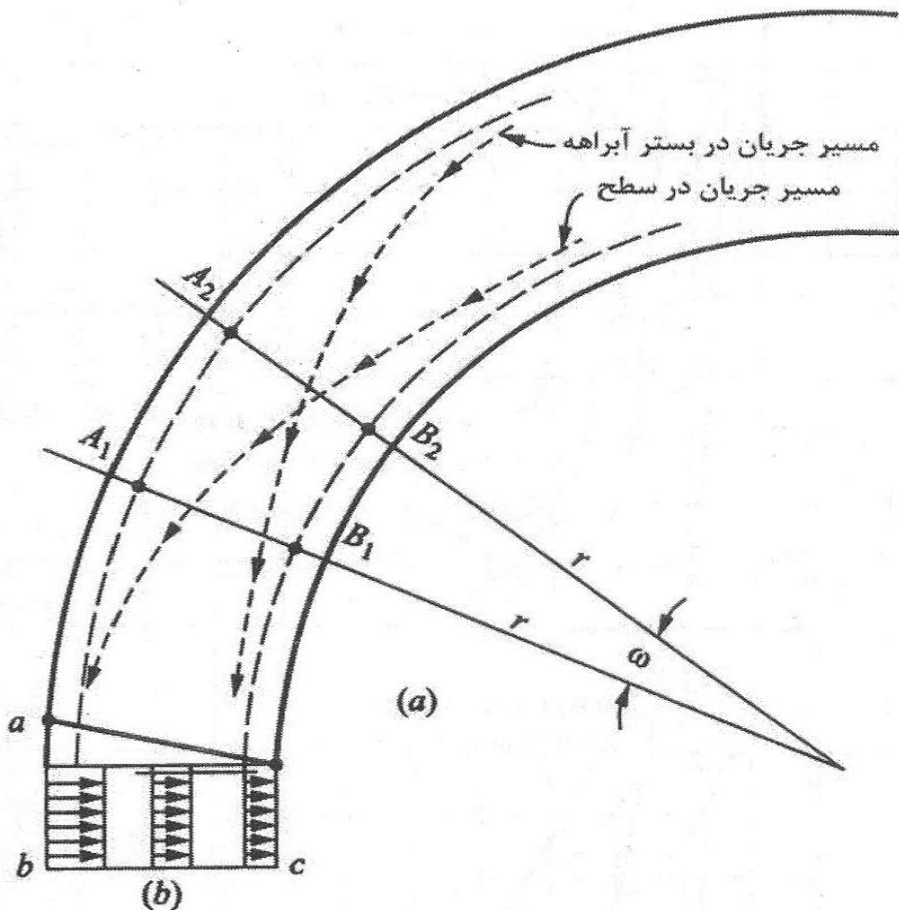
می‌کنند با ایجاد تعلیق به نسبت متراکم در نزدیک بستر تمایل به معلق شدن دارند. این روشی است که با استفاده از آن مقداری از رسوبات درشت‌دانه از رودخانه به سمت کانال انتقال می‌یابند. شکل ۲-۴ نمودار ارائه شده توسط بوندورانت (۱۹۵۳) است که نشان‌دهنده توزیع عمودی اندازه ماسه و توزیع سرعت اندازه گیری شده در روزخانه میسوری در اوماها در سال ۱۹۵۱ است. این نمودار نشان می‌دهد که غلظت ذرات ماسه با نزدیک‌تر شدن به بستر افزایش می‌یابد و این افزایش متناسب با افزایش اندازه ذرات بیشتر خواهد شد. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که همبستگی بسیار خوبی بین اندازه ماسه در بستر و در تعلیق وجود دارد. توزیع عمودی غلظت و اندازه ذرات رسوب برای طرح اهمیت زیادی دارد. به دلیل اینکه بیشتر منحرف کننده‌های رسوبات به منظور انحراف ذرات سنگین‌تر در بخش پایینی جریان طراحی می‌شوند.



شکل ۲-۴- توزیع غلظت و سرعت رسوبات معلق در رودخانه میسوری در اوماها (بوندورانت، ۱۹۵۳)

### ۲-۱-۳-۲- انتخاب نقطه انحراف

انتخاب دقیق نقطه‌ای که آب از رودخانه منحرف می‌شود عامل بسیار مهمی در کاهش مقدار رسوبات ورودی به کانال است. به طور کلی بخش بیرونی یا بخش مقعر یک قوس بهترین مکان انحراف است [۳۶]. این مکان به این دلیل مناسب خواهد بود که بار سنگین بستر تمایل دارد تا به سمت بخش داخلی قوس حرکت کند و غلظت رسوبات در این نقطه کمتر از نقاط دیگر رودخانه است. این اثر به دلیل جریان‌های مارپیچی است که ابتدا توسط تامپسون (۱۸۷۶) تشریح شد و به وسیله تعدادی از پژوهشگران مانند ایبن و درینگر (۱۹۶۲) نیز بیان شد این نوع جریان در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



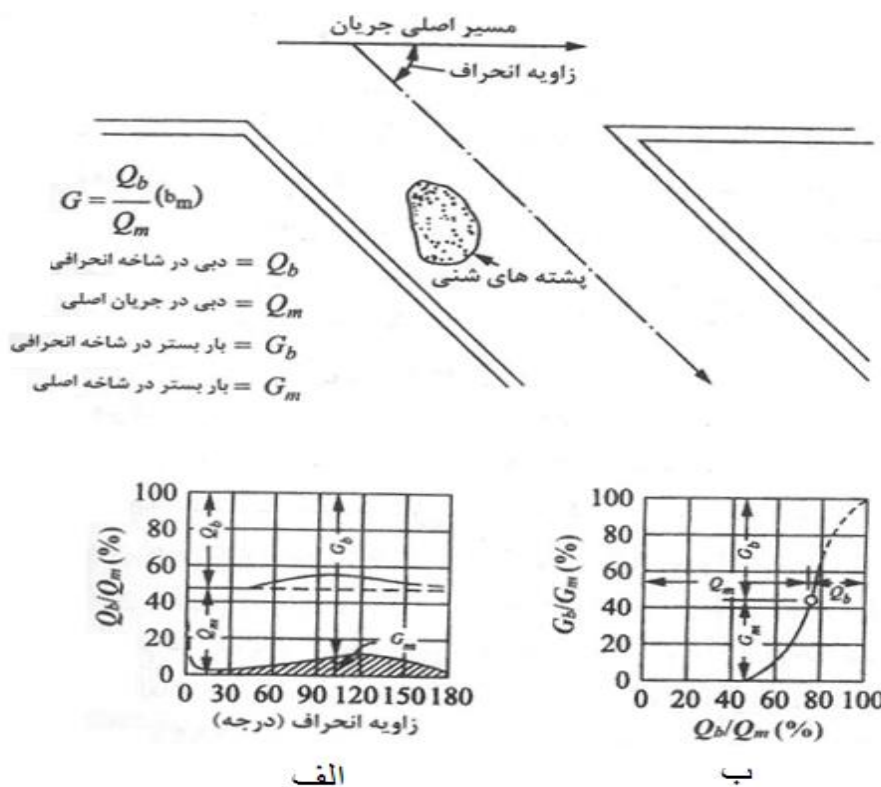
شکل ۲-۵- نمودار شماتیک جریان در انحنای کانال‌ها

جریان حلزونی بار بستر را به بخش داخلی قوس جاروب می‌کند. در این مکان‌ها شکل می‌گیرند. این جریان‌های مارپیچی یا حلزونی به‌راحتی در جریان اطراف یک قوس مشاهده می‌شوند. در نتیجه سمت خارج قوس رودخانه بهترین نقطه برای انحراف آب به سمت سازه‌های آبگیر بالادست کانال است. همان‌طور که بعدها نشان داده خواهد شد این شرایط جریان در طراحی سازه‌های انحراف کانال به‌عنوان بخشی از ابزار دفع‌کننده رسوبات در نظر گرفته می‌شود. این شرایط یک اصل جریان است که گاهی به عنوان اصل جاروب بار بستر شناخته می‌شود که به‌طور وسیعی توسط آبیاران بسیاری از کشورها برای مدت زمان طولانی استفاده شده است. اصل جاروب بار بستر به‌طور قابل توجهی توسط اینگلیس (۱۹۴۹) در توصیه روشی برای سد انحرافی ساکار در رودخانه ایندوس در پاکستان استفاده شده است. نتیجه این بود که رسوبات بستر دورتر از سازه‌های بالادست کانال و روی سد منحرف می‌شوند. [۳۷] این اصل توسط انجمن عمران ایالات متحده آمریکا نیز در برخی مکان‌های انحراف استفاده شده است که برخی از آنها در پاراگراف زیر توصیف شده‌اند.

## ۲-۳-۱-۳- زاویه انحراف

به‌طور کلی به زاویه بین جهت جریان در کانال اصلی و جهت جریان در کانال انحرافی، زاویه انحراف گفته می‌شود. مهندسی مصری (عبدل، ۱۹۴۹) که اثر زاویه انحراف را به عنوان عاملی در تقارن جریان در تاسیسات انحراف بررسی کرد، آن را زاویه پیش‌نامید و اهمیت آن را در مقدار رسوبات هدایت شده به سمت کانال انحرافی یادآور شد. این نتیجه به خوبی توسط تعدادی از پژوهشگران تایید شده است. به منظور معرفی برخی از شاخص‌هایی که با استفاده از آنها زاویه بهینه انحراف تعیین می‌شود، مطالعاتی انجام شده است. هرچند که چیزی به عنوان زاویه انحراف وجود ندارد به دلیل اینکه این زاویه با نسبت انحراف (یعنی نسبت دبی در کانال انحرافی به دبی در رودخانه) و با موقعیت آبگیر یا تونل انحراف در یک قوس تغییر می‌کند. اندازه زاویه بهینه با کاهش نسبت انحراف افزایش می‌یابد. به ازای یک زاویه انحراف معین نسبت بهینه انحراف به دبی رودخانه و دبی انحراف بستگی دارد. بهترین راهکار

برای این مشکل، انتخاب زاویه انحراف با استفاده از مدل مطالعه فیزیکی به ازای نسبت انحراف حاکم یا به ازای شرایطی که موجب ایجاد حداکثر دبی بار بستر می شود است. از شکل ۲-۹- الف واضح است که به ازای انحراف مساوی دبی جریان بین رودخانه و انشعاب بیشتر بار بستر به سمت انشعاب منحرف می شوند. همینطور نشان داده شده است به ازای زوایای ۹۰ تا ۱۲۰ درجه بیشترین انحراف رسوب و کمترین انحراف جریان اتفاق می افتد که نقطه عطف آزمایشات این پایان نامه می باشد. شکل ۲-۶-۶- منحنی ای است بر روی آن تقسیمات مختلف جریان بین رودخانه و انشعاب در مقابل بار بستر ورودی و هریک برای زاویه انحراف ثابت ۳۰ درجه رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود به ازای زاویه انحراف ۲۵ درجه ۵۰ درصد بار بستر وارد انشعاب خواهد شد. آزمایش های انجام شده در ایستگاه تحقیقاتی پونا در بمبئی هند توسط اینگلیس (۱۹۴۹) این یافته ها را تایید می کنند. [۳۷]



شکل ۲-۶- رابطه بین تقسیم دبی بار بستر، تقسیم دبی و زاویه انشعاب به صورت آزمایشگاهی

از مطالب بیان شده در مورد انتخاب نقطه انحراف، به راحتی می توان فهمید که هرگونه انحراف در یک زاویه معین با جهت جریان در آبراهه اصلی در اثر انحنایی مخالف با انحنای جریان در کانال اصلی ایجاد می شود. سرعت بیشتر در سطح آب نیازمند نیروی بزرگتری برای چرخاندن آن نسبت به حرکت آهسته تر آب در نزدیک بستر است به دنبال آن سطح آب با اندازه حرکت بزرگتر تمایل به حرکت همراه با جریان اصلی دارد. در حالی که حرکت آهسته تر آب در نزدیک بستر (که غلظت های بیشتری از رسوبات را انتقال می دهد) تمایل دارد تا به سمت کانال انحرافی حرکت کند. بنابراین کانال انحرافی بار بستر جاروب شده را (که از قسمت خارجی به قسمت داخلی قوس جریان می یابد) جذب می نماید. به دلیل اینکه برای هر زاویه انحراف شروع انحراف در سمت داخلی قوس ایجاد شده به وسیله انحراف رخ خواهد داد. تعدادی از کانال های انحراف با جهت جریان به سمت دریاچه فوقانی کانال (دریاچه بالادست سد) عمود بر جهت جریان آبراهه اصلی طراحی شده اند (یعنی با زاویه انحراف ۹۰ درجه) در این کانال ها جریان آب به سمت سازه دریاچه فوقانی کانال (دریاچه بالادست سد) به دلیل اندازه حرکت آن در جهت جریان رودخانه از دیوارهای کانال جانبی تبعیت نمی کند. در عوض، جریان با زاویه های کوچک تر وارد کانال انحرافی می شود. این نشان می دهد که زاویه انحراف ۹۰ درجه زمانی که از تونل ها به منظور انحراف رسوبات استفاده می شود غیرمعمول نخواهد بود.

## **۲-۳-۱-۴- منحرف کننده رسوبات**

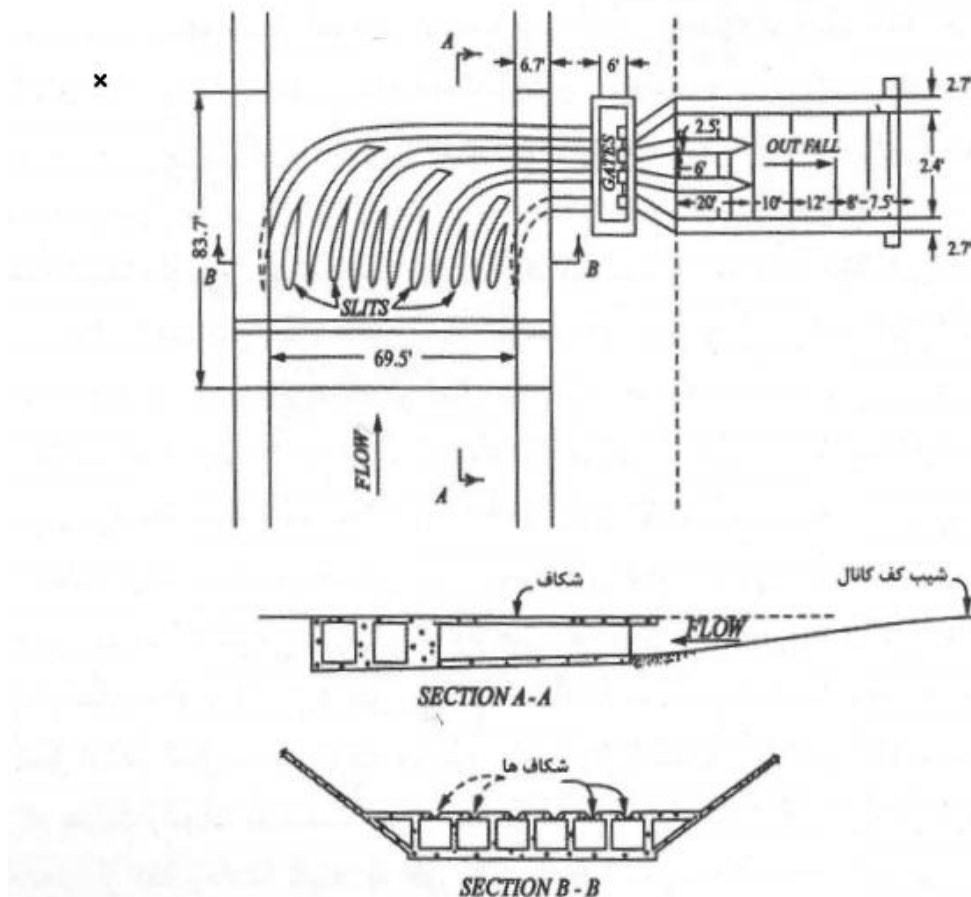
کلیات منحرف کننده رسوب سازه ای است که در بالادست کانال قرار می گیرد و به منظور کنترل ورود بخش زیادی از رسوبات رودخانه به کانال طراحی می شوند. سازه های انحراف و سازه های آبگیر بالادست برای انحراف آب حاوی بار معلق از رودخانه به گونه ای قرار می گیرند که فقط بخش کوچکی از بار بستر به سمت مخزن سد انتقال یابد. از قدیم بسیاری از روش های قرارگیری ابتکاری برای دستیابی به این نتیجه استفاده شده اند. برخی از آرایش ها بر مبنای روش های نظری یا مطالعات مدل فیزیکی و یا هر دو هستند روش ها و آرایش های دیگر در نتیجه سال ها ساخت و اجرای مکرر سازه های انحراف برای

سیستم‌های کانال خاص بوده‌اند. رودخانه‌هایی که بیشتر حاوی رسوبات معلق هستند به حوضچه‌های ته‌نشینی برای حذف آنها نیاز دارند. این حوضچه‌ها برای ته‌نشینی و تله‌اندازی رسوبات در مکان‌های از پیش تعیین شده طراحی می‌شوند.

## ۲-۳-۱-۵- دفع‌کننده تونلی رسوبات

عمومی‌ترین نوع دفع‌کننده استفاده شده در کانال‌های بزرگ هند و پاکستان، دفع‌کننده تونلی است. این سازه بسیار شبیه به منحرف‌کننده تونلی است، با این تفاوت که آنها به منظور جلوگیری و حذف بار بستر باقی‌مانده در کانال قرار می‌گیرد. شکل ۲-۷ نمایی از یک دفع‌کننده تونلی نشان داده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود عرض کانال به تعدادی کانال اصلی تقسیم شده است. این تونل‌ها به سمت راست انحنا پیدا کرده‌اند و به نقطه‌ای که در آنجا آنها از روی دیوار عبور می‌کنند همگرا شده‌اند. در این مکان دریچه‌هایی برای تنظیم دبی قرار داده می‌شود. هر یک از تونل‌های اصلی حاوی قسمت‌هایی هستند که مقطع عبوری را به تونل‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کنند. این دیوارهای مقسم تا نقطه‌ای که سازه از میان خاکریز عبور می‌کند ادامه می‌یابد. ارتفاع تونل در دهانه آن به‌طور کلی ۲۰ تا ۲۵ درصد عمق آب در کانال در نظر گرفته می‌شود. سقف تونل اغلب ۱/۵ تا ۲ فوت بالادست ورودی امتداد دارد، به‌طوری که هدایت رسوبات به سمت تونل را تسهیل می‌کند. البته گراهای موضعی موجب می‌شوند که ذرات درشت‌دانه‌تر از کف برداشته شوند. به‌طور کلی حداقل اختلاف ارتفاع ۲/۵ فوت برای اجرای دفع‌کننده نیاز است، اگرچه، هر چه این اختلاف ارتفاع بیشتر باشد، بازده بهتری ایجاد خواهد شد، اما نیازمند سرعت بیشتر جریان خواهد بود. برای حرکت دادن رسوبات با اندازه ماسه از میان تونل‌ها، سرعتی بین ۸ تا ۱۰ فوت بر ثانیه از میان دفع‌کننده مناسب خواهد بود. به‌منظور اجرای دفع‌کننده، مقدار آب منحرف شده به سمت تونل انحرافی رسوبات باید ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش یابد تا این جریان اضافی از مسدود شدن دهانه تونل انحرافی جلوگیری نموده و رسوبات افزایش‌یافته را مدیریت نماید.





شکل ۲-۷- دفع کننده ریوب تونلی در سالامپور در کانال آبد در هند [۳۶]

## ۲-۴- مروری بر تحقیقات انجام شده در کانال‌های آبگیر

تاکنون تحقیق و بررسی کاملی بر روی میزان افزایش رسوبات ورودی به تونل‌های انتقال رسوبات صورت نپذیرفته است اما تحقیقات متعددی برای تعیین و بررسی رسوب ورودی به کانال‌های آبگیر صورت گرفته که این تحقیقات و آزمایشات در جهت کاهش رسوبات ورودی بوده است که ذیلاً به تعدادی از آن اشاره می‌شود.

در تحقیقات Barkdoll (1997) نشان داده شد حداکثر نسبت رسوب انحرافی به نسبت جریان منحرف‌شده در یک آبگیر حدود ۳۸ درصد است. البته آزمایش‌های این محقق در شرایط بدون تزریق رسوب انجام شده است، بنابراین به مرور با حمل رسوبات بستر و افزایش عمق، قدرت حمل جریان کاهش

یافته و با افزایش نسبت دبی انحرافی، نسبت رسوب ورودی به آبگیر به سمت صفر میل نموده است [۱۸]. Barkdoll et al. (1999) در مطالعات خود روی آبگیر جانبی که در مسیر مستقیم و با زاویه آبگیری 90 درجه انجام گردید، نشان دادند که نسبت دبی انحرافی بیشترین تأثیر را روی نسبت رسوب انحرافی دارد [۱۹]. Izadpanah and Neyshabouri (2003) با انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی قوس ۹۰ درجه و با تغییر محل قرارگیری کانال آبگیر به این نتیجه رسیدند که موقعیت ۷۵ درجه در قوس نسبت به ۶۵ و ۷۰ درجه، رسوب کمتری را منحرف خواهد کرد [۲۰]. Pirestani (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌ها در زوایای مختلف کانال با موقعیت‌های مکانی و عددهای فرود، زاویه ۶۰ درجه را برای موقعیت ۱۱۵ درجه در خم ۱۸۰ درجه مناسب دانسته است [۲۱]. تحقیقات صورت گرفته توسط Abbasi (۲۰۰۳) بر آبگیر در مسیر مستقیم رودخانه نشان داد که حضور آستانه، باعث کاهش عرض گردابه در ابتدای آبگیر شده و در نتیجه باعث کاهش ورود رسوبات و عرض رسوب‌گذاری در دهانه آبگیر خواهد شد، میزان تأثیر آستانه در نسبت انحراف‌های بالا نسبت به نسبت‌های پائین انحراف موثرتر است [۲۲]. Behbahani and Bajestan با انجام آزمایش‌هایی بر روی آبگیر 75 و 90 درجه به این نتیجه دست یافتند که دبی انحرافی بیشترین وابستگی را به عدد فرود بالادست آبگیر دارد و نسبت دبی انحرافی در زاویه 75 درجه با شرایط مشابه، کمتر از نسبت دبی انحرافی شاخه فرعی با زاویه 90 درجه برآورد شد. همچنین بعد طولی سطح جداشدگی در انحراف 90 درجه با نسبت متغیر دبی انحرافی، تغییرات زیادی از خود نشان نداده و در بعد عرض، سطح جداشدگی در زاویه انحراف ۷۵ درجه، عرض بیشتری را به خود اختصاص داد، که با افزایش نسبت دبی انحرافی، سطح جداشدگی مذکور کاهش یافت [۲۳]. نتایج آزمایشگاهی Dehghani et al. (۲۰۰۶) در یک کانال ۱۸۰ درجه با بستر متحرک نشان داد که افزایش فرود جریان باعث جابجائی محل چاله‌ها به سمت بالادست قوس و افزایش میزان فرسایش و دبی حمل رسوب شده است. با افزایش عدد فرود شیب عرضی بستر افزایش می‌یابد و بنابراین عدد فرود جریان عامل بسیار مهمی در تغییرات توپوگرافی بستر می‌باشد. افزایش شیب عرضی تا محدوده عدد فرود ۰/۳

کمتر بوده و با افزایش عدد فرود، این تغییرات بیشتر خواهد شد. یعنی شیب عرضی بستر تابعی از عدد فرود جریان است [۲۴]. ورود رسوب از کانال اصلی با مقطع دوزنقه به آبگیر 30 درجه توسط Karami et al. (2010) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاهش عمق، کاهش قدرت جریان ثانویه و در نتیجه کاهش ورود رسوب به آبگیر را در پی دارد [۲۵-Salemnia and Shafaei]. [Bajestan (2011) اثر تغییر نسبت آگیری بر میزان رسوب بستر ورودی به آبگیر در کانال دوزنقه‌ای با زاویه آگیری ۶۰ درجه نسبت به جهت جریان را با و بدون نصب صفحات مستغرق بررسی کردند. نتایج بررسی این محققان نشان داد که با افزایش نسبت آگیری از ۷/۵ به ۱۶ درصد میزان رسوب ورودی به آبگیر در هر دو حالت با و بدون صفحات مستغرق به طور متوسط به میزان ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. [۲۶] Jafari-Mianaei and Ayyoubzadeh (2014) با مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب دیواره کانال اصلی بر میزان رسوب ورودی به آبگیر جانبی با و بدون نصب صفحات مستغرق به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحات مستغرق در دو حالت دیواره قائم و دیواره شیب‌دار کانال اصلی میزان رسوب ورودی به آبگیر را کاهش می‌دهد اما این میزان کاهش در حالت دیواره شیب‌دار و به‌ویژه در نسبت‌های آگیری کم در مقایسه با حالت دیواری قائم به مراتب بیشتر است به طوری که در حالت دیواره شیب‌دار با نصب صفحات مستغرق و در نسبت دبی انحرافی ۱۲ درصد میزان رسوب ورودی به کانال آبگیر تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. [۲۷] Hashid et al. (2015) در مطالعه‌ای خصوصیات جریان عبوری از آبگیرهای جانبی دایره‌ای را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که ضریب شدت جریان این نوع آبگیرها به عدد فرود و نسبت عرض روزنه به عرض کانال اصلی بستگی دارد [۲۸].

در داخل کشور نیز تحقیقات گسترده‌ای در خصوص رفتار جریان در دهانه آبگیرهای جانبی انجام شده است. ساجدی و همکاران (۱۳۷۶) روی آرایش صفحات مستغرق، قلانی و همکاران (۱۳۷۷) روی زاویه صفحات مستغرق، یونسی (۱۳۸۱) روی آرایش طولی صفحات بار تغییرات توپوگرافی بستر در جلوی آبگیر و عباسی (۱۳۸۲) روی کاربرد صفحات مستغرق و کاربرد آستانه به صورت آزمایشگاهی، تحقیقاتی

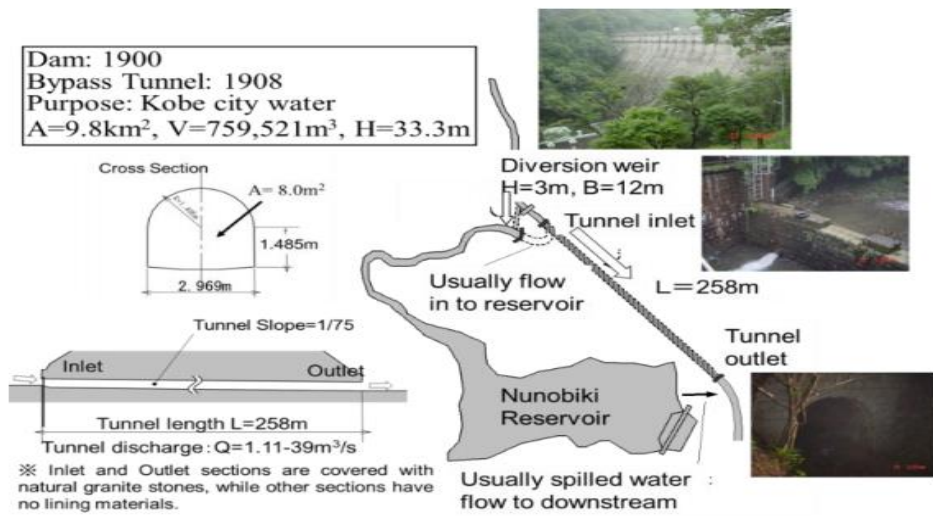
را انجام داده اند [۲۹-۳۲] اسماعیلی ورکی و فرهودی (۱۳۸۸) بر روی اثر زاویه آبگیری بر مقدار رسوب ورودی به دهانه آبگیر در بندانحرافی آزمایش‌هایی را انجام و بیان کردند با افزایش زاویه آبگیری از ۹۰ درجه به ۱۱۰ درجه میزان رسوب ورودی ۲۵/۱ درصد کاهش می‌یابد. سیدیان و شفاعی بجستان (۱۳۸۹)، مطالعاتی بر روی مقایسه رسوب معلق ورودی به آبگیر جانبی با تغییر زاویه دیواره کانال اصلی از قائم به ۴۵ درجه انجام دادند و بیان کردند این تغییر شیب سبب اصلاح آگوی جریان شده و رسوب ورودی به آبگیر کاهش می‌یابد. جلیلی و همکاران (۱۳۹۰)، تاثیر هندسه دهانه آبگیر بر مقدار و الگوی رسوب‌گذاری در آبگیر جانبی را بررسی و بیان کردند، ایجاد قوس بهینه در دیواره کانال آبگیر منجر به کاهش مقدار رسوب ورودی به میزان حداکثر ۶۰ درصد خواهد شد [۳۳-۳۵].

## ۲-۵ مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی تونل‌های انتقال رسوب

کندولوف و همکاران kondolf در سال ۲۰۱۴ یک نمای کلی از کاهش عمر مخازن سدهای جهان به جهت تله‌اندازی رسوبات که به ناچار توانایی انسان را برای تامین آب و برق مورد نیاز رشد جمعیت کاهش می‌دهد را ارائه نمودند. [۴۱] تحقیقات اخیر در SBTs متمرکز بر مقاومت تونل‌ها در مقابل فرسایش هیدرولیکی (Boes.2014) و همچنین ترکیب تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌های عددی می‌باشد (Kantoush و همکاران ۲۰۱۲). [۱۴ و ۴۲] آنها خصوصیات جریان و غلظت رسوبات معلق (SS) را در یک مدل با مقیاسی از نمونه واقعی آن (SBTs انحراف سیل‌های فصلی) مورد بررسی قرار داده‌اند و تحقیقات آن‌ها به عنوان ابزاری برای کالیبره کردن مطالعات مدل‌های عددی قبلی بدل شده است. با این حال با توجه به راه‌حل‌های دیگر مدیریت رسوبات که به‌طور موازات پیشرفت یافته است SBTs ها می‌توانند برای افزایش کارایی انتقال رسوبات بطور توأمان از قبیل ترکیب این تونل‌ها با خروج رسوبات معلق (SS) از طریق دریچه‌های تحتانی و یا ترکیب با روش‌های مختلف فلاشینگ و رسوب‌زدایی و غیره موثرتر باشند. برای مثال (jenzer\_ALthaus 2011) (جنزر-آلتوس) یک سیستم

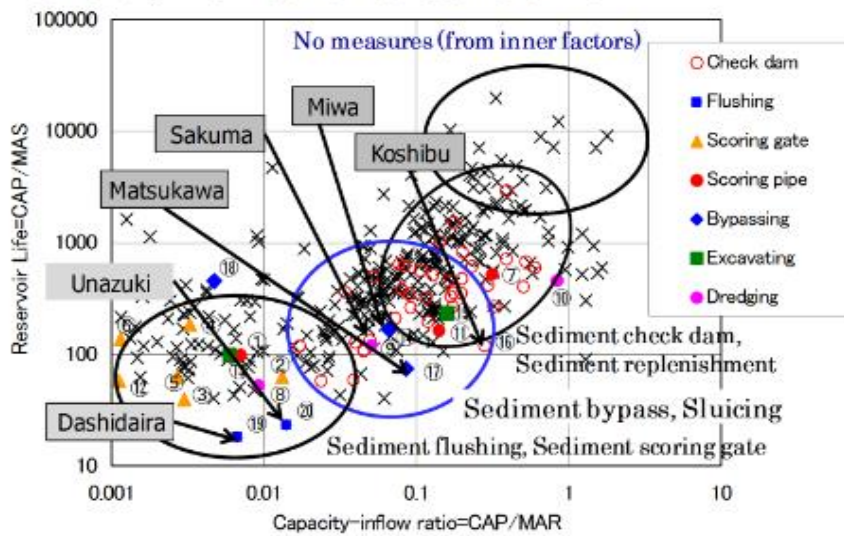
اصلی را برای انتقال مواد معلق ته‌نشین پذیر را برای راحت‌تر شدن عمل فلاشینگ طراحی و ارائه نمود. [۴۳] امامقلی زاده و صمدی (۲۰۰۸) تحقیقی بر روی امکان‌پذیری تخلیه رسوبات با استفاده از روش رسوبشویی و سیستم تونل انحراف در بالاست سد مخزنی سد دز انجام دادند و اظهار داشتند با ساخت سد مستغرق در ۹ کیلومتری سد دز و همچنین ساخت تونلی به قطر ۸/۲۸ متر و طول ۱۵ کیلومتر امکان تخلیه ۱۱/۳ میلیون متر مکعب رسوب وجود دارد [۴۴].

در ژاپن، تونل‌های عبوری رسوبات به مدت طولانی مورد مطالعه قرار گرفت. تونل عبوری رسوب در سد Nunabiki اولین مورد در ژاپن است، که در سال ۱۹۰۸ و بعد از ۸ سال از شروع به کار سد در سال ۱۹۰۰ ساخته شده است (شکل ۲-۸). این مجرا برای ۲۵ سال تا ۱۰۰۰ سال آینده‌ی مخزن برآورد شده است. تونل‌های عبوری در سدهای Koshibu و Matsukawa از زیر ساخت‌ها محسوب می‌شوند (شکل ۲-۹). به منظور طرح این مجموعه‌ها، خصوصیات هیدرولیکی تونل‌ها و سرریزهای انحرافی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴۵-۵۳] شکل ۲-۸ تمامی سدهای ژاپن را بر پایه‌ی نسبت حجم کل ظرفیت مخزن بر حجم رواناب سالانه و نسبت حجم کل ظرفیت مخزن بر متوسط حجم جریان رسوبی سالانه نشان می‌دهد، زیرا تصور گردیده است با این دو پارامتر طبقه بندی شده می‌توان درک درستی از مدیریت رسوبات در مخازن بدست آورد. در سدهایی که از روش انتقال رسوب استفاده شده است، نسبت حجم کل ظرفیت مخزن بر حجم رواناب سالانه آنها برابر  $۰,۲ - ۰,۰۲$  و نسبت حجم کل ظرفیت مخزن بر متوسط حجم جریان رسوبی سالانه آنها برابر  $۵۰ - ۵۰۰$  می‌باشند. این نسبت‌ها نشان می‌دهند که تونل‌های عبوری رسوب برای مخازن در اندازه‌ی متوسط مناسب هستند. منظور از اندازه‌ی متوسط نه فقط برای سازه مخازن می‌باشد بلکه منظور حجم هیدروژیکال حوزه آبریز مرتبط با آنست که بسیار چشمگیرتر است. بنابراین روش فلاشینگ رسوبات ممکن است برای سدهای Unazuki و Dashidaira بر رود Kurobe مناسب‌تر باشد ولی تونل‌های عبوری رسوبات در سدهای Nanobiki (شکل ۲-۱۲) و Matsukawa (۲-۱۳) که سدهای متوسطی بسیار موثر و باصرفه تر می‌باشند [۴۵].

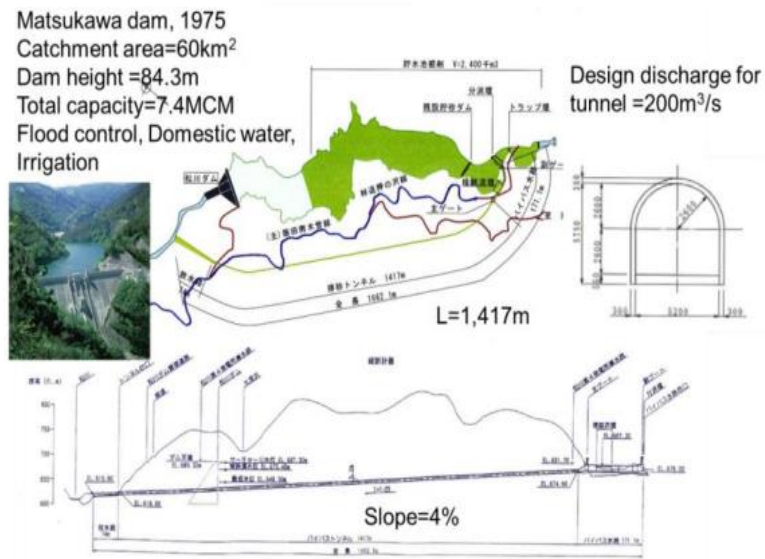


شکل ۲-۸- نمایش مدیریت رسوبات سد‌ها در ژاپن

CAP: Original total storage capacity volume, MAR: Mean annual runoff, MAS: Mean annual sediment inflow

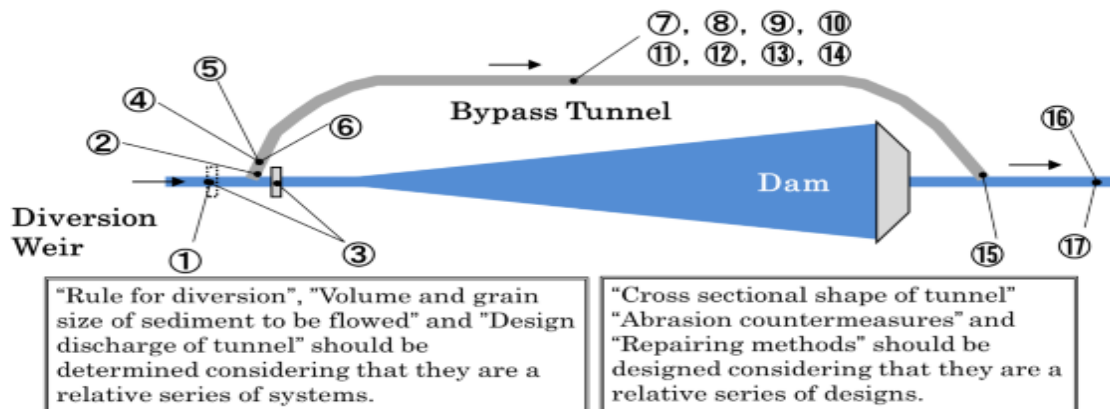


شکل ۲-۹- تونل عبوری رسوب در سد Nanobiki



شکل ۲-۱۰- تونل عبوری رسوب در سد Matsukawa، طرح و مقایسه‌ی عملکرد عبوری رسوب

کمیته‌ی مطالعات مدیریت رسوب مخازن همراه با مرکز تحقیقات منابع آب (WEC) چندین جنبه را برای طراحی و ملاحظات عملیاتی تونل‌های انتقال رسوبات خلاصه و ارائه کرده‌اند که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- برنامه‌ریزی طراحی و مدیریت ساخت تونل‌های عبوری رسوب

۱- امکاناتی برای به دام انداختن شن و بقایای چوبی:

الف- شن های بزرگ و بقایای چوبی باید در قسمت بالادست سیل انحراف به دام بیفتند تا از ورود آنها به داخل تونل جلوگیری شود.

۲- تعیین قانون انحراف (در مورد سدهای چند منظوره از جمله کنترل سیل):

الف- سرریزهای انحرافی را باید در هنگام سیلاب عملیاتی کرد

ب- دبی طراحی تونل باید بدون جلوگیری از عملیات کنترل سیل تعیین شود. قانون انحراف

با طراحی مناسب ساختار ورودی باید از عملکرد لازم برخوردار باشد.

۳- ساختار سرریز انحرافی و سرریز تله رسوب

الف- باید مقیاس لازم برای سرریز انحرافی (یا سرریز تله رسوب گیر) از نتیجه آنالیز عددی

مشخص شود.

ب- سرریز انحرافی و سرریز تله رسوب اساساً از سازه های بتونی تشکیل شده است.

ج- از نقطه نظر تله اندازی موثر مصالح بستر رودخانه ، استفاده از صفحات دابل فولادی در

ساختار سرریزها مجاز است.

۴- اندازه گیری دبی جریان:

الف- دبی ورودی به تونل (رابطه بین سطح آب در جریان انحرافی و مقدار جریان) باید برای

کنترل دبی سیل اندازه گیری شود.

۵- ساختار قسمت ورودی تونل:

الف- بخش کانال ورودی تونل باید بصورت شوت طراحی شود تا بتواند رسوب ورودی کنترل

کند.

ب- نصب دیوارهای پرده ای برای هدایت شن و ماسه های چوبی شناور به داخل تونل کنترل

شود.



۶- اقدامات برای جلوگیری از فرسایش بخش ورودی تونل

الف- بخش ورودی اساساً باید توسط روکش فولادی پوشانده شود.

۷- دبی طراحی تونل

الف- دبی طراحی تونل باید بدون جلوگیری از عملیات کنترل سیل تعیین شود

ب- چندین دبی طراحی تونل باید با دقت مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد زیرا این پارامتر

اصلی برای تعیین هزینه پروژه است.

۸- تراز افقی:

الف- باید برای کوتاه‌ترین مسیر طراحی شود.

۹- تراز عمودی:

الف- تونل انتقال رسوب باید براساس استاندارد طراحی تونل‌های انتقال آب طراحی شود

ب- تونل انتقال رسوب بایستی با در نظر گرفتن دبی طراحی، از منظر ایمنی و هزینه‌های

چرخه زندگی با در نظر گرفتن حجم و اندازه دانه رسوبی را که باید منتقل شود، طراحی شوند.

۱۰- حجم و اندازه دانه رسوب قابل حمل

الف- تونل انتقال رسوب اساساً برای انتقال همه اندازه‌های دانه‌های رسوب طراحی می‌شود.

۱۱- شکل مقطع عرضی تونل

الف- تونل انتقال رسوب باید براساس استاندارد طراحی تونل‌های انتقال آب طراحی شود

ب- از نظر تعمیر و نگهداری، اینورتر مسطح باید به منظور پراکندگی خسارات سایش

طراحی شود.

ج- در مورد طول تونل‌های طولانی، تونل انتقال رسوب بایستی طوری طراحی شود که با

وسایل نقلیه مورد بازرسی و تعمیر قرار گیرد.

۱۲- اقدامات متقابل سایشی تونل

الف- تونل انتقال رسوب می‌بایست از بتن با مقاومت بالا تشکیل شده باشد

ب- لازم است در صورت لزوم از روکش های سنگی، بتن با الیاف فولادی، بتن پلیمری و غیره استفاده شود.

۱۳- روش بازرسی:

الف- مرتبا توسط اسکنهای لیزری سه بعدی مورد بازرسی قرار گیرد.

۱۴- روش تعمیر:

الف- تونل انتقال رسوب باید اساسا با بتن با مقاومت بالا تعمیر شود.

ب- لازم است در صورت لزوم با آستر سنگی ، بتن با الیاف فولادی ، بتن پلیمر و غیره تعمیر شود.

۱۵- ساختار قسمت خروجی

الف- برای تعیین نوع سقوط آزاد ، نوع پله و ... می‌بایست به توپوگرافی رودخانه و تراز آن توجه شود .

ب- اگر تاسیساتی وجود دارد که باید از آنها محافظت شود، باید تلفات انرژی مد نظر قرار داده شود.

۱۶- نظارت برای رودخانه پایین دست

الف- کیفیت آب ، ملاحظات زیست محیطی فیزیکی و بیولوژیکی در رودخانه پایین دست باید کنترل شود.

ب- میبایست کنترلهای کیفی، بین جریان آب بالادست مخزن و چندین نقطه از پایین دست خروجی تونل مقایسه شود.

۱۷- مواجهه با افزایش بار رسوب

الف- در صورت افزایش دبی رسوب پایین دست ، می‌بایست میزان بالآمدن سطح بستر رودخانه و جلوگیری از دفن شدن تاسیسات ورودی، کنترل شود.

کمیته‌ی مطالعات مدیریت رسوب مخازن و مرکز تحقیقات منابع آب سازه تونل‌های انتقال رسوب را به ساختار ورودی، مقطع اصلی تونل، سازه خروجی تونل و کانال پایین دست رودخانه تقسیم بندی کرده‌اند. چندین توصیه در مورد شیوه بای‌پس رسوب که باید در تحقیقات آینده حل شود اشاره شده است است:

الف- از منظر هیدرولوژی:

به منظور بهبود عملکرد بای پس ، پیش بینی بارش بالادست و رواناب با استفاده از تکنیک‌های مدل سازی و نظارت هیدرولوژیکی توزیع شده مورد نیاز است. علاوه بر این ، پیش‌بینی ورود رسوب به حوضچه سیل در حوادث سیل و نظارت در زمان واقعی به منظور بهینه سازی عملکرد بایگانی رسوب مهم است.

ب- از منظر هیدرولیکی:

شفاف‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان و رسوب در تونل‌ها به منظور طراحی تونل‌های رسوبی ایمن و اقتصادی (یعنی مقطع عرضی، سرعت، انحنا، انحراف، شیب و مصالح طراحی) که به خوبی برای مقابله در برابر آسیب‌های فرسایش بر بستر سطحی مجرا در نظر گرفته شوند. مشکل اصلی تونل‌های عبوری رسوبات فرسایش در مسیر انحراف می‌باشد. برای مقابله فرسایش انتخاب بتن مقاومت بالا و تدارک دیدن عمق فرسایش کافی و عمق جریان منحرف شده به داخل تونل از نقطه‌نظر هزینه ساختار اولیه و نگهداری آسان آن پیشنهاد می‌گردد. به منظور افزایش اثر انحراف، طراحی هیدرولیکی سرریز انحرافی یک نکته‌ی کلیدی در مورد طرح هیدرولیکی آن است (Kashiwai و همکاران (۱۹۹۷) [۵۲].

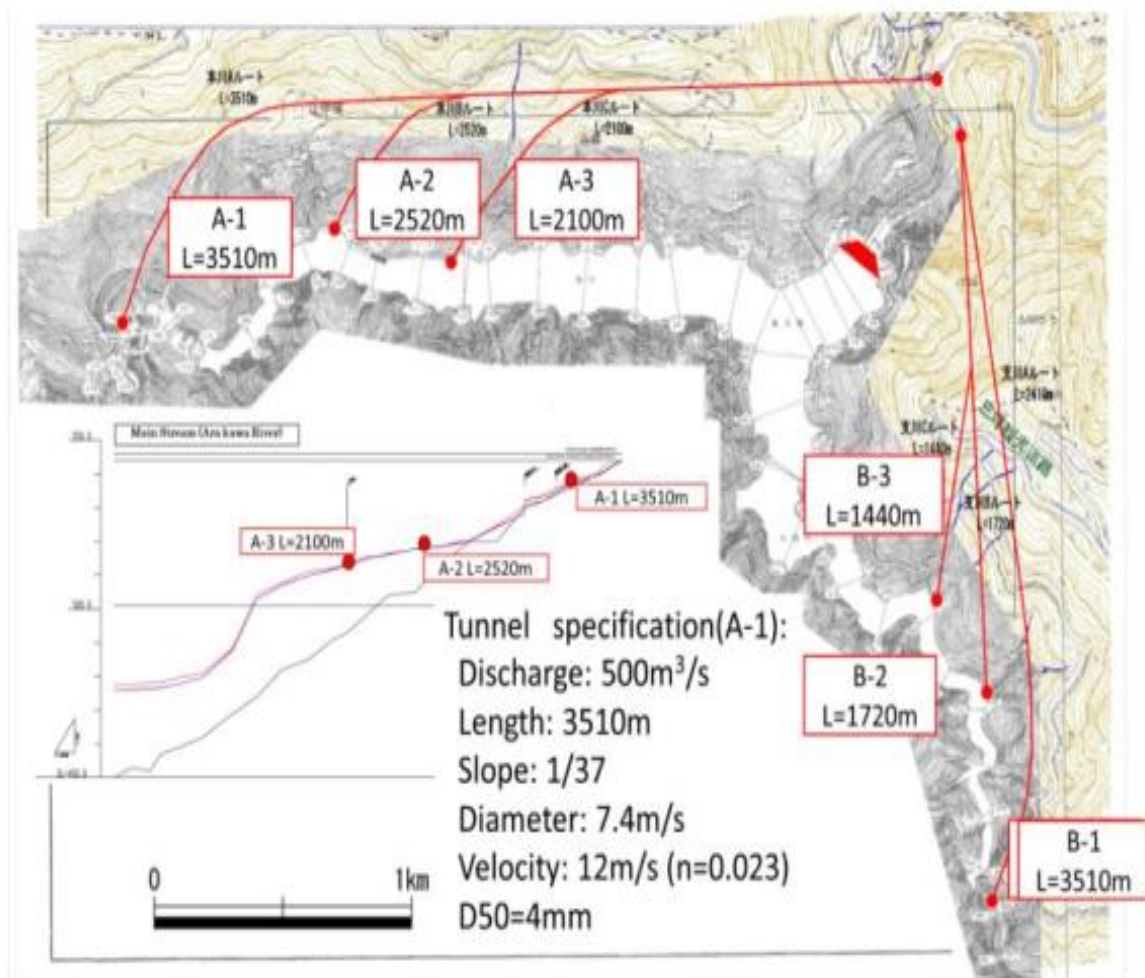
ج- از منظر محیط زیستی:

در روش انتقال رسوبات امکان بهبود کانال رودخانه پایین دست را فراهم می‌نماید. لازم است تدابیری در مورد ارزیابی این اثرات مثبت از نظر مکانی انجام شود. (مطالعات موردی تونل انتقال رسوب)

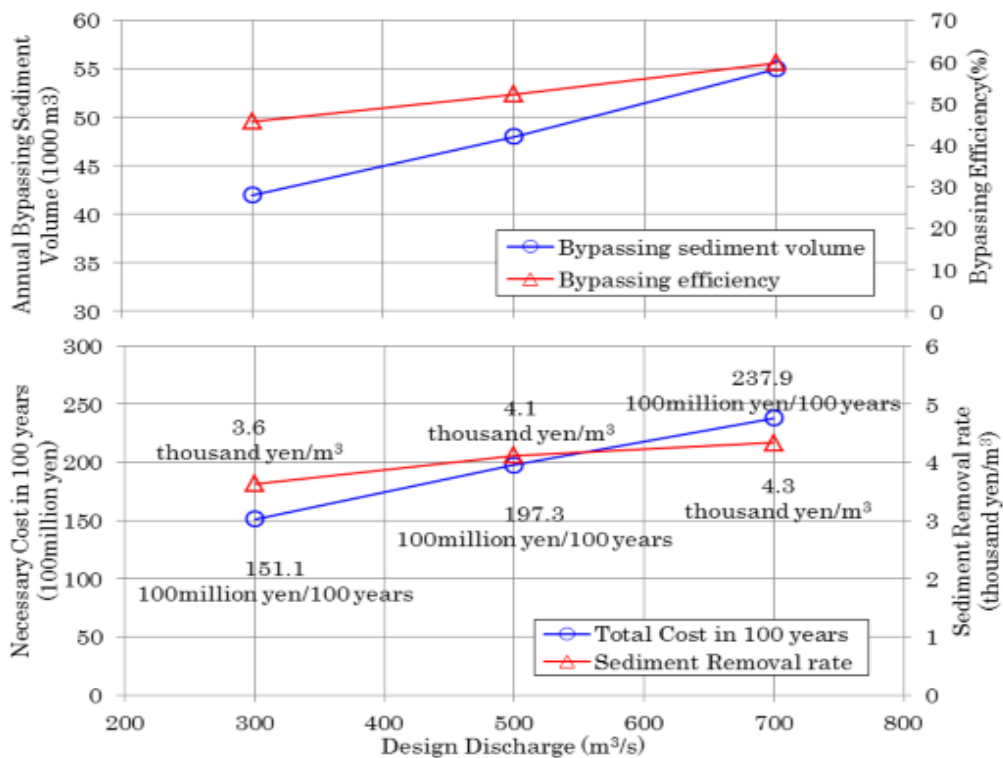
این کمیته چندین طرح اولیه تونل انتقال رسوبات که برای سد Futase در سال ۱۹۶۱ تکمیل شده است را مورد مقایسه قرار داد و نتایج نشان داد که حجم رسوبات انباشت شده در سال ۲۰۱۲ به مقدار ۴,۷ میلیون متر مکعب و میانگین سالیانه رسوب انباشته شده در مخزن ۹۲۰۰۰ متر مکعب بوده است و کاهش ۱۷,۴٪ را از ظرفیت کل مخزن که ۲۶,۹ میلیون متر مکعب می‌باشد را به دنبال داشته است. این مقدار به ۹۲٪ از ظرفیت کل مخزن در سال ۱۰۰م طرح خواهد رسید [۴۵].

در سد Futase، دو شاخه اصلی وجود دارد که حوضه‌های آبریز آنها به ترتیب مساحتی به اندازه‌ی ۱۰۸ و ۶۱ کیلومتر مربع دارد. سؤال اصلی چگونگی انتخاب انشعاب هدف و طرح نقطه‌ی ورودی برای تونل عبوری رسوب است. با انتخاب گزینه تونل انتقال رسوبات A-1 و در نظر گرفتن دبی طرح ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه، نشان داده شده است مجموعاً ۴۷۰۰۰ متر مکعب در سال رسوبات شامل ذرات درشت‌دانه با حجم ۲۴۰۰۰ متر مکعب در سال توسط تونل انتقال رسوب منحرف‌شده که نرخ انحراف برای فقط ذرات درشت‌دانه رسوبات ۱۰۰ درصد خواهد بود. در شکل ۲-12 مسیر های پیشنهادی برای تونل انتقال رسوبات و مشخصات کامل گزینه (A-1) نشان داده شده است.

هزینه ساخت و نگهداری فرضی از آپشن A-1 نسبت به هزینه ساخت یک تونل مستقیم حدود ۶۲ درصد بهای کل تخمین زده شده است در حالی که جریان رسوب به مخزن که با حاوی دانه‌های رسوبی بزرگ می‌باشد هنوز بیش از ۵۰٪ می‌باشد. برای کاهش بهای ساخت تونل بایستی دبی طرح و مقطع عرضی تونل را به وسیله‌ی هدایت این رسوبات درشت‌دانه به تونل به صورت مؤثرتر و با طراحی یک سرریز انحرافی مناسب کاهش داده شود [۴۵]. آنالیز حساسیت بر روی دبی طراحی تونل در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. با افزایش دبی طراحی، هر دو حجم رسوب عبوری و رسوبات عبوری مؤثر همزمان افزایش خواهد یافت. بنابراین می‌توان دبی تخلیه‌ی که با در نظر گرفتن نرخ برداشت بیشترین رسوبات عبوری تعیین می‌شود را بهینه می‌شود. بعد از این تحلیل‌ها، می‌توان اندازه‌ی تقریبی تونل را بر اساس حجم رسوبات عبوری و عبور مؤثر از آن و بهای ساخت آن، تعیین نمود [45].



شکل ۲-۱۲- مسیرهای پیشنهادی برای تونل انتقال رسوبات و مشخصات کامل گزینه (A-1)



شکل ۲-۱۳- آنالیز حساسیت ارزش برداشت رسوبات با تغییر دبی تخلیه‌ی طراحی تونل

با جمع بندی مطالعات گذشته می‌توان دریافت که اکثر مطالعات مربوط به تونل انتقال رسوب به صورت میدانی یا موردی بوده و در ارتباط با کانال‌های آبگیر و نیز اکثر تحقیقات بر روی الگوی جریان در کانال‌های انحرافی و بهینه‌سازی زاویه کانال فرعی و استفاده از سازه‌های کنترل رسوب جهت کاهش نرخ رسوب ورودی به کانال فرعی متمرکز بوده است؛ بنابراین برای اینکه در جریان انحرافی کمتر رسوب بیشتری منتقل شود و عملکرد تونل‌های انتقال رسوب بررسی بیشتری شود، نیاز به مطالعه آزمایشگاهی داشته تا تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن دیده شود.



فصل سوم:

## مواد و روش‌ها



### ۳-۱- مقدمه

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 انتهای این فصل نیز به معرفی مدل عددی SSIIM و روش الگوریتم ژنتیک پرداخته 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:

#### ۳-۲-۲- کانال آزمایشگاهی مستقیم

کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق شیب‌پذیر، مستقیم با مقطع مستطیل شکل و به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۷۵ متر می‌باشد. جنس کف از ورق فلزی رنگ‌آمیزی شده و دیوارها شیشه به ضخامت ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل (3-1) تصویر کانال مورد آزمایش مشاهده می‌شود. محل قرارگیری کانال فرعی که کانالی مستطیلی و به طول ۲/۲ متر است به فاصله ۴ متری از ابتدای کانال اصلی و با زاویه قائم نسبت به کانال اصلی تعبیه گردید.



شکل ۳-۱- نمایی از کانال اصلی و انحرافی

### ۳-۲-۳- مخزن ورودی و خروجی

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. برای تأمین آب موردنیاز دو مخزن با مصالح بنایی و فلزی به مجموع ۱۸ مترمکعب طراحی و ساخته شد.

همچنین برای استهلاک هر چه بیشتر اغتشاشات جریان ورودی از سیستم پمپ به داخل مخزن، از ورق‌های عرضی سوراخ‌دار به‌عنوان آرام‌کننده جریان<sup>۱</sup> به‌صورت عرضی استفاده شد.

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

به‌منظور سهولت قرائت عمق‌های جریان و کاهش خطا یک ارابه فلزی طراحی و ساخته شد که بر روی ریل قرار گرفت. با نصب عمق‌سنج دیجیتال بر روی این ارابه امکان حرکت آن در هر دو جهت طولی و عرضی کانال فراهم گردید. (شکل ۳-۲)



شکل ۳-۲- تکیه‌گاه ریلی و ارابه روی آن

### ۳-۲-۵- دریچه فولادی

به‌منظور تنظیم سطح آب داخل کانال و در بالادست سرریز جانبی، یک دریچه متحرک<sup>۲</sup> فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر در قسمت انتهایی فلوم نصب گردید. این دریچه توسط یک فرمان قابل تنظیم بود و جهت تأمین تراز آب موردنیاز و افزایش یا کاهش سطح آب از این دریچه متحرک استفاده شد.

<sup>۱</sup> Buffer

<sup>۲</sup> Slide Gate

بدین صورت که با پایین یا بالا آوردن دریچه، تراز سطح آب افزایش یا کاهش یافته و امکان قرائت و برداشت داده‌ها فراهم گردید. (شکل ۳-۳)

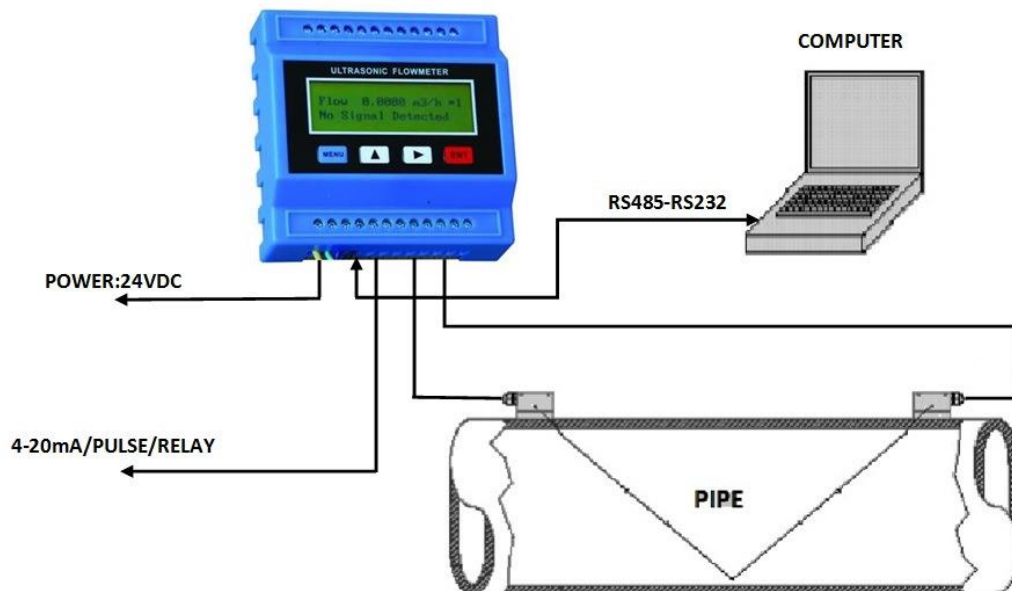


شکل ۳-۳- نمای از دریچه انتهایی کانال اصلی

### ۳-۲-۶- سیستم آبرسانی

جهت تأمین دبی ورودی موردنیاز از یک پمپ گریز از مرکز با توان خروجی ۱۲۰ لیتر در ثانیه استفاده شد و با نصب دو شیر کشویی امکان تغییر مقدار دبی ورودی فراهم گردید. برای تعیین دبی ورودی از یک فلومتر آلتراسونیک با دقت ۰,۰۱ استفاده شد. این فلومتر از مدل TFM3100-F1 ساخت کارخانه اکتک ترکیه بود. برای آنکه این دستگاه بتواند کارایی و دقت لازم را داشته باشد بایستی دستورالعمل‌های آن را به دقت رعایت نمود. از جمله تعریف جنس و ضخامت لوله ورودی، قطر لوله

ورودی، نحوه و فاصله قرارگیری سنسورها نسبت به هم فاصله نصب سنسورها نسبت به محل قرارگیری شیر کشویی تنظیم شدت جریان و کنترل قدرت سیگنال جزو بخش‌های اصلی کار با این دستگاه است. شکل زیر فلومتر آلتراسونیک مذکور به همراه اتصال نوع V سنسورها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- فلومتر آلتراسونیک مذکور به همراه اتصال نوع V سنسورها

جهت تعیین دبی خروجی از کانال فرعی، یک مخزن فلزی به طول ۳ متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و عرض یک متر ساخته و به‌منظور اندازه‌گیری دبی خروجی از سرریز جانبی، سرریز نرمال مثلثی ۹۰ درجه انتهای مخزن نصب و کالیبره شد. سرریز مثلثی در شکل (3-5) نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- سرریز مثلثی نصب شده به منظور اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از کانال فرعی

رابطه دبی - اشل سرریز مذکور به صورت زیر تعریف شد:

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (۳-۱)$$

که در آن  $Q$  دبی عبوری از سرریز برحسب لیتر بر ثانیه،  $(h - h_0)$  ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز برحسب متر،  $h_0$  ارتفاع تاج سرریز و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت هستند. برای انجام آزمایش‌ها، سرریز مثلثی ۴۵ درجه ترتیب زیر کالیبره شد:

- ۱- مخزن فلزی که سرریز در بدنه آن تعبیه شده بود به بیرون آزمایشگاه منتقل گردید.
- ۲- لوله‌ای ۴ اینچی از جنس پلاستیک توسط یک بست فلزی به لوله پمپ متصل و سر لوله داخل مخزن فلزی قرار داده شد.
- ۳- شیر لوله رانش پمپ به طور کامل بسته شد و برای تهیه دبی‌های مختلف عبوری از پمپ، از شیر

لوله کنارگذر استفاده گردید.

۴- شیر لوله کنارگذر را باز کرده و آب وارد مخزن فلزی شد. ارتفاع تیغه جریان روی تاج سرریز

توسط یک پیزومتر که در بدنه مخزن فلزی نصب شده بود اندازه گیری و یادداشت گردید.

۵- سپس بدون تغییر در میزان دبی و بدون کم و زیاد کردن شیر لوله کنارگذر، لوله پلاستیکی ۴

اینچی را خیلی سریع داخل یک مخزن فلزی ساده کوچک تر قرار داده و به طور همزمان، توسط

کرنومتر زمان پر شدن مخزن اندازه گیری و یادداشت شد.

۶- مرحله ۴ و ۵ تا ۱۳ بار تکرار شد.

۷- حجم مخزن فلزی ساده محاسبه شد.

۸- در هر آزمایش حجم مخزن نسبت به زمان به دست آمده در هر مرحله تقسیم و دبی در هر

آزمایش محاسبه شد.

۹- اعداد به دست آمده دبی ( $Q$ ) و ارتفاع تیغه جریان روی تاج سرریز ( $h$ ) وارد نرم افزار اکسل شد و

با برازش یک منحنی بین دو پارامتر  $Q$  و  $h$ ، ضرایب ثابت  $a$  و  $b$  به صورت زیر محاسبه شدند:

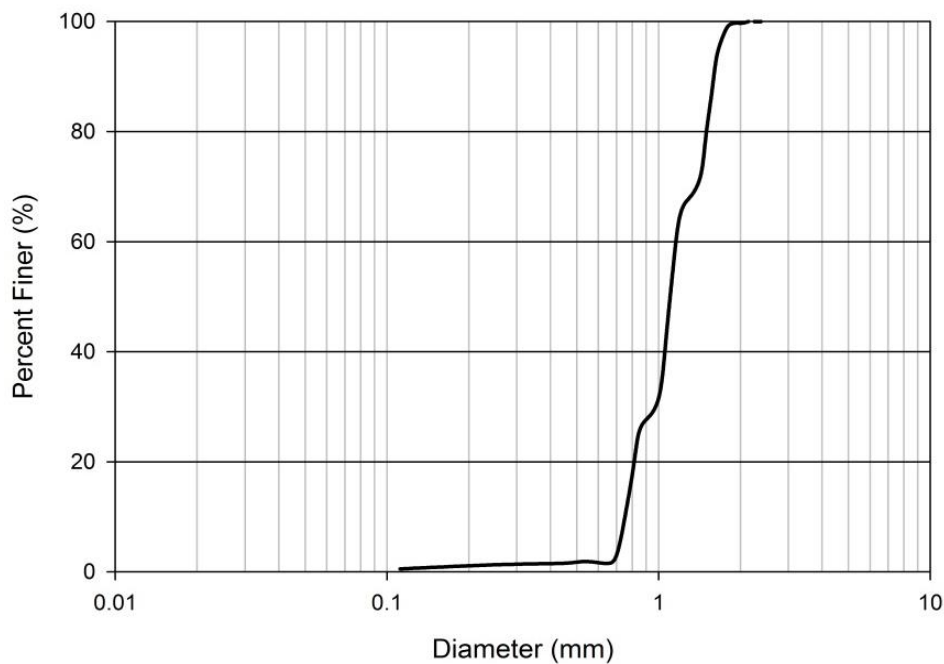
$$Q = 725.35(h - 0.2)^{2.456} \quad (l/s) \quad (1-3)$$

### ۳-۲-۷- مصالح بستر

به منظور بررسی انتقال رسوب به کانال انحرافی، لایه ۵ سانتی متری از ماسه سیلیسی با دانه بندی

یکنواخت تهیه شده از شرکت نامیکاران قزوین با متوسط قطر ۱/۱ میلی متر و با ضریب یکنواختی ۱/۴۱

در کف کانال ریخته شد. منحنی دانه بندی مذکور در شکل (3-6) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶- منحنی دانه‌بندی آزمایش ها

### ۳-۲-۸- عمق سنج دیجیتال

به منظور قرائت تراز سطح آب و عمق جریان در کانال از یک عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر به استفاده شد. عمق سنج نقطه‌ای مذکور بر روی ارابه نصب شده و با مماس شدن نوک عمق‌سنج با سطح آب و قرائت ارتفاع مشخص شده بر روی بدنه عمق‌سنج، عمق جریان نسبت به کف بستر بدست می‌آید (شکل ۳-۷).





شکل ۳-۷- نمای از عمق سنج دیجیتالی

### 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 شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی مورد مطالعه و تعیین نسبت‌های بدون بعد و بیان ارتباط بین این نسبت‌ها می‌باشد. پارامترهای متعددی در انتقال جریان و رسوب به تونل انتقال تاثیرگذار است. محققین عموماً از طریق آنالیز ابعادی به انتخاب پارامترهای بدون بعد مورد مطالعه پرداخته‌اند. با به‌کارگیری متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر رفتار جریان ورودی به تونل‌های انتقال رسوبات می‌توان رابطه‌ای را جهت تعیین نسبت رسوب انحرافی به دست آورد. بدین منظور ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی،

متغیرهای بدون بعد مؤثر بر این ناحیه، مشخص و سپس به بررسی چگونگی تأثیر آن‌ها پرداخته می‌شود. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارتند از:

۱- عوامل مربوط به هندسه کانال: عرض کانال اصلی (B) ، عرض کانال انحرافی (b) ، شیب طولی

کانال اصلی ( $S_0$ ) ، زاویه قرارگیری صفحات مستغرق ( $\Theta$ ) ،

۲- عوامل مربوط به شرایط هیدرولیکی جریان: سرعت متوسط جریان در کانال اصلی (U) ، و

عمق جریان در کانال اصلی ( $Q_m(y)$ ) ، دبی جریان در کانال اصلی،  $Q_1$  دبی جریان در کانال

انحرافی،  $Q_{sm}$  دبی رسوب در کانال اصلی و  $Q_{sl}$  دبی رسوب در کانال انحرافی

۳- عوامل مربوط به مصالح بستر: قطر متوسط مصالح ( $d_{50}$ ) ، جرم مخصوص رسوبات ( $\rho_s$ ) و

انحراف استاندارد توزیع اندازه مصالح ( $\sigma_g$ )

۴- عوامل مربوط به خواص سیال: جرم مخصوص آب ( $\rho$ ) ، شتاب ثقل (g) و لزجت سینماتیکی

سیال ( $\nu$ ) .

حال با تعریف پارامترهای  $Q_r = Q_l/Q_m$  و  $Q_s = Q_{sl}/Q_{sm}$  ، رابطه‌ی (۲-۳) بدست می‌آید:

$$f(Q_r, Q_s, U, S_0, b, y, B, \Theta, d_{50}, \sigma_g, \nu, \rho, \rho, g) = 0 \quad (2-3)$$

برای آنالیز ابعادی روش‌های مختلفی وجود دارد، در بین این روش‌ها، روش  $\Pi$  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  $\rho$  ، g و  $y$  به عنوان متغیرهای تکراری، شکل کلی رابطه بالا را با استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام، می‌توان به صورت رابطه‌ی (۳-۳) نوشت:

$$Q_{sr} = f\left(Q_r, \frac{B}{y}, S_0, \frac{b}{y}, \Theta, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{d_{50}}{y}, \sigma_g, \frac{g^{\frac{1}{2}} y^{\frac{3}{2}}}{\nu}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (3-3)$$

با توجه به اینکه شیب کانال، وزن مخصوص رسوبات و ضریب یکنواختی مصالح در تمام آزمایش های مقداری ثابت است در نتیجه پارامترهای بدون بعد  $S_0 \cdot \sigma_g$  و  $\frac{\rho_s}{\rho}$  حذف می شوند. با ترکیب  $\frac{b}{y}$  با  $\frac{B}{y}$ ، پارامترهای بی بعد  $\frac{y}{B}$  و  $\frac{b}{B}$  بدست می آید. 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 و از لیست اعداد بی بعد حذف می شود. بنابراین پارامترهای بی بعد زیر برای بررسی نسبت رسوب انحرافی بدست آمد.

$$Q_{sr} = f\left(Q_r, Fr, \frac{b}{B}, \frac{y}{B}, \theta\right) \quad (4-3)$$

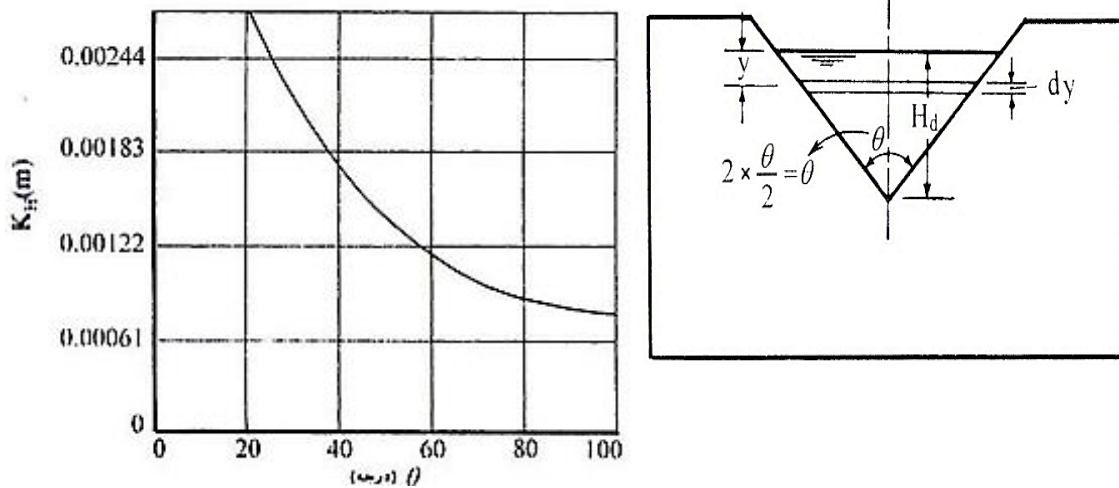
### ۴-۳- نحوه انجام آزمایش ها

قبل از هر آزمایش ابتدا مصالح بستر در کف کانال در لایه ای به ضخامت ۳ تا ۵ سانتی متر پهن شد. سپس شیب بندی بستر با استفاده از علامتگذاری روی دیواره فلوم که نشان دهنده شیب مورد نظر بود انجام و با کمک تراز یاب کنترل گردید. بعد از تراز کردن و آماده سازی بستر، آب به آرامی از طریق ورودی به حوضچه آرام کننده بالادست وارد و سپس وارد فلوم گردید. ابتدا به کمک شیرهای کنترل موجود روی لوله های ورودی جریان دبی کمی وارد فلوم شد تا قادر به حرکت کردن مصالح بستر نباشد و بستر ثابت بماند. با بسته نگه داشتن دریچه های پایین دست، تراز آب در داخل فلوم بالا آورده شد. بعد از اینکه عمق آب به اندازه کافی بالا آمد، با کمک شیرهای روی لوله های ورودی جریان، دبی به آهستگی افزایش داده شد و به طور همزمان با تغییر دریچه های پایین دست، عمق جریان و دبی کانال اصلی با کمک ارتفاع سنج های نصب شده روی کانال اصلی و بالادست سرریز اندازه گیری دبی، تنظیم گردید. تغییر دبی و دریچه های پایین دست تا زمانی که عمق و دبی مورد نظر برای آزمایش ها ایجاد گردد ادامه می یابد.

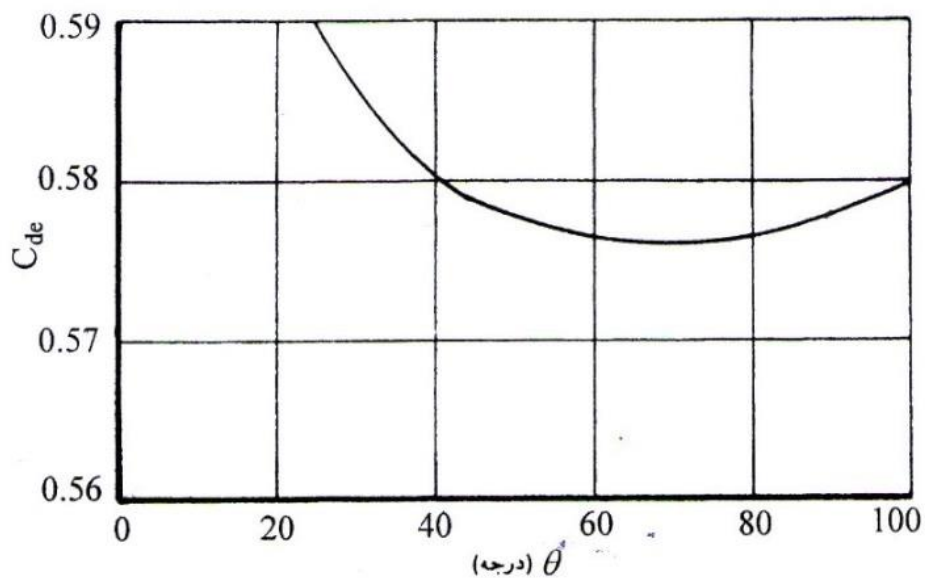
با استفاده از رابطه باس (۱۹۷۶) سرریزهای لبه تیز مثلثی دبی جریان در انتهای کانال بای پس با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_{de} \left(\tan \frac{\theta}{2}\right) H_{de}^{2.5} \quad (5-3)$$

که  $H_{de} = H_d + K_H$ . ضریب  $C_{de}$  تابعی از زاویه  $\theta$  بوده که از منحنی‌های زیر قابل محاسبه است.



شکل ۳-۸- شمای یک سرریز لبه تیز مثلثی و مقادیر  $K_H$  بر حسب زاویه  $\theta$



شکل ۳-۹- مقادیر  $C_{de}$  بر حسب زاویه  $\theta$

در گام بعد با ارائه رابطه برای ضرایب دبی، به کمک روش رگرسیون غیرخطی نسبت به تعیین ضرایب ثابت و مجهول آن اقدام کرد. این ضرایب به نحوی تعیین می‌شوند که کمترین خطای نسبی (مجموع مربعات خطا) را نسبت به داده‌های آزمایش ایجاد نماید.

$$\frac{H}{P} < 5 \Rightarrow C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H}{P} \quad (۶-۳)$$

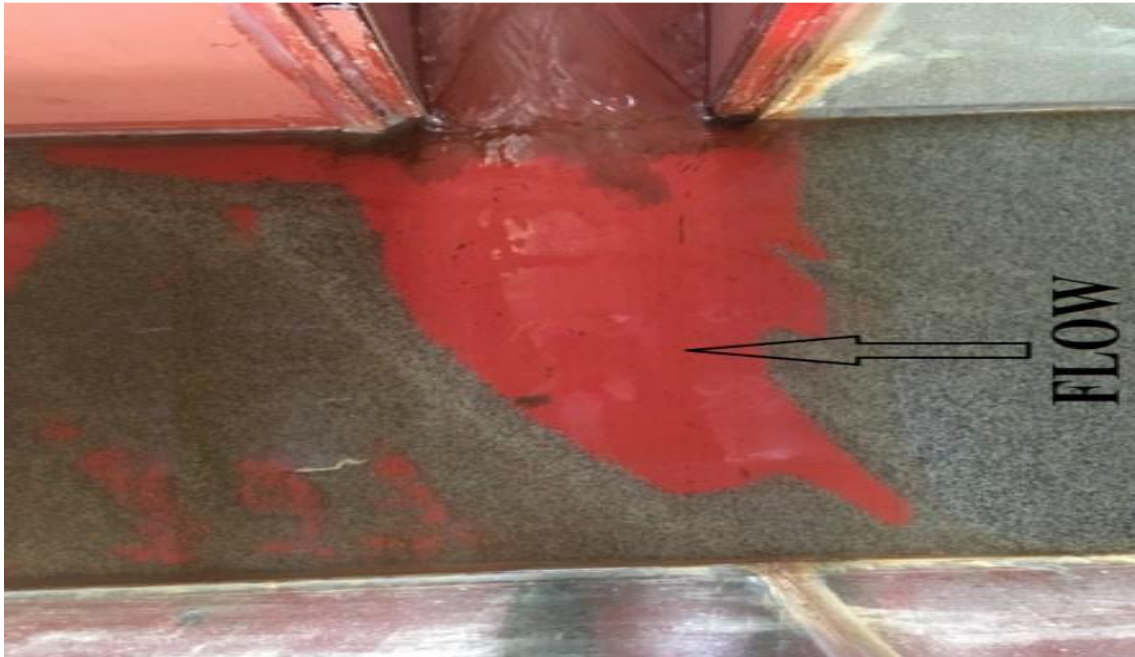
که در روابط فوق:

$Q$ : دبی جریان،  $C_d$ : ضریب آبگذری برای سرریز لبه تیز مستطیلی،  $g$ : شتاب ثقل،  $L$ : طول سرریز،  $H$ : ارتفاع آب روی سرریز و  $P$ : ارتفاع سرریز می‌باشد.

حال با توجه به دبی بدست آمده که همان  $Q_1$  می‌باشد مقدار دبی بدست آمده از فلومتر  $Q_F$  را قرائت کرده و دبی جریان اصلی در فلوم  $Q_m$  تعیین می‌گردد:

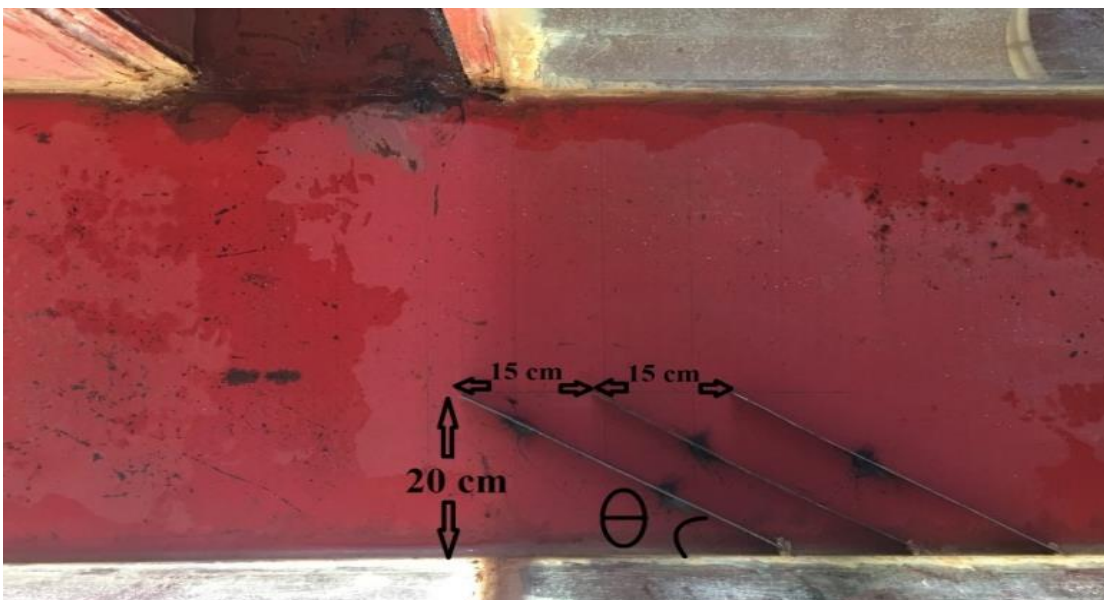
$$Q_m = Q_F - Q_1 \quad (۷-۳)$$

در نهایت پس از رسیدن به دبی و عمق مورد نظر، تا شسته شدن کامل رسوبات آزمایش را ادامه داده سپس دستگاه را خاموش کرده و رسوبات در انتهای کانال اصلی و کانال فرعی جمع‌آوری شد و سپس رسوبات در الک‌های مخصوص زهکشی شده و پس از قرار دادن آن‌ها در گرمخانه، وزن رسوبات اندازه‌گیری شد (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰- شسته شدن رسوبات در کانال اصلی

جهت تعیین تاثیر استفاده از صفحات مستغرق، از سه ورق فلزی به ارتفاع ۵ میلیمتر استفاده شد. جانمایی ورق ها در یک سوم عرض کانال اصلی و چسبیده به دیواره مقابل کانال فرعی در نظر گرفته شد (شکل ۳-۱۱).



شکل ۳-۱۱- ابعاد صفحات مستغرق در کانال اصلی

ابتدا آزمایش‌ها بدون بکارگیری صفحات مستغرق و در سه عرض مختلف کانال فرعی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر و با ثابت نگه داشتن عمق‌های ۵۰، ۷۰ و ۹۸ میلی‌متر برای هر کدام در ۵ دبی متفاوت که منجر به ۵ عدد فرود مختلف شده است به شرح جدول ۳-۱ به صورت ۴۵ آزمایش مجزا صورت پذیرفت. سپس در مرحله بعد با ثابت نگه داشتن عرض کانال انحرافی (۳۰ سانتی متر) آزمایش‌ها در سه مقدار زاویه صفحات مستغرق ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور جریان و با ثابت نگه داشتن عمق‌های ۵۰، ۷۰ و ۹۸ میلی‌متر برای هر کدام در ۵ دبی متفاوت که منجر به ۵ عدد فرود مختلف شده است به شرح جدول ۳-۱ به صورت ۴۵ آزمایش مجزای دیگر صورت پذیرفت. بنابراین در مجموع ۹۰ آزمایش انجام شد. (جزئیات کامل ۹۰ آزمایش در پیوست الف)

جدول ۳-۱- مقادیر متغیرهای عمق، دبی و عدد فرود در آزمایش‌ها

| ردیف | عمق جریان<br>(میلیمتر) | دبی کانال<br>اصلی<br>(لیتر بر ثانیه) | عدد فرود |
|------|------------------------|--------------------------------------|----------|
| ۱    | ۵۰                     | ۱۳/۵                                 | ۰/۶۴     |
| ۲    | ۵۰                     | ۱۵/۲۵                                | ۰/۷۳     |
| ۳    | ۵۰                     | ۱۷                                   | ۰/۸۱     |
| ۴    | ۵۰                     | ۱۸/۵                                 | ۰/۸۸     |
| ۵    | ۵۰                     | ۲۰                                   | ۰/۹۵     |
| ۶    | ۷۰                     | ۲۳                                   | ۰/۶۶     |
| ۷    | ۷۰                     | ۲۵/۵                                 | ۰/۷۳     |
| ۸    | ۷۰                     | ۲۸                                   | ۰/۸      |
| ۹    | ۷۰                     | ۳۱                                   | ۰/۸۹     |
| ۱۰   | ۷۰                     | ۳۴                                   | ۰/۹۸     |
| ۱۱   | ۹۸                     | ۳۸                                   | ۰/۶۶     |
| ۱۲   | ۹۸                     | ۴۲                                   | ۰/۷۳     |
| ۱۳   | ۹۸                     | ۴۶                                   | ۰/۸      |
| ۱۴   | ۹۸                     | ۵۱                                   | ۰/۸۸     |
| ۱۵   | ۹۸                     | ۵۶                                   | ۰/۹۷     |

### ۳-۵- 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 آزمایش‌های انجام گرفته، خطاها به دو دسته خطاهای سیستماتیک و خطاهای انسانی تقسیم می‌گردند:

#### ۳-۵-۱- 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 تolerانس یا دقت اندازه‌گیری تعریف شده می‌باشد. ولی خطای سیستماتیک مستقل از دقت دستگاه و به دلیل ماهیت نقاط برداشت داده بوجود می‌آید. 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 می‌شود و در قسمت‌های شیب‌دار بستر، خط‌کش دستگاه به بالا یا پایین حرکت می‌کند که عکس العمل دستگاه در این شرایط ممکن است باعث بروز خطا شود.

#### ۳-۵-۲- خطای انسانی

عمده‌ترین خطای موجود در این قسمت در تنظیم مختصات برداشت نقاط مربوط به دستگاه سرعت‌سنج و دستگاه پروفایلر می‌باشد. با توجه به اینکه از خط‌کش‌های 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 خط‌کش‌های ذکر شده انجام می‌گیرد در صورت وجود خطا در مختصات نقاط برداشت، میزان خطا ۱ میلیمتر خواهد بود.



### ۳-۶- مدل عددی SSIIM<sup>۱</sup>:

در چند دهه اخیر با پیشرفت کامپیوتر و علوم محاسباتی شاهد حرکتی مستمر از تحقیقات صرفاً شبیه‌سازی به تحقیقات شبیه‌سازی کاربردی، بخصوص در زمینه‌هایی بوده‌ایم که هزینه‌های پیاده‌سازی نسبتاً بالایی داشته و یا به راحتی قابل پیاده‌سازی نیستند. با توجه به این موضوع، علاقه فزاینده‌ای به مدل‌سازی در توسعه تئوریک سیستم‌های عمرانی که مبتنی بر داده‌های تجربی هستند ایجاد شده است. مدل SSIIM قادر به حل معادلات جریان روی یک شبکه سه بعدی با مدل آشفتگی مختلف می‌باشد و از روش حجم کنترل به همراه روش قانون توان یا مرتبه دوم بالادست جهت گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌نماید. این نرم‌افزار همچنین از روش SIMPLE<sup>۲</sup> (یک روش نیمه ضمنی در حل معادلات مرتبط با فشار)، به حل میدان فشار مجهول با استفاده از روش تکرار می‌پردازد. در نرم افزار SSIIM معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات ناویر-استوکس می‌باشند که جهت حل آنها از مدل آشفتگی k-ε استفاده می‌شود.

### ۳-۷- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM)<sup>۳</sup> جزو روش‌هایی است، که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه و روابط ریاضی منتقل می‌کنند. مدل‌سازی به تنهایی هدف نیست و معمولاً پس از طراحی آن، سعی در بهینه‌سازی پارامترهای مدل است. بهینه‌سازی خود روش‌های بسیار متنوعی دارد که می‌توان در یک جمع‌بندی کلی به روش‌های هوش مصنوعی و روش‌ها و مدل‌های ریاضی اشاره کرد. الگوریتم ژنتیک، از روش‌های هوش مصنوعی و گرادیان هسین، از روش‌های ریاضی مورد استفاده قرار گرفته در این پایان‌نامه می‌باشند که تئوری آنها به اختصار در این فصل مورد

---

<sup>۱</sup> Sediment Simulation in Intakes with Multiblock

<sup>۲</sup> Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation

<sup>۳</sup> Response Surface Method

بررسی قرار گرفته است. RSM مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که در ساخت مدل‌های ریاضی از اطلاعات تجربی یا شبیه‌سازیهای عددی استفاده می‌کند [54]. در صورتیکه شبیه‌سازی درست و با دقت طراحی شده باشد و خروجی‌های هر حالت به صورت دقیق گرفته شود، در اکثر موارد می‌توان مدلی ریاضی ساخت که با تعیین ضرایب آن حداقل خطا بین خروجی مدل ریاضی و نتایج شبیه‌سازی وجود داشته باشد. بیان ریاضی روش RSM به ترتیب زیر است [55]:

$$\hat{y}_{(x)} = \sum_{i=1}^N B_i \phi_i(x) \quad (8-3)$$

$\hat{y}_{(x)}$  مقدار خروجی فرمول ریاضی مورد نظر به ازاء بردار ورودی  $x$  است. توابع مشخصه مدل است که در اینجا معلوم فرض شده و در حالت کلی هر تابع ریاضی می‌تواند باشد.  $B_i$  ضرایب هر تابع که باید محاسبه شود.  $L$  مقدار انرژی خطا که معمولاً معیار توان دوم خطا برای آن در نظر گرفته می‌شود. و در نهایت فرمول 8-3 بیان می‌کند که مجموعه‌ای از  $B_i$  قابل قبول است که به ازاء آنها  $L$  حداقل مقدار ممکن شود.  $N$  تعداد جملات فرمول (همان درجه تابع) و  $M$  تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی هستند.  $B_i$  ها را به نام ضرایب رگرسیون نیز می‌شناسند.

### ۳-۷-۱- تابع مشخصه

یکی از مهمترین و درعین حال سخت‌ترین مراحل RSM حدس یا تقریب زدن توابع  $\phi_i$  در معادله 3-8 است. در صورت پیچیدگی بسیار زیاد و ابهام در ماهیت این توابع می‌توان از روش‌هایی مانند  $GEP^1$  و یا الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن تابع مناسب استفاده کرد [56].

در بسیاری از موارد برای سهولت کار و با توجه به اینکه توابع مشخصه عموماً باید توابع خوش‌رفتار واقعی باشند و این چنین توابعی دارای مشتقات در همه نقاط و البته پیوستگی هستند، از بسط تیلور

<sup>1</sup> Gene Expression Programming

و مک‌لورن این توابع به جای استفاده مستقیم از توابع مشخصه کمک گرفته می‌شود. در چنین حالاتی  $\phi_i$  در معادله ۱-۳، ترکیب توان‌های خطی متغیرهای موجود در بردار  $X$  با درجات مختلف می‌باشند. بدیهی است هر چه تابع پیچیده‌تر باشد درجه انتخابی برای ترکیب متغیرها نیز بیشتر خواهد بود. برای نمونه در حالت ۳ متغیره، در درجات ۱ و ۲ خواهیم داشت:

$$N=1 \rightarrow y = \sum_{j=1}^3 B_j X_j^1(x) + b \quad (9-3)$$

به راحتی می‌توان نشان داد در حالت  $N=3$  مجموعاً ۲۰ ضریب  $B_i$  وجود خواهد داشت. با توجه به توضیحات فوق، در این رساله از مدل توابع خطی RSM استفاده شده است. توضیح چگونگی انتخاب درجه این تابع به بخش نتایج واگذار می‌شود. تنها نکته قابل ذکر در این مرحله این است که نباید تعداد ضرایب مجهول مدل از تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی بیشتر شود؛ چرا که بدیهی است در این حالت حل معادله ممکن نخواهد بود.

### ۳-۷-۲- محاسبه ضرایب $B_i$

آخرین قسمت عملیات و به عبارتی ساده‌ترین بخش آن، محاسبه ضرایب  $B_i$  در معادله ۱-۳ و در نهایت عدد ثابت  $b$  است. این مجموعه نقاط می‌تواند بر اساس یک الگوریتم رگرسیون خطی چندگانه<sup>۱</sup> معمولی به راحتی برآورد شود؛ مشروط بر این که کلیه توابع مشخصه در نقاط معین محاسبه و به عنوان متغیرهای متناظر مورد استفاده قرار گیرند. الگوریتم MLR در نهایت مجموع مربعات خطا بین نقاط بدست آمده توسط مدل و نقاط بدست آمده توسط شبیه‌سازی را حداقل می‌کند. تحلیلی و ریاضی بودن MLR، همگرایی و سرعت بسیار بالا در رسیدن به پاسخ، تکرارپذیری مطلق (هیچ قسمت الگوریتم بر مبنای شروع تصادفی نیست) از جمله مزایای آن می‌باشد [56]. با معلوم شدن  $B_i$  ها و  $b$  عملاً مدل

---

<sup>۱</sup> MLR

ریاضی تکمیل شده است. برای محاسبه این ضرایب از روشهای هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک نیز می توان کمک گرفت. مهمترین امتیاز این روش انعطاف پذیری بالاتر آن نسبت به روشهای ریاضی مانند MLR است.

### ۳-۸- الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> (GA)

در این قسمت به بررسی قسمت های مختلف و پارامترهای مهم در الگوریتم ژنتیک می پردازیم.

#### ۳-۸-۱- مشخص کردن محدودیت ها

در شروع باید محدوده مجاز تغییرات هر یک از متغیرها مشخص شود. در هر مثال عملی یا سیستم پارامترها در یک فضای مشخص و محدود تعریف می شوند. دقت هر پارامتر با توجه به نوع سیستم، اهمیت پارامتر، محدودیت های عملی و ... مشخص می شود.

با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک معمولاً در فضای مبنای دو(دودویی) کار می کند تمامی اعداد و محدوده پارامترها باید به مبنای ۲ منتقل شوند [57]. این کار به راحتی می تواند توسط هر یک از نرم افزارهای ریاضی موجود صورت گیرد با قید این نکته که تعداد بیت هنگام انتقال توسط دقت تعریف شده مشخص می گردد. برای هر متغیر داریم:

$$N = \log_2 \left( \frac{X_e - X_f}{Re} \right) \quad (3-10)$$

در صورتی که N عددی یر صحیح باشد باید به نزدیکترین عدد صحیح بیشتر از خود گرد شود. حال می توان یک نگاشت بین اعداد مبنای دو N بیتی و فضای نمونه هر متغیر تعریف کرد که در آن هر عدد مبنای دو معادل یک عدد در این فضا خواهد بود.

---

<sup>۱</sup> Genetic Algorithm

### ۳-۸-۲- مرحله اول

در این مرحله، الگوریتم به تولید جمعیت اولیه<sup>۱</sup> می پردازد [57]. تعداد نسل تولید شده باید برای تمام متغیرها یکسان باشد و معمولاً این تعداد توانی از دو است.

الگوریتمها را در این مرحله به دو گروه کلی تقسیم می کنیم [58]:

الف) انتخاب نمونه‌های اولیه به صورت منظم و با فواصل مساوی در فضای مجاز برای تغییر پارامترها صورت می‌گیرد.

ب) انتخاب نمونه‌های اولیه به صورت کاملاً تصادفی است.

بدیهی است اگر طراح اطلاعاتی درباره محدوده احتمالی پارامترها داشته باشد انتخاب نمونه‌های بیشتر در آن محدوده می‌تواند سرعت همگرایی را بالا ببرد. اما در اینجا فرض بر این است که هیچ پیش‌زمینه اطلاعاتی درباره محدوده جواب وجود ندارد و لذا روش "الف" مزیت خاصی نسبت به روش "ب" نخواهد داشت.

پس از بدست آوردن نمونه‌های اولیه باید در مدل محاسبه شده توسط RSM، هسین یا حتی در شبیه‌سازی واقعی جایگزین شده و مقدار هر دسته به صورت مجزا محاسبه شود.

### ۳-۸-۳- مرحله دوم

در این قسمت بر اساس نتیجه بدست آمده برای هر گروه نیمی از دسته‌ها باید حذف شوند. این حذف می‌تواند به روش‌های مختلفی صورت گیرد [58].

$$i. \quad \frac{N}{2} \text{ نمونه بهتر برداشته می‌شود و } \frac{N}{2} \text{ نمونه ضعیف از نظر طراح حذف می‌شوند.}^2$$

---

<sup>۱</sup> Initial Population

<sup>۲</sup> Ideal Selection

ii. نمونه براساس شانس زندگی انتخاب می گردند.<sup>۱</sup> در این روش هر نمونه بر اساس بهینه‌گی  $\frac{N}{2}$

از نظر طراح امکان باقی ماندن دارد اما این امکان خود متغیری تصادفی است.

iii. در این روش نیز  $\frac{N}{2}$  نمونه بر اساس شانس زندگی انتخاب می گردند. اما در صورتی که نمونه

برتر جزو آن‌ها نباشد نمونه ضعیف‌تر یا یکی از نمونه‌ها به تصادف حذف و نمونه برتر یا نخبه

جایگزین آن می‌شود.<sup>۲</sup>

iv. این روش مشابه قسمت‌های ii و iii است با این تفاوت که یک نمونه می‌تواند چند بار نیز انتخاب

شود.

روش یک بر اساس جهانی ایده آل طرح‌ریزی شده اما روش‌های ۲ و ۳ به واقعیت طبیعت نزدیک‌ترند.

بدیهی است قویترین نمونه ممکن است بر اساس سانحه ای طبیعی از بین برود و یک نمونه ضعیف

ممکن است بر حسب تصادف باقی بماند، گرچه این احتمال ضعیف است اما به هر حال وجود دارد.

نحوه بکارگیری روش یک بسیار ساده است کافیست مقادیر بدست آمده را مرتب و  $N/2$  دسته متناظر

با مقادیر بیشتر را انتخاب کنیم. اما در مورد روش‌های ۲ و ۳ موضوع کمی تفاوت دارد. الگوریتم‌های

مختلفی می‌توان برای چنین کاری پیشنهاد کرد که یکی از روش‌های متداول به شرح زیر است:

الف. یک نگاشت خطی به صورت زیر صورت گیرد:

$$\text{Min} \rightarrow 1 \quad \text{max} \rightarrow \text{max} + 1 - \text{min}$$

ب. به هر مقدار تابع یک فاصله [A B] نسبت داده شود. این فاصله باید برای اعداد بیشتر بزرگتر و برای

اعداد کمتر کوچکتر باشد. علاوه بر آن فاصله‌های انتخابی باید به ترتیب بوده و هیچ همپوشانی نداشته

---

<sup>۱</sup> Roulette wheel (fitness-proportional)

<sup>۲</sup> Elitism

باشند. عدد  $\min$  معادل با فاصله  $[0 \ 1]$  خواهد بود. بقیه بازه‌ها با یک فرمول بازگشتی به صورت زیر قابل محاسبه‌اند:

$$A_i = B_{i-1} \qquad B_i = A_i + f_i \qquad (11-3)$$

حد آخرین بازه را  $B_{\max}$  می‌نامیم.

ج. به تعداد  $N/2$  عدد تصادفی بین  $0$  و  $B_{\max}$  انتخاب می‌کنیم. مقادیر تابع متناظر با فاصله‌هایی که این اعداد در آن قرار می‌گیرند انتخاب می‌شوند. طبیعی است اعداد با فاصله‌های بیشتر احتمال انتخاب بالاتری دارند. اگر دو عدد در فاصله‌ای که مربوط به یک مقدار تابع بود قرار گرفت در قسمتهای ii و iii عمل آن قدر تکرار می‌شود تا  $N/2$  مقدار تابع انتخاب شوند اما در روش iv دو عدد در یک فاصله هم قابل قبولند.

### ۳-۸-۴- مرحله سوم

در این مرحله ابتدا نمونه‌های مربوط به دسته‌هایی که انتخاب نشده‌اند حذف می‌شوند. نمونه‌های باقی مانده یا همان نمونه‌های انتخابی مرحله دوم در این قسمت دو به دو با هم ترکیب شده و  $N/2$  نمونه جدید می‌سازند. این ترکیب یا همپوشانی<sup>۱</sup> می‌تواند بروش‌های مختلفی صورت گیرد اما در هر صورت باید گروهی که شامل مقادیر پارامترها در دسته‌های انتخاب شده بود ابتدا به مقادیر متناظر مبنای دوشان تبدیل شده و با هم ترکیب شوند. مقادیر مبنای دو پارامترها در این مرحله به صورت متوالی ترکیب شده و تشکیل یک عدد واحد در مبنای دو را می‌دهند که نماینده دسته مربوط به آن پارامترها است. در حقیقت این عدد معادل سلول بنیادی (کروموزوم) در طبیعت است که همه مشخصات پارامترها را در خود دارد. هر دو عدد (دو سلول بنیادی) با هم ترکیب و دو عدد جدید می‌سازند (معادل آمیزش

---

<sup>۱</sup> Cross Over

زوجین و تولید دو بچه) که این دو عدد جدید مشخصات خود را از سلول‌های اولیه به ارث می‌برند. تفاوت الگوریتم‌ها در این قسمت در نوع ترکیب دو عدد هنگام تولید نمونه‌های جدید و نحوه انتخاب سلول‌هایی است که قرار است با هم ترکیب شوند [59].

i. دو دسته‌ای که قرار است ترکیب شوند به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. به عبارت دیگر  $N/4$  عدد تصادفی از 1 تا  $N/2$  انتخاب و دو بدو با هم در نظر گرفته می‌شوند.

ii. انتخاب به صورت ترتیبی. دو دسته‌ای که بهترین مقدار را دارند با هم ترکیب و به همین صورت تا انتها دو بدو دسته‌ها با هم در نظر گرفته شوند.

روش انتخاب دسته‌ها تأثیر مهمی در سرعت و یا دقت الگوریتم ایفا نمی‌کند.

نحوه ترکیب دو عدد (سلول) اولیه و تولید اعداد جدید نیز به دو دسته کلی زیر تقسیم می‌شود.

a. نقطه همپوشانی مشخص نیست و به صورت تصادفی در کروموزوم‌های والدین<sup>۱</sup> انتخاب می‌گردد اما یک نقطه است<sup>۲</sup>. این عدد در هر زوج والدین و در هر بار تکرار تفاوت می‌کند. الگوریتم در هر بار اجرا باید به تعداد  $N/4$  عدد تصادفی بین ۱ و تعداد کل بیت عدد ادغام شده تولید کند. هر زوج دسته در نقطه همپوشانی خود شکسته و بیت‌های آنها با هم جابجا می‌شوند.

b. مشابه a است با این تفاوت که چند نقطه همپوشانی در هر زوج داریم<sup>۳</sup> و هر زوج دسته به این ترتیب در چند نقطه می‌شکنند و جابجا می‌شوند.

اگر از روش همپوشانی یک نقطه‌ای استفاده کنیم و فرض کنیم هر دو دسته متوالی یک زوج والدین تشکیل می‌دهند نتیجه به صورت جدول ۳-۲ خواهد بود:

---

<sup>۱</sup> Selected Population

<sup>۲</sup> Single point crossover

<sup>۳</sup> Multi point crossover



جدول ۳-۲: یک مثال ساده از همپوشانی یک نقطه ای

| شماره دسته    | نقطه همپوشانی | دسته های ترکیب شده و دسته های بدست آمده              |
|---------------|---------------|--|
| زوج اول       | ۴۱            | <u>00101101001000000000111101001000010110110</u>     |
|               |               | <u>1001110110001100011001011011111011110101110</u>   |
| بچه تولید شده |               | 00101101001000000000111101001000010110110 <u>10</u>  |
|               |               | 100111011000110001100101101111101111010111 <u>10</u> |
| زوج دوم       | ۱۱            | <u>00111011001</u> 011011101010111010010011101111    |
|               |               | <u>01110001110</u> 11000011001111101000011100000101  |
| بچه تولید شده |               | 00111011001 <u>11000011001111101000011100000101</u>  |
|               |               | 01110001110 <u>011011101010111010010011101111</u>    |

در جدول ۳-۲ شماره های متوالی که والدین محسوب می شده اند ابتدا و در زیر آنها دسته های حاصل نشان داده شده است. نقطه همپوشانی نیز که برای هر زوج تابعی تصادفی است در ستون دوم نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که دو زوج از نقطه همپوشانی شکسته و بیت های آنها جابجا شده است.

جدول ۳-۳: یک مثال ساده از همپوشانی پنج نقطه ای

|     |   |  |
|-----|---|--|
| زوج | ۸، ۲۱، ۳۳، ۳۹، ۴۲                           | <u>111001000010110000011101101000111111011001</u>  |
|     |   | <u>0111110001101011110010011000110001101101011</u> |
| زوج | ستون ۷ از بیت ۱ تا ۸، ۲۲ تا ۳۳،<br>۴۲ تا ۴۰ | <u>11100100</u> <u>101101000111</u> <u>100</u>     |
|     | ستون ۸ از بیت ۹ تا ۲۱، ۳۴ تا<br>۴۳، ۳۹      | <u>0110101111001</u> <u>110110</u> <u>1</u>        |
|     | یکی از دو نمونه حاصل                        | <u>111001000110101111001101101000111101101001</u>  |

### ۳-۸-۵- مرحله چهارم

دسته‌بندی بعدی بر اساس عاملی به نام جهش<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد [59]. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد در سیستم‌های نسبتاً پیچیده، جهش یا تغییر ناگهانی کروموزوم‌ها (بیت‌ها) هنگام ترکیب، عامل مهمی در رسیدن به جواب دقیق است. در این روش به ازاء احتمال مشخص و از قبل تعریف شده، اما بسیار کمی ممکن است والدین هنگام بوجود آوردن بچه به صورت نامتعارف عمل کنند و یک بیت که در حالت نرمال یک یا صفر است به صورت برعکس به صفر یا یک تبدیل شود.

احتمال جهش براساس پیچیدگی ساختار تعیین می‌شود و در ساختارهای با تغییرات ناگهانی این احتمال زیاد و در ساختارهای معمولی کم است. هدف اصلی این کار جلوگیری از همگرایی سیستم به نقاط ماکزیمم و مینیمم محلی هنگام رسیدن به جواب، به خصوص در سیستم‌های دارای تعداد زیاد ماکزیمم و مینیمم محلی نزدیک به هم، است. تعیین صحیح احتمال جهش برای آنکه الگوریتم، هم سرعت همگرایی زیاد داشته باشد و هم به جواب دقیق منجر شود، اهمیت زیادی دارد چرا که در صورت زیاد بودن عدد انتخاب شده، زمان رسیدن به جواب دقیق بسیار طولانی است و در صورتی که عدد کم انتخاب شود جواب از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. تأثیر این پارامتر را به صورت کامل در شبیه‌سازی‌ها بررسی خواهیم کرد.

### ۳-۸-۶- مرحله پنجم

آخرین مرحله الگوریتم شرط اتمام عملیات و اعلام جواب محسوب می‌شود [59]. هنگام نزدیک شدن الگوریتم به جواب نهایی نمونه‌ها به سمت هم میل کرده و در نهایت والدین و نوزادان همه به صورت یک عدد ثابت در می‌آیند. در این حالت در صورتی که هنوز نمونه‌ها با هم فاصله زیادی داشته باشند کلیه مراحل ۲ به بعد باید از نو تکرار شود. ابتدا پارامترهای مربوط به ستون‌های تازه تولید شده از عدد

---

<sup>۱</sup> Mutation

مربوط به ستون مربوطه استخراج می‌شوند. این عمل عکس کاری است که در مرحله سوم صورت گرفت. این اعداد مبنای دو دوباره باید به مقادیر متناظر در فضای مجاز تغییرات پارامتر تبدیل شوند. با معلوم بودن دسته  $N$  تایی نمونه‌ها کارها دوباره از نو باید تکرار شود. یعنی بازای مقادیر پارامترها مسأله حل،  $N/2$  نمونه برتر استخراج و همپوشانی صورت گیرد. این چرخه تا زمانی تکرار می‌شود که شرط اتمام عملیات محقق شود. بسته به نظر طراح می‌توان شرایط مختلفی را برای اتمام چرخه تکرار قرار داد. در زیر چند نمونه از این شرط‌ها آورده شده است:

i. شباهت نمونه‌ها به یکدیگر. هنگامی که  $N/2$  نمونه باقی مانده از حد معینی که دقت یا بهینگی جواب آن را مشخص می‌کند به هم نزدیکتر شدند برنامه از چرخه تکرار خارج شده و نمونه برتر را به عنوان جواب اعلام می‌کند.

ii. نزدیکی جواب‌ها به یکدیگر. ممکن است نمونه‌ها به هم نزدیک شوند اما به علت شیب بسیار زیاد تابع در نزدیکی نقطه بهینه هنوز اختلاف زیادی بین مقدار بهینه با مقدار نمونه برتر موجود باشد و این موجب خطا خواهد شد. در این موارد معیار، اختلاف بین مقدار نمونه برتر و ضعیف‌ترین نمونه باقی مانده محک خوبی محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که این اختلاف باید به درصد سنجیده شود در غیر اینصورت کارایی نخواهد داشت. برای نمونه فرمول زیر می‌تواند شرط قابل قبولی برای پایان الگوریتم محسوب شود.

$$\frac{(f_{n/2} - f_1)}{f_1} < \varepsilon \quad (12-3)$$

در رابطه ۱۲-۳،  $f_{n/2}$  مقدار نمونه برتر و  $f_1$  مقدار کمترین نمونه در نمونه‌های باقی مانده فرض می‌شوند.  $\varepsilon$  هر چه کمتر انتخاب شود دقت جواب بدست آمده بیشتر است اما به همان نسبت تعداد تکرار لازم برای رسیدن به جواب بیشتر خواهد بود. مقادیر  $\varepsilon$  معمولاً کمتر از ۰/۱ انتخاب می‌شود. پس از اتمام این مرحله نمونه‌های مربوط به بهترین جواب به عنوان نقطه بهینه اعلام می‌شوند.

### ۳-۹- ماتریس هسین

الگوریتم‌های ریاضی مختلفی برای مینیمم کردن توابع چند متغیره با قبول قیود خطی وجود دارد که این قیود می‌تواند شامل سقف و کف برای متغیر و یا جمع و تفریق خطی تعدادی از متغیرها باشد. این الگوریتم‌ها عمدتاً بصورت همزمان از برنامه‌ریزی غیرخطی و صفر کردن مشتقات جزئی استفاده می‌کنند. پایه این روش‌ها بر ماتریس هسین<sup>۱</sup> استوار است.

ماتریس هسین، ماتریسی مربعی، متشکل از مشتق دوم یک تابع چند متغیره نسبت به کلیه متغیرهای دخیل و مشتق جزئی ترکیب هر جفت دوتایی از متغیرها است.

در حقیقت ماتریس هسین، خمیدگی<sup>۲</sup> یا انحنای یک تابع چند متغیره را در فضای  $\mathbf{n}$  بعدی مدل می‌کند. اگر  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  یک تابع با مقادیر حقیقی باشد آنگاه  $H(f)$  ماتریس هسین خواهد بود.

$$H(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (۱۳-۳)$$

ماتریس هسین در حقیقت ماتریس ژاکوبین گرادیان  $\mathbf{f}$  می‌باشد. در روش‌های بهینه‌سازی مبنی بر الگوریتم نیوتن ضرایب درجه دوم بسط تیلور تابع ظاهر می‌شود، که همین ضرایب منجر به استفاده از ماتریس هسین می‌گردد.

$$y = f(x + \Delta x) \approx f(x) + j(x)\Delta x + \frac{1}{2}\Delta x^T H(x)\Delta x \quad (۱۴-۳)$$

<sup>۱</sup> Hessian Matrix

<sup>۲</sup> Curvature

که در رابطه فوق،  $J(x)$  ماتریس ژاکوبین،  $\Delta x$  ماتریس تغییرات و  $H(x)$  ماتریس هسین است. در عمل محاسبه ماتریس هسین بصورت عددی با توجه به تعداد متغیرها، کاری زمانبر است و لذا الگوریتم‌های شبه نیوتنی برای محاسبه تقریبی ماتریس هسین [60] بسط داده شده است که از جمله می‌توان به الگوریتم BFGS اشاره کرد. برای محاسبه مشتق‌ها در تابع هسین چند فرض ضروری وجود دارد.

الف. مشتقات اول و دوم  $f$  در کلیه بازه‌های تمام متغیرها باید پیوسته باشد، بدیهی است به ازای این فرض داریم:

$$f(x, y) = f(y, x)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} \quad (۱۵-۳)$$

ب. اگر مشتق در برخی نقاط صفر شود یا کل گرادیان  $f$  به ازای نقاط خاصی صفر شود آن نقطه را یک نقطه بحرانی می‌نامیم که طبیعی است گذر از چنین نقطه‌ای در حین حل می‌تواند منجر به واگرایی الگوریتم و عدم رسیدن به جواب شود. پس از محاسبه مشتق، برای کنترل قیود یک تست مشتق دوم یا اصطلاحاً هسین حاشیه دار<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در صورتی که شرطی مانند  $c = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  یک

قید محسوب شود آنگاه داریم:

$$H(f, g) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial g}{\partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial g}{\partial x_n} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

<sup>۱</sup> Bordered Hessian

اگر  $m$  قید برای تابع در نظر بگیریم در قسمت بالا سمت چپ ماتریس یک بلوک  $m \times m$  از درایه‌های صفر خواهیم داشت.

در مسأله مورد بحث در این رساله، با توجه به عملی بودن مدل و شرایط موجود، از هیچ نقطه بحرانی در ماتریس هسین عبور نمی‌کنیم و لذا تحت شرایط مسأله، الگوریتم کاملاً همگرا است.

بدیهی است با توجه به ماهیت و شرایط متفاوت،

دو روش ماتریس هسین و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به جوابهای کاملاً متفاوتی منجر شود و باید هر دو جواب از نظر درستی و بهتر بودن مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳-۱۰- معیار خطای مدل

خطای عددی در مدل RSM می‌تواند بخاطر انتخاب توابع پایه، نقاط شبیه‌سازی و یا عوامل

دیگر باشد. دقت مدل را می‌توان به کمک چندین معیار سنجید. به عنوان مثال، خطای نسبی<sup>۱</sup> (RE) با

معادله‌ی (۱۷-۳) بیان می‌شود:

$$RE = \frac{[\hat{y}(x) - y(x)]}{y(x)} \quad (17-3)$$

بطوریکه  $\hat{y}(x)$  تقریب مبتنی بر مدل بوده و  $y(x)$  پاسخ بدست آمده از نتایج تجربی است.

ضمناً می‌توان از روش‌های تحلیل آماری نظیر ANOVA<sup>۲</sup> برای بررسی قابلیت مدل جهت تشخیص

اثرات پارامترهای طراحی روی پاسخ کمک گرفت. می‌توان از برخی پارامترهای آماری که در زیر به

تعدادی از آنها اشاره شده است نیز جهت تخمین خطا استفاده کرد

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (18-3)$$

---

<sup>۱</sup> Relative error

<sup>۲</sup> Analysis of variance

$$SST = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (19-3)$$

که  $\bar{y}_i$  میانگین مقادیر تجربی  $y_i$  ها می باشد. توانایی مدل توسط پارامترهای زیر بررسی می‌شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (20-3)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{m-1}{m-p-1} \quad (21-3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{m-p-1}} \quad (22-3)$$

P تعداد ترم‌های غیرثابت در مدل است [61]. هر چه مقدار  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  بیشتر و RMSE<sup>۱</sup> کمتر باشد

جواب دقیق‌تر است. از جمله معیارهای متداول دیگر MSE محسوب می‌شود که عبارت است از

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ir} - Y_{im})^2 \quad (23-3)$$

یک معیار متداول دیگر ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد که به عنوان معیار شباهت استفاده

می‌شود و عکس آن معادل با معیار خطا خواهد بود. ضریب همبستگی پیرسون عددی بین ۱ و -۱

است که هر قدر مطلق آن شباهت و یک منفی قدر مطلق ضریب همبستگی معادل اختلاف یا همان

خطا خواهد بود. رابطه ضریب همبستگی پیرسون در زیر آورده شده است:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (24-3)$$

---

<sup>۱</sup> Root mean square error

فصل چهارم:

نتایج و تفسیر آنها



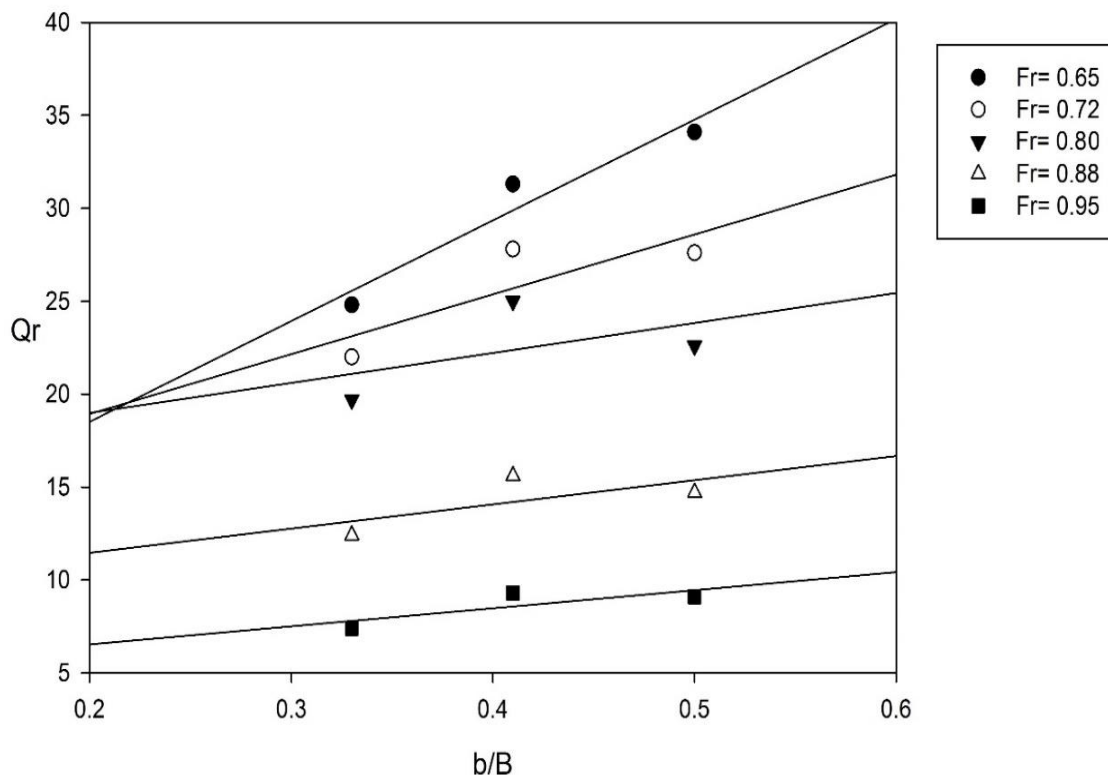
## ۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا با توجه به پارامترهای موثر بدست آمده از آنالیز ابعادی به تاثیر و تفسیر هر کدام از آنها پرداخته شده است، بطوریکه ابتدا تاثیر عرض کانال انحرافی و زاویه صفحات مستغرق در اعماق مختلف بر روی دبی انحرافی و رسوب انحرافی و ضریب عملکرد تونل‌های انتقال رسوب پرداخته شده است و نتایج برای حالت وجود و عدم وجود صفحات مستغرق مقایسه کلی شده است، در ادامه برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل با پیاده‌سازی روش الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین، ۴ فرمول و در نهایت فرمول بهینه با کمترین درصد خطا و بیشترین ضریب همبستگی ارائه گردیده است و در این فصل همچنین مدل عددی SSIM ابتدا توسط ۱۸ آزمایش واسنجی شد و پس از صحت‌سنجی برای شرایط جدیدی که امکان آزمایشات جود نداشت شبیه‌سازی شده و در نهایت آنالیز حساسیت پارامترها انجام شده است.

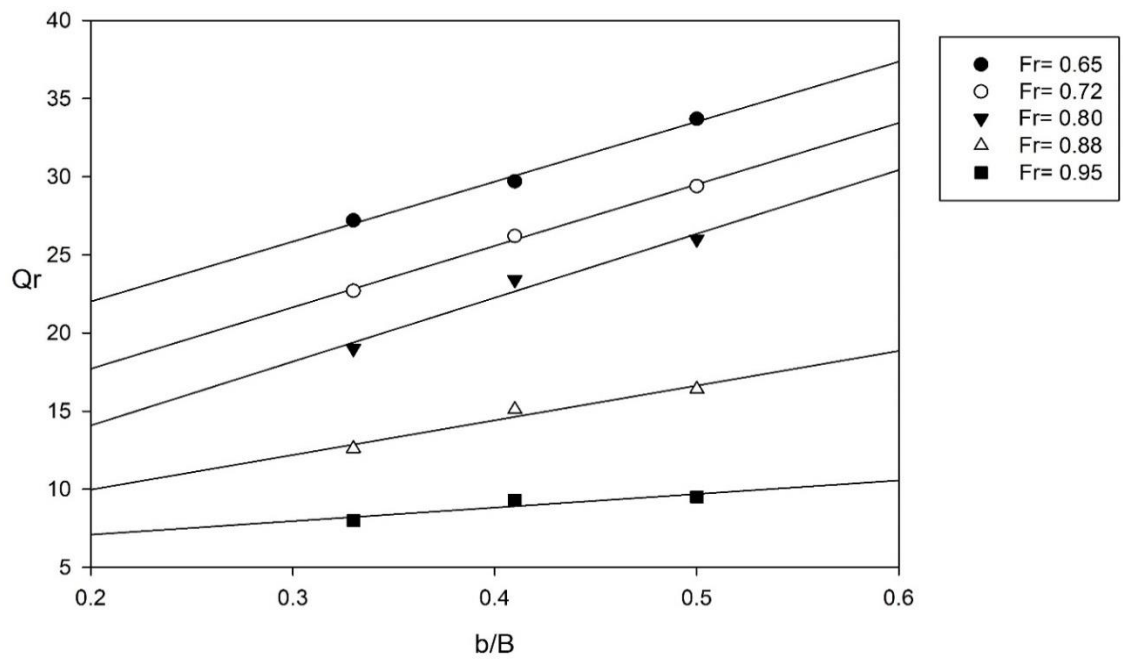
## ۴-۲ تاثیر تغییرات عرض کانال انحرافی

شکل ۴-۱ الی ۴-۳ تاثیر تغییر عرض کانال انحرافی را بر میزان دبی منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض کانال انحرافی میزان انحراف آب به کانال فرعی بیشتر شده است و این امر مستقل از عمق جریان بوده و برای تمام اعماق صادق است. علت این امر آن است که با افزایش عرض کانال انحرافی، قدرت چرخش جریان و نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد و سبب می‌شود مقادیر بیشتری از دبی به کانال فرعی وارد شود. عدد فرود عاملی تأثیرگذار بر میزان دبی انحرافی جریان به کانال انتقال رسوب است و با افزایش عدد فرود، نسبت دبی انحرافی برای هر سه عرض کانال انحرافی و سه عمق آزمایش کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان اصلی در بالادست سبب افزایش سرعت در کانال اصلی می‌شود (در عمق ثابت) و افزایش سرعت سبب کاهش نیروی گریز از مرکز و قدرت چرخش جریان به سمت کانال انحرافی خواهد شد. با

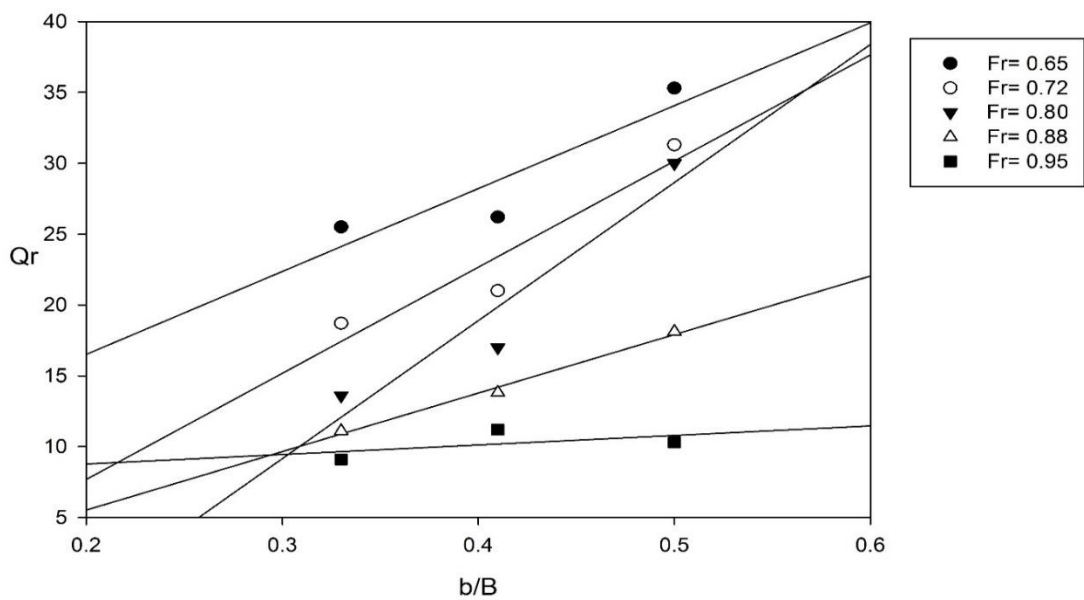
بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی منحرف شده به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها مقادیر دبی منحرف شده تقریباً ثابت هستند در صورتی که در پایین‌ترین فرود، اختلاف در درصد دبی انحرافی مشهود است و با ۱/۵ برابر کردن عرض کانال انحرافی میزان دبی منحرف شده برای  $\frac{y}{B} = 0,08$  به میزان ۹/۳ درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,12$  به میزان ۶/۵ درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,16$  به میزان ۹/۸ درصد افزایش می‌یابد. کاهش ۳۳ درصدی عرض کانال انحرافی می‌تواند کاهش ۸/۵ درصدی دبی انحرافی به کانال فرعی را به دنبال داشته باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که افزایش عدد فرود به همراه کاهش عرض کانال انحرافی می‌تواند در کاهش دبی انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد.



شکل ۴-۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,08$

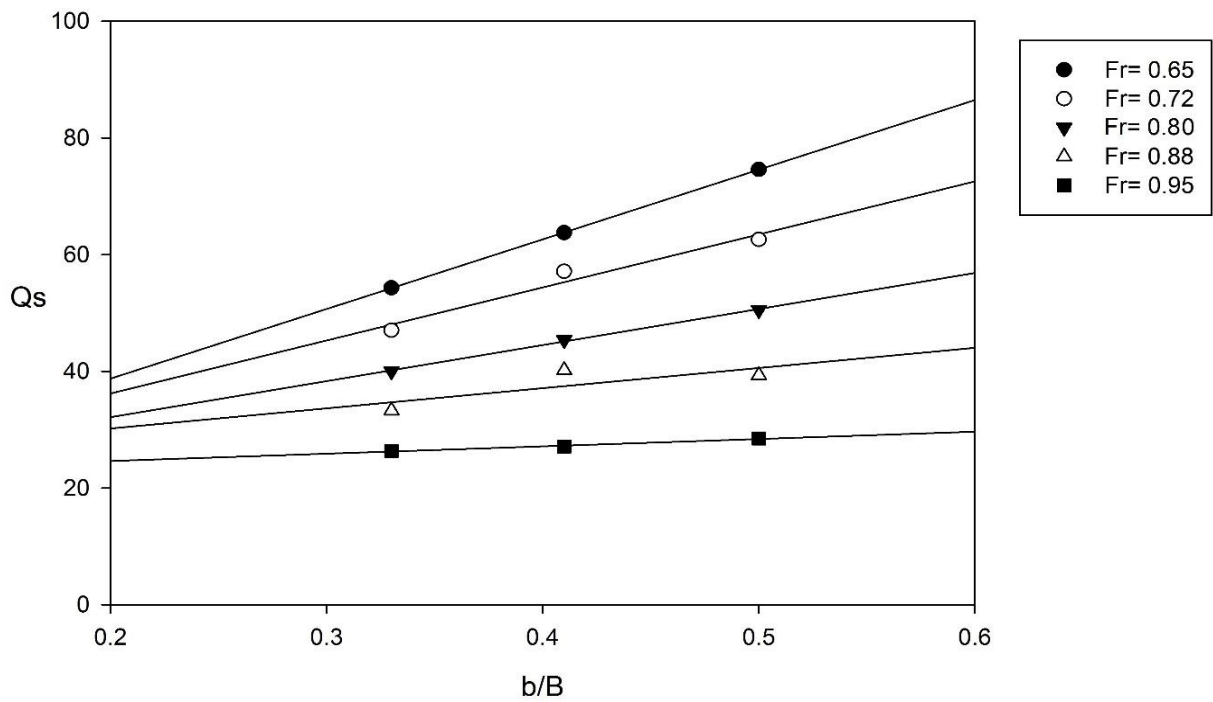


شکل ۴-۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.12$

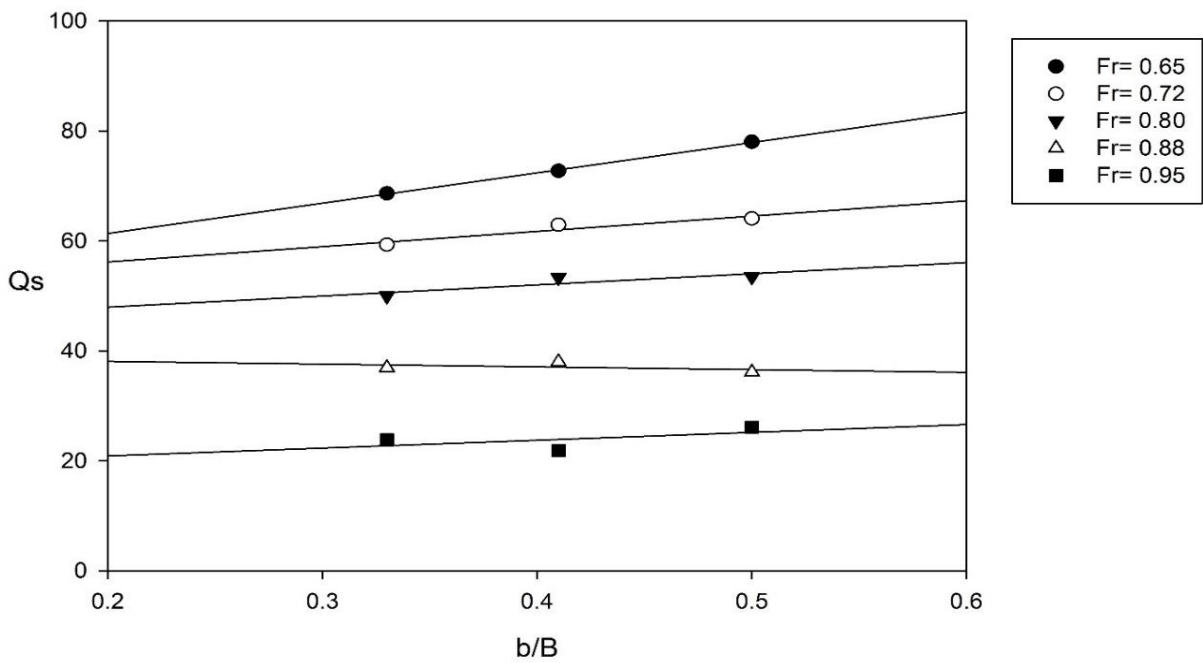


شکل ۴-۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.16$

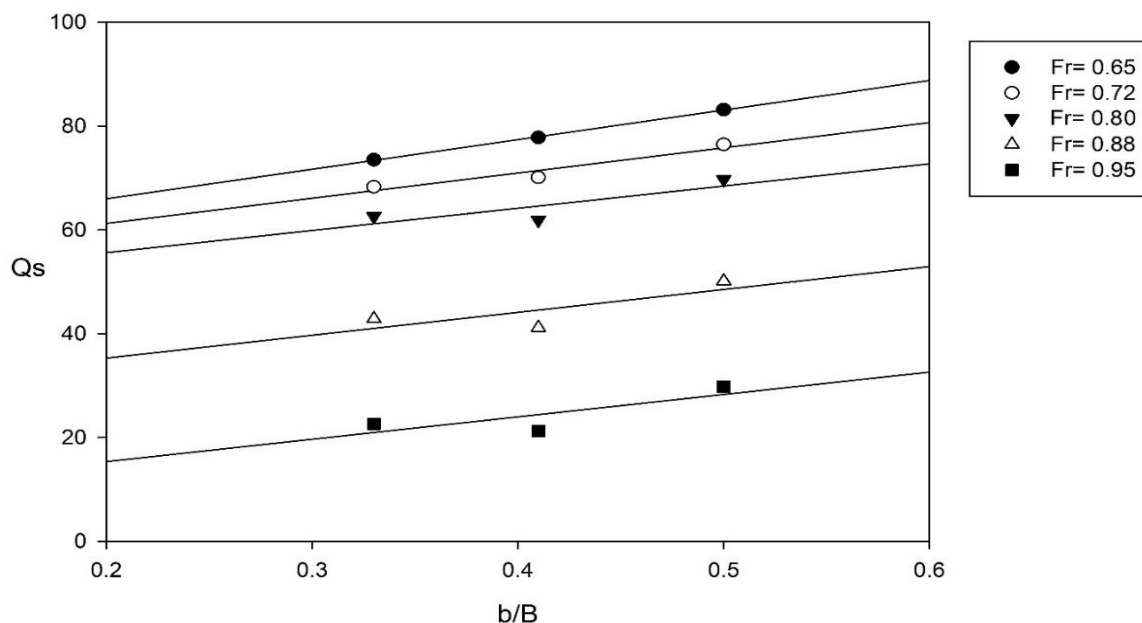
شکل ۴-۴ الی ۶-۴ تأثیر تغییر عرض کانال انحرافی را بر میزان رسوب منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود جریان و کاهش عرض کانال انحرافی میزان رسوب منحرف‌شده کاهش می‌یابد و این امر مستقل از عمق جریان است. جریان پرسرعت در سطح آب نسبت به جریان کم‌سرعت کف کانال احتیاج به نیروی بیشتری برای تغییر مسیر دارد. هر چه نسبت سرعت جریان ورودی به انشعاب به سرعت جریان در کانال اصلی افزایش پیدا کند بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی که عامل مؤثر در انتقال رسوبات است، افزوده می‌گردد. افزایش عدد فرود جریان به دلیل کاهش نیروی گریز از مرکز سبب کاهش سرعت ورودی به کانال انحرافی می‌گردد و این امر از قدرت جریان ثانویه ایجادشده در کانال فرعی و همچنین انتقال رسوبات در آن می‌کاهد. از طرفی افزایش عرض کانال سبب چرخش بهتر آب به کانال فرعی شده و سبب انتقال بهتر رسوبات می‌شود. با بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۴ درصدی رسوب منحرف‌شده به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها مقادیر رسوب منحرف‌شده تقریباً ثابت هستند در صورتی‌که در پایین‌ترین فرود، اختلاف در درصد رسوب انحرافی مشهود است و با  $1/5$  برابر کردن عرض کانال انحرافی میزان رسوب منحرف‌شده برای  $0,08 = \frac{V}{B}$  به میزان  $20/3$  درصد و برای  $0,12 = \frac{V}{B}$  به میزان  $9/37$  درصد و برای  $0,16 = \frac{V}{B}$  به میزان  $9/68$  درصد افزایش می‌یابد. افزایش  $1/5$  برابر عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش ۱۳ درصدی رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که کاهش عدد فرود به همراه افزایش عرض کانال انحرافی می‌تواند در افزایش رسوب انحرافی به کانال فرعی مؤثر باشد



شکل ۴-۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $y/B = 0.08$



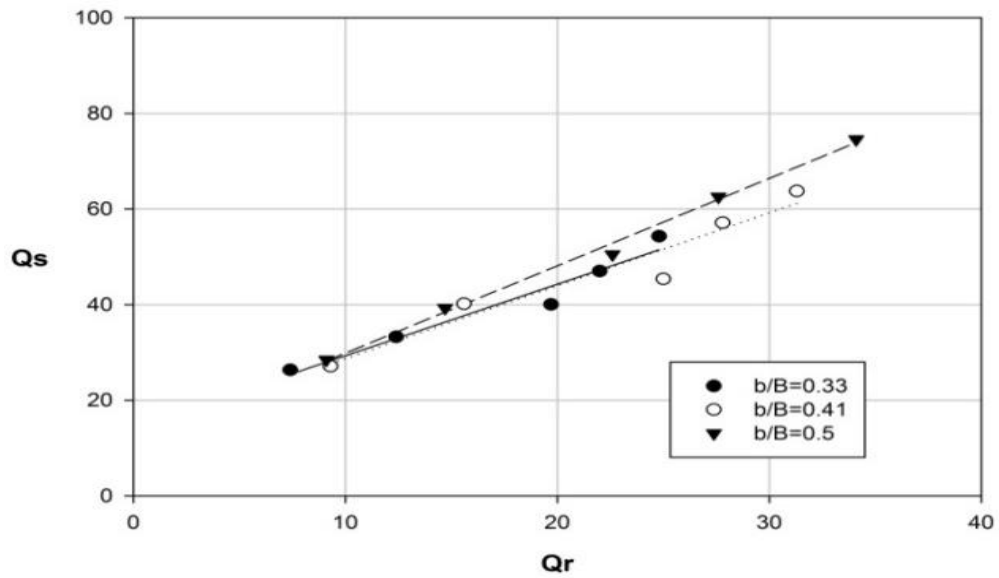
شکل ۴-۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $y/B = 0.12$



شکل ۴-۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.16$

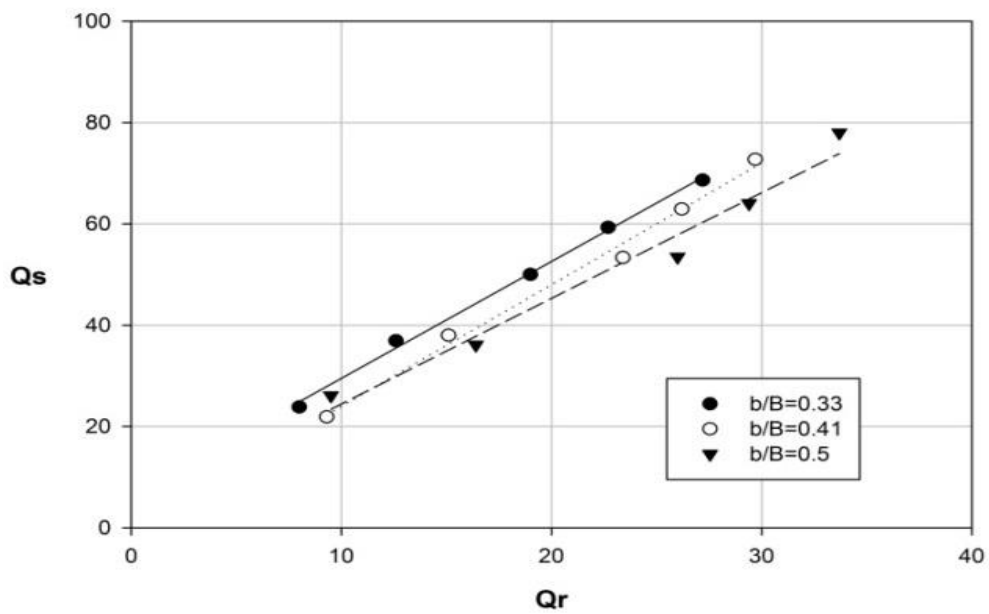
با توجه به نتایج کمی می‌توان گفت که هرچه قدر میزان رسوب انحرافی بیشتر و دبی منحرف‌شده کمتر باشد نتایج بهتر بوده و عملکرد مناسب‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر هرچه قدر شرایط هیدرولیکی و هندسی به گونه‌ای باشد که در دبی انحرافی کمتر، رسوب بیشتری منحرف شود بهترین بازده حاصل می‌شود. بنابراین با تعریف پارامتر  $\eta$  (نسبت رسوب منحرف‌شده به دبی انحرافی) به عنوان عملکرد، به بررسی شرایط آزمایش‌ها پرداخته شد.

شکل ۴-۷ الی ۴-۹ نشان دهنده مقایسه میزان عملکرد کانال انحرافی در حالت‌های ذکر شده است. با توجه به شکل شیب هر نمودار بیانگر مقدار پارامتر عملکرد خواهد بود و هر چه این مقدار بیشتر باشد کانال فرعی رسوب بیشتر و دبی کمتری را منحرف می‌کند. شرایطی مطلوب است که مقدار پارامتر عملکرد آن بزرگ‌تر از ۱ باشد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که در همه حالات مقادیر پارامتر عملکرد بزرگ‌تر از ۱ بوده و از مقدار  $2/28$  الی  $3/5$  متغیر است و در نتیجه کانال انحرافی ۹۰ درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد.



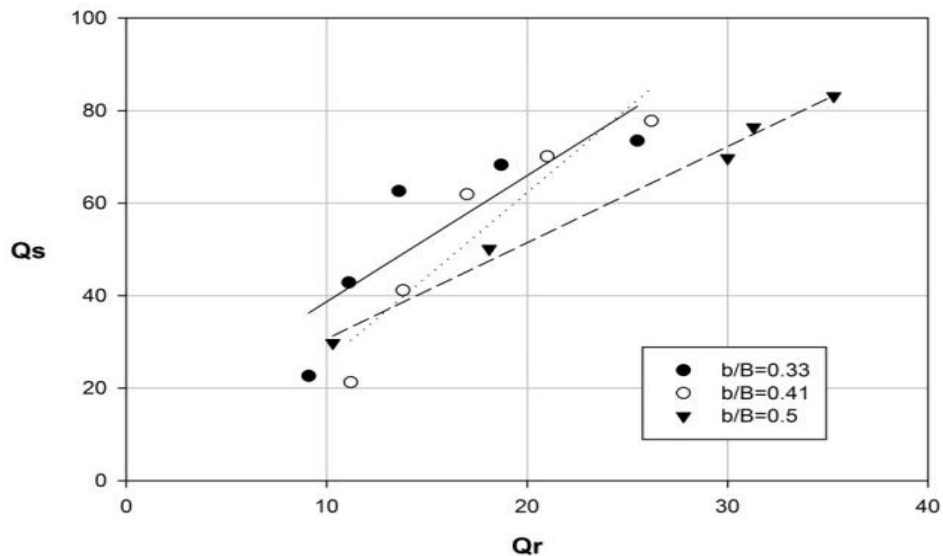
شکل ۴-۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,08$$



شکل ۴-۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

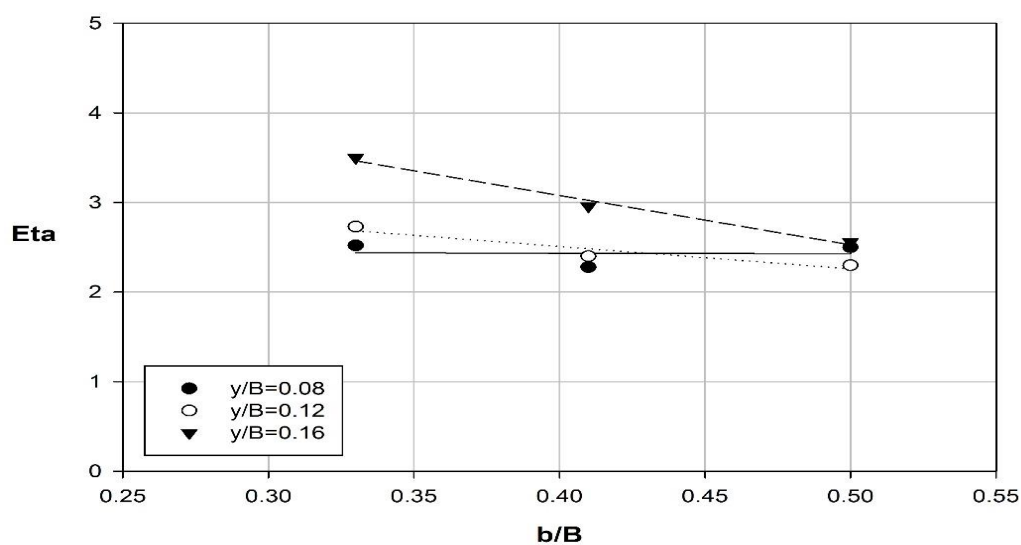
$$\frac{y}{B} = 0,12$$



شکل ۴-۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,16$$

شیب خط نشان داده در شکل‌های ۴-۷ الی ۴-۹ بیانگر متوسط مقدار عملکرد در بازه عدد فرود آزمایش‌ها است. بنابراین جهت تعیین حالت بهینه، مقدار عملکرد برای هر حالت (شیب هر کدام از نمودارهای ۴-۷ الی ۴-۹) محاسبه شده و تغییرات آن برحسب پارامتر بدون بعد عمق در شکل ۴-۱۰ ترسیم شده است.



شکل ۴-۱۰- تغییرات پارامتر عملکرد بر حسب عمق جریان برای عرض‌های مختلف کانال انحرافی



با توجه به شکل ۴-۱۰ می‌توان دریافت در صورتی که عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر  $0/5$  باشد مقدار عملکرد با افزایش عمق جریان تغییر چندانی نمی‌کند اما با کاهش عرض کانال انحرافی اثر افزایش عمق محسوس تر می‌باشد بطوریکه برای دو مقدار  $0/41$  و  $0/33$  به شدت تأثیرگذار بوده و با افزایش پارامتر عملکرد مشاهده می‌شود. بنابراین با افزایش عمق جریان با مقدار عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر  $0/33$  می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به گونه‌ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند.

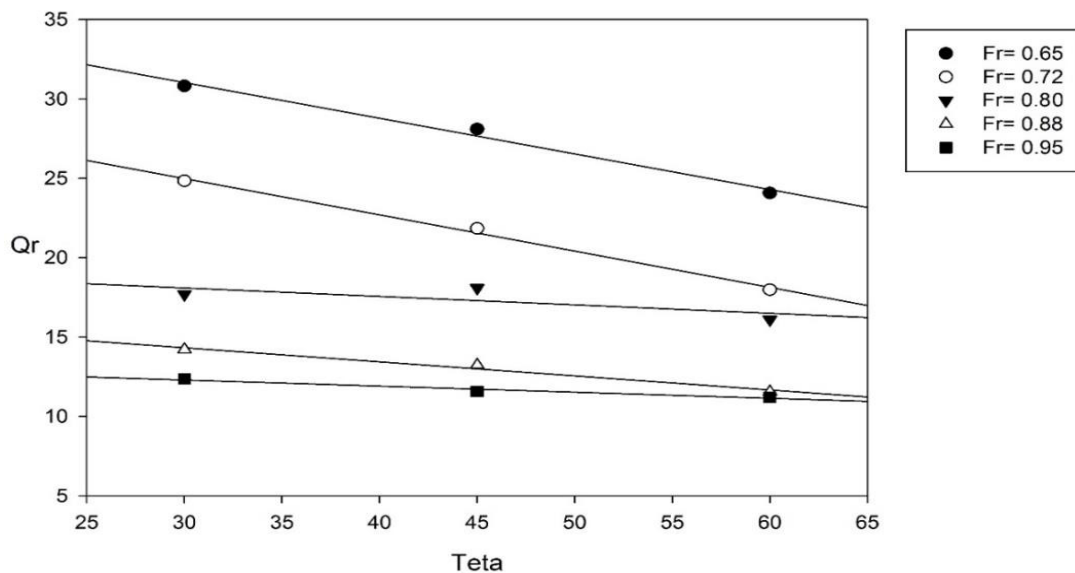
### ۳-۴ تأثیر زاویه صفحات مستغرق

شکل ۴-۱۱ الی ۴-۱۳ تاثیر تغییر زاویه صفحات مستغرق را بر میزان دبی منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه صفحات مستغرق میزان انحراف آب به کانال فرعی کاهش می‌یابد ولی با افزایش عمق جریان این تغییر نامحسوس می‌شود. علت این امر آن است که با افزایش زاویه صفحات، طول صفحه کاهش می‌یابد و سبب می‌شود که اندرکنش جریان و صفحات کمتر شده و قدرت چرخش جریان و نیروی گریز از مرکز کمی کاهش یابد و مقادیر کمتری از دبی به کانال فرعی وارد شود.

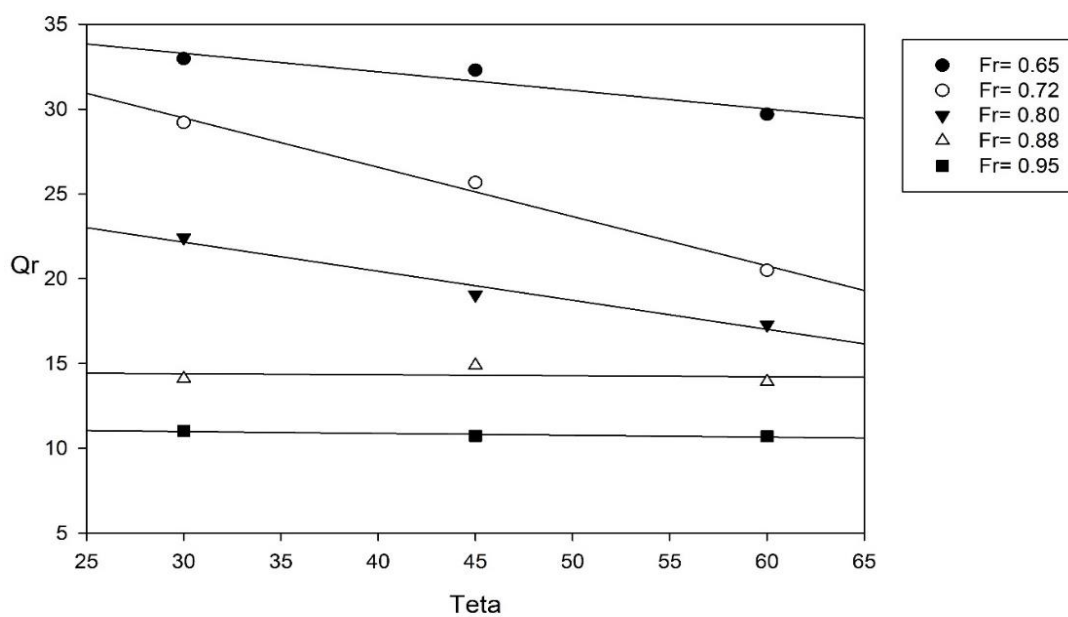
عدد فرود عاملی تاثیر گذار بر میزان دبی انحرافی جریان به کانال انتقال رسوب می‌باشد و با افزایش عدد فرود، نسبت دبی انحرافی برای هر سه زاویه و هر سه عمق آزمایش کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود جریان اصلی در بالادست سبب افزایش سرعت در کانال اصلی می‌شود (در عمق ثابت) و افزایش سرعت سبب کاهش نیروی گریز از مرکز و قدرت چرخش جریان به سمت کانال انحرافی خواهد شد.

با بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به‌طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی منحرف شده به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها مقادیر دبی منحرف شده تقریباً ثابت هستند و در پایین‌ترین عدد فرود نیز اختلاف در درصد دبی انحرافی وجود

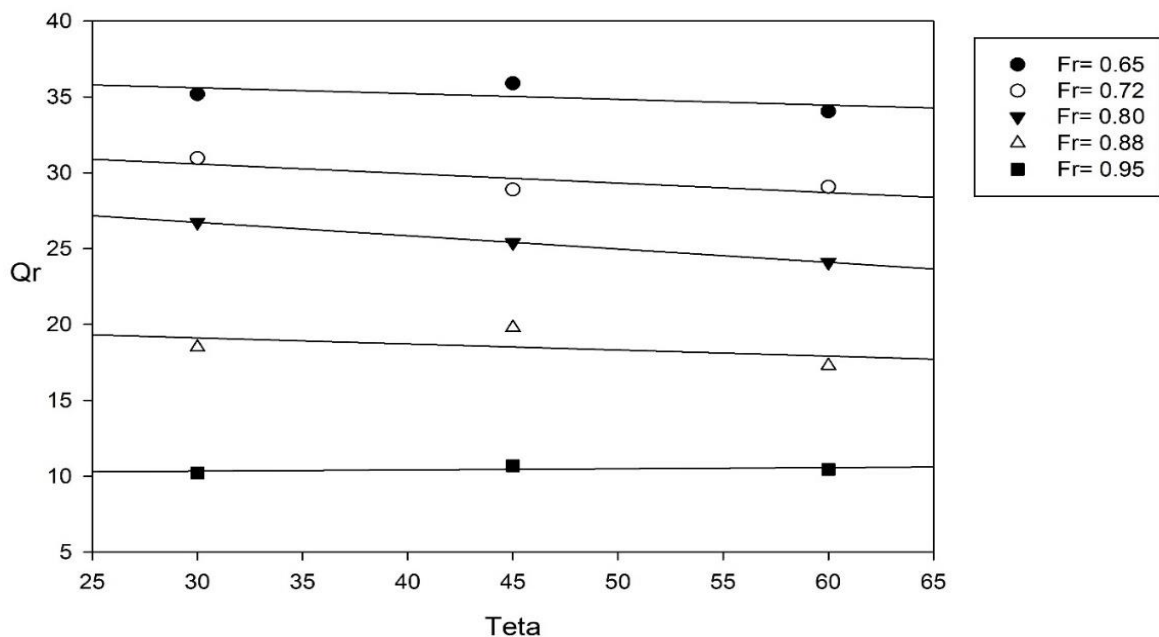
دارد و با دو برابر کردن زاویه صفحات میزان دبی منحرف شده برای  $\frac{y}{B} = 0,08$  به میزان ۶ درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,12$  به میزان ۳/۳ درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,16$  به میزان ۱/۱ درصدی کاهش می یابد که مقداری ناچیز است.



شکل ۴-۱۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,08$



شکل ۴-۱۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,12$



شکل ۴-۱۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,16$

شکل ۴-۱۴ الی ۴-۱۶ تاثیر تغییر زاویه صفحات مستغرق را بر میزان رسوب منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می دهد.

همانگونه که مشاهده می شود با افزایش زاویه صفحات در نسبت  $\frac{y}{B} = 0,08$ ، میزان رسوب منحرف شده کاهش می یابد اما با افزایش عمق جریان به  $\frac{y}{B} = 0,16$  تغییری در میزان رسوب منحرف شده مشاهده نمی شود.

جریان پر سرعت در سطح آب نسبت به جریان کم سرعت کف کانال احتیاج به نیروی بیشتری برای تغییر مسیر دارد. هر چه نسبت سرعت جریان ورودی به انشعاب به سرعت جریان در کانال اصلی افزایش پیدا کند بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی که عامل موثر در انتقال رسوبات می باشد، افزوده می گردد.

افزایش زاویه صفحات سبب کاهش ناگهانی سرعت ورودی به کانال انحرافی و در نتیجه کاهش نیروی گریز از مرکز می شود که باعث کاهش انتقال رسوبات به کانال فرعی خواهد شد.

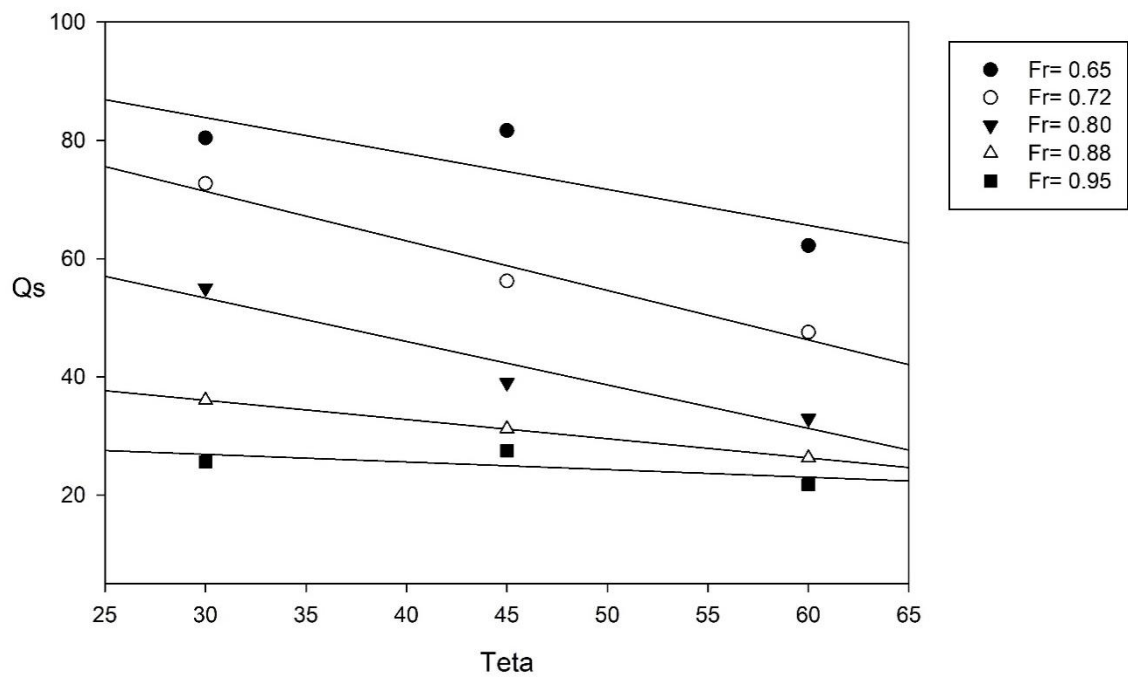
اما این امر در عمق های بالاتر تاثیر صفحات بر سرعت جریان در لایه های بالا کمتر می شود و سبب می شود که تغییرات زاویه در تغییر مقدار رسوب منحرف شده بی تاثیر باشد.

افزایش عدد فرود جریان بدلیل کاهش نیروی گریز از مرکز سبب کاهش سرعت ورودی به کانال انحرافی می گردد و این امر از قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی و همچنین انتقال رسوبات در آن می کاهد.

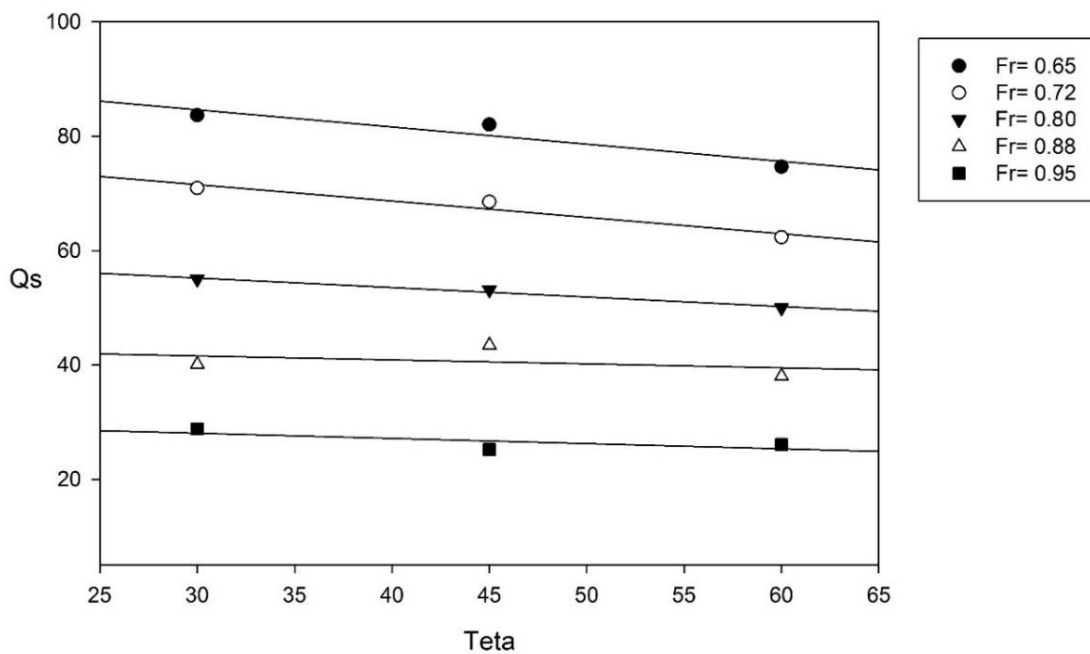
با بررسی کمی نتایج حاصله می توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به طور متوسط باعث کاهش ۵۴ درصدی رسوب منحرف شده به کانال فرعی می شود.

در بالاترین عدد فرود آزمایش ها مقادیر رسوب منحرف شده تقریباً ثابت هستند در صورتی که در پایین ترین فرود، اختلاف در درصد رسوب انحرافی برای اعماق پایین تر مشهود است و با دو برابر کردن زاویه صفحات، میزان رسوب منحرف شده برای  $\frac{y}{B} = 0,08$  به میزان  $\frac{y}{B} = 18/3$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,12$  به میزان ۹ درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,16$  به میزان  $\frac{y}{B} = 2/1$  می یابد درصد کاهش می یابد.

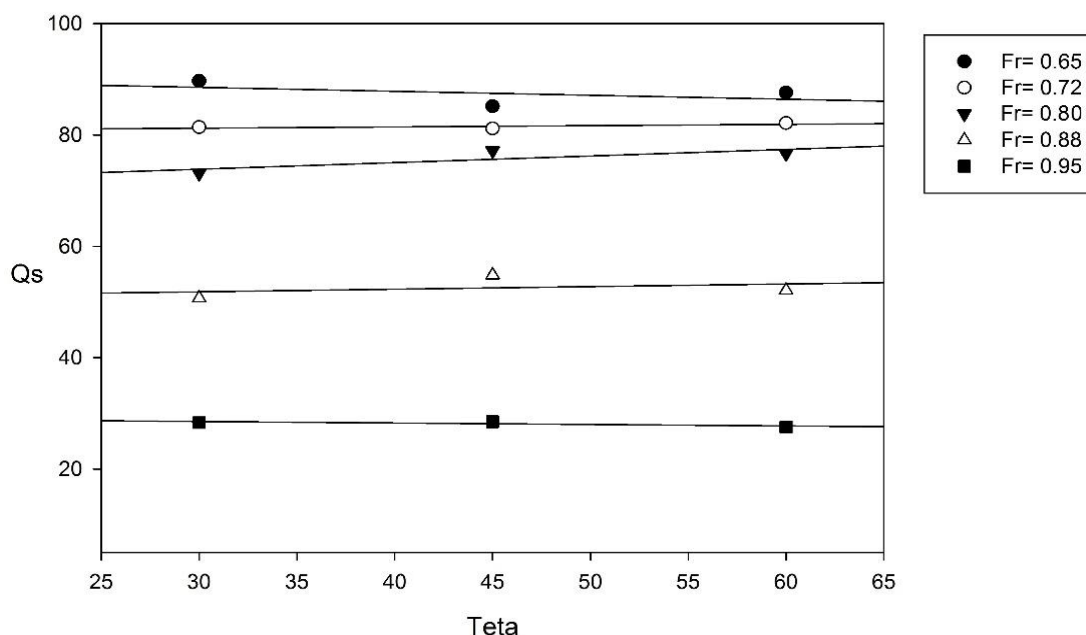
با توجه به نتایج می توان گفت که افزایش عدد فرود در کاهش رسوب منحرف شده به کانال فرعی موثر می باشد اما تغییرات زاویه صفحات مستغرق تنها در عمق های پایین اثر گذار بوده و با افزایش عمق بی تاثیر است.



شکل ۴-۱۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.08$



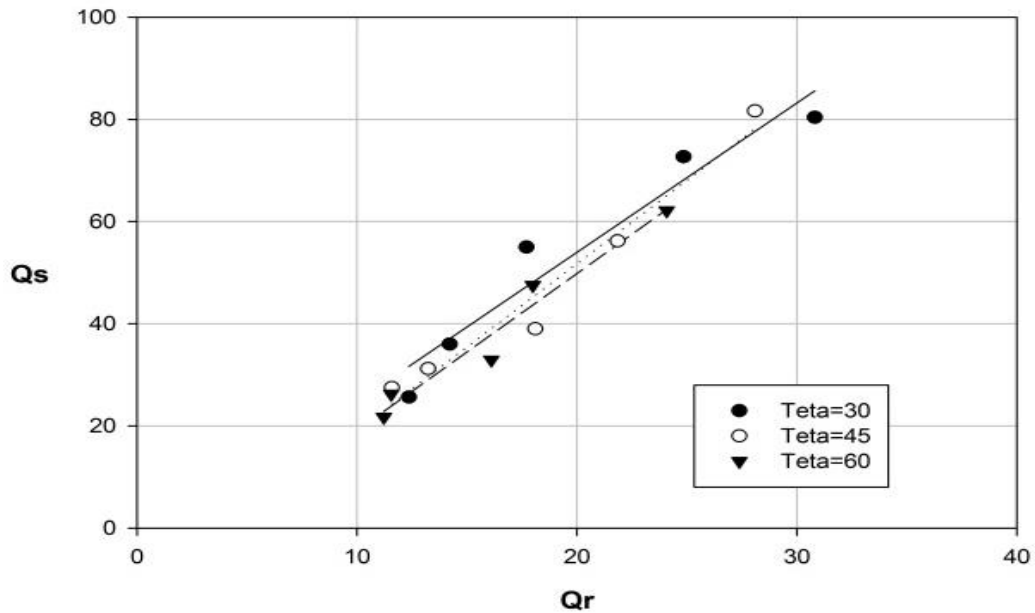
شکل ۴-۱۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.12$



شکل ۴-۱۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,16$

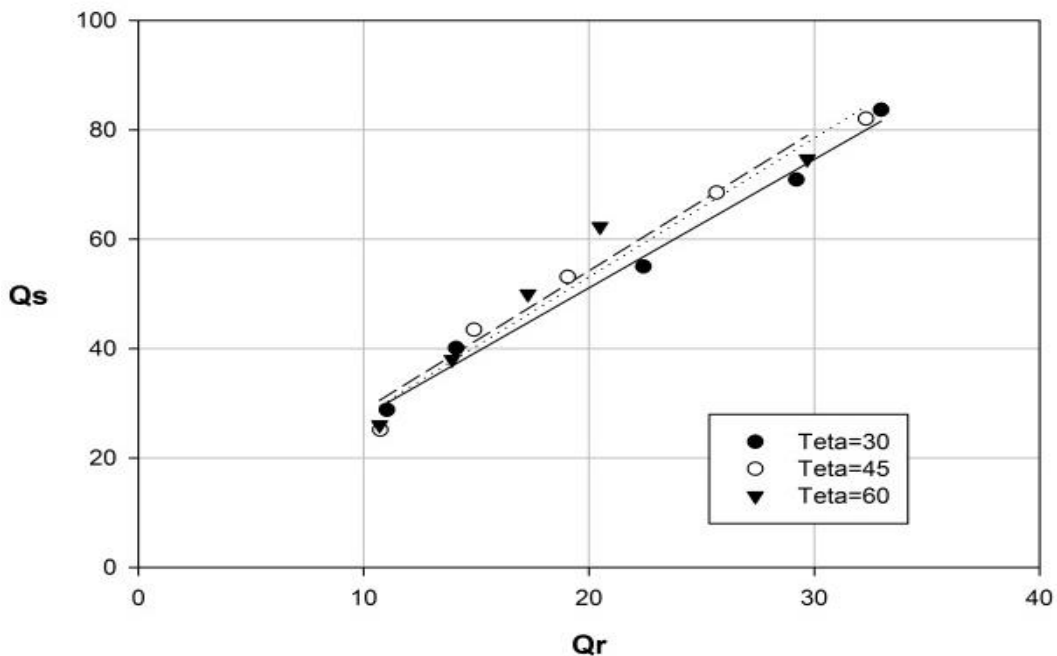
با توجه به نتایج کمی بدست آمده می توان گفت که هرچه قدر میزان رسوب انحرافی بیشتر و دبی منحرف شده کمتر باشد، نتایج بهتر بوده و عملکرد مناسب تر خواهد بود. به عبارت دیگر هرچه قدر شرایط هیدرولیکی و جانمایی صفحات مستغرق به گونه ای باشد که در دبی انحرافی کمتر، رسوب بیشتری منحرف شود بهترین بازده حاصل می شود. بنابراین با تعریف پارامتر  $\eta$  (نسبت رسوب منحرف شده به دبی انحرافی) به عنوان عملکرد، به بررسی شرایط آزمایش ها پرداخته شد. شکل ۴-۱۷ الی ۴-۱۹ نشان دهنده مقایسه میزان عملکرد کانال انحرافی در حالت های ذکر شده می باشد. با توجه به شکل شیب هر نمودار بیانگر مقدار پارامتر عملکرد خواهد بود و هر چه این مقدار بیشتر باشد کانال فرعی رسوب بیشتر و دبی کمتری را منحرف می کند. شرایطی مطلوب است که مقدار پارامتر عملکرد آن بزرگ تر از ۱ باشد. با توجه به نتایج می توان دریافت که در همه حالات مقادیر پارامتر عملکرد بزرگ تر از ۱ بوده و از مقدار  $2/30$  الی  $2/85$  متغیر می باشد و در نتیجه کانال انحرافی  $90^\circ$  درجه با صفحات مستغرق، عملکرد مناسبی در انتقال رسوب برای اعماق کم ( $\frac{y}{B} = 0,08$ ) دارد. نتایج نشان می دهد که مقدار رسوب

منحرف شده بیشتر از مقدار دبی انحرافی بوده و هرچقدر عدد فرود کاهش یابد شرایط مطلوب تر و پارامتر عملکرد بیشتر می شود.



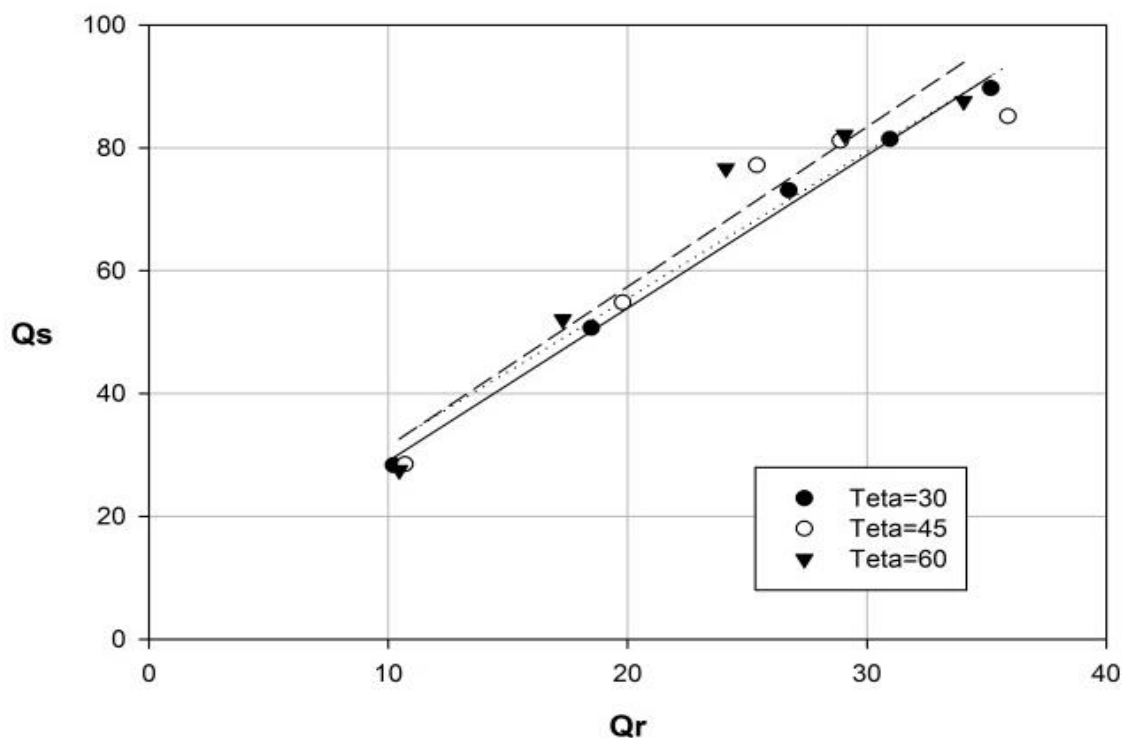
شکل ۴-۱۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,08$$



شکل ۴-۱۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$y/B = 0,12$$



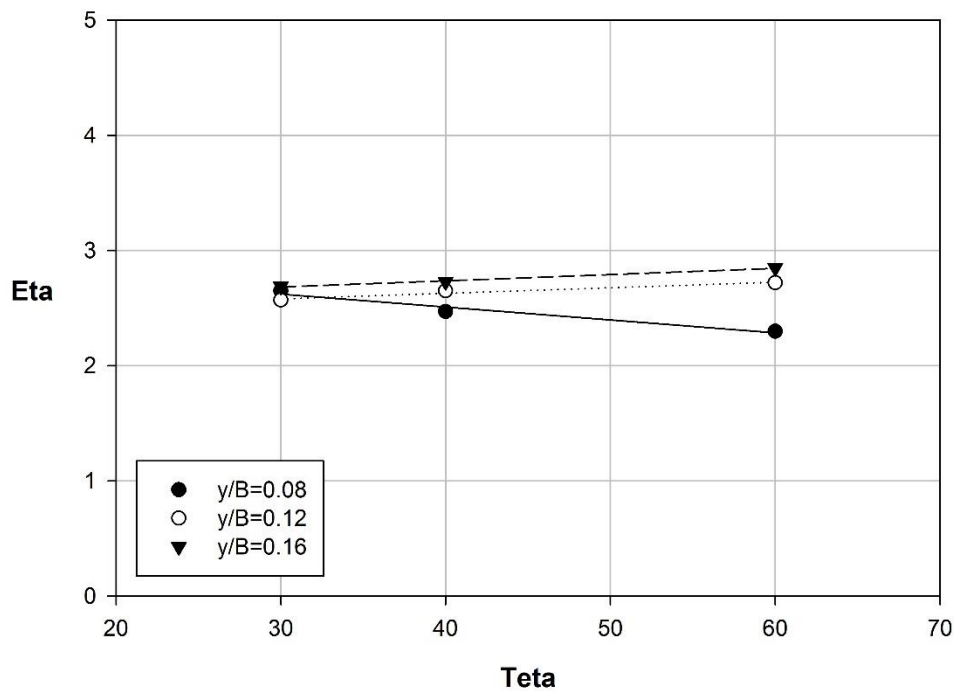
شکل ۴-۱۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در  $y/B=0,16$

شیب خط نشان داده در شکل ۴-۱۷ الی ۴-۱۹ بیانگر متوسط مقدار عملکرد در بازه عدد فرود آزمایش‌ها می‌باشد.

بنابراین جهت تعیین حالت بهینه، مقدار عملکرد برای هر حالت (شیب هر کدام از نمودارهای شکل ۴-۱۷ الی ۴-۱۹) محاسبه شده و تغییرات آن برحسب پارامتر بدون بعد عمق در شکل ۴-۲۰ برازش داده شده است.

این شکل در واقع بیانگر اندرکنش دبی انحرافی و رسوب منحرف شده برحسب عمق جریان می‌باشد.





شکل ۴-۲۰- تغییرات پارامتر عملکرد بر حسب عمق جریان برای زوایای مختلف صفحات مستغرق

با توجه به شکل ۴-۲۰ می توان دریافت که با افزایش زاویه صفحات مستغرق حساسیت پارامتر عملکرد تونلهای انحرافی به عمق جریان به طور چشمگیری افزایش می یابد ولی در زوایای کمتر میتوان از تاثیر عمق جریان بر پارامتر عملکرد تونلهای انتقال رسوب چشم پوشی کرد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می توان دریافت در زاویه ۶۰ درجه صفحات مستغرق در عمق  $\frac{y}{B} = 0,16$  بهترین گزینه را جهت انحراف رسوبات ارائه می کند و عملکرد تونلهای انحرافی به  $\frac{2}{85}$  می رسد. بنابراین با افزایش عمق جریان و با صفحات مستغرق با زاویه ۶۰ درجه می توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به گونه ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند و عملکرد تونل انتقال رسوب در بالاترین حد خود واقع شود.

#### ۴-۴ مقایسه وجود و عدم وجود صفحات مستغرق

مقایسه نتایج با حالت عدم استفاده از صفحات مستغرق ( $\theta=0$ ) نشان می دهد که مقدار دبی منحرف شده به کانال فرعی در صورت استفاده از صفحات مستغرق کمتر شده و هر چه زاویه صفحات بیشتر شود مقدار انحراف جریان کمتر خواهد شد. بیشتر می شود.

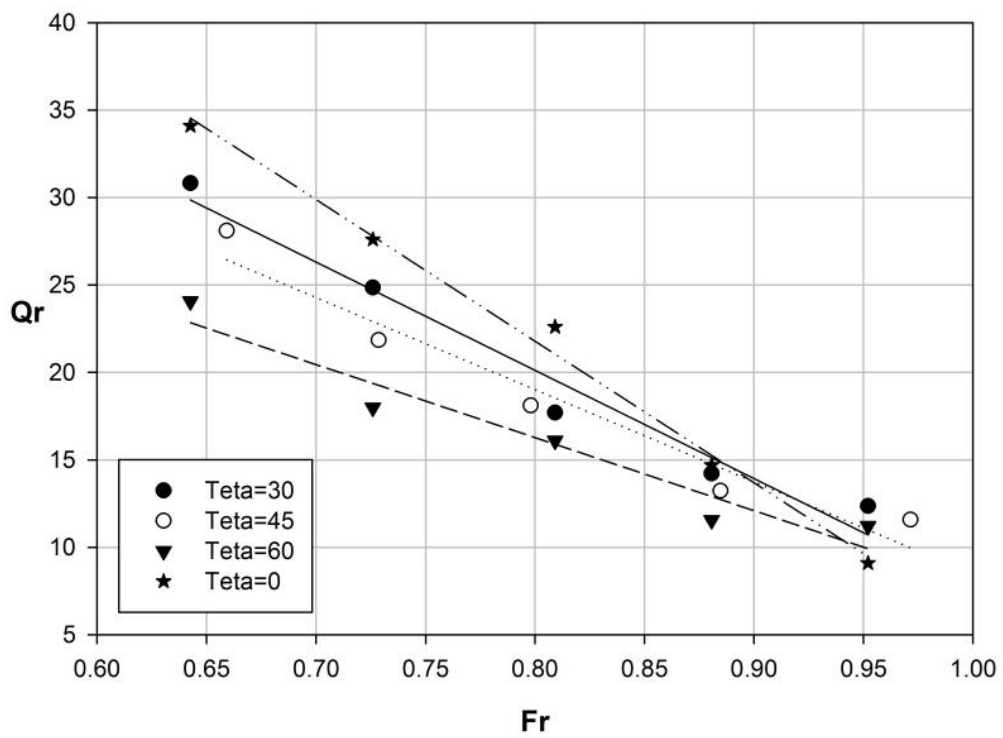
عدد فرود عاملی تاثیر گذار بر میزان دبی انحرافی جریان به کانال انتقال رسوب می باشد و با افزایش عدد فرود، نسبت دبی انحرافی برای همه حالات کاهش می یابد. افزایش عدد فرود جریان اصلی در بالادست سبب افزایش سرعت در کانال اصلی می شود (در عمق ثابت) و افزایش سرعت سبب کاهش نیروی گریز از مرکز و قدرت چرخش جریان به سمت کانال انحرافی خواهد شد.

با بررسی کمی نتایج حاصله می توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به طور متوسط باعث کاهش  $22/2$  درصدی دبی منحرف شده به کانال فرعی می شود.

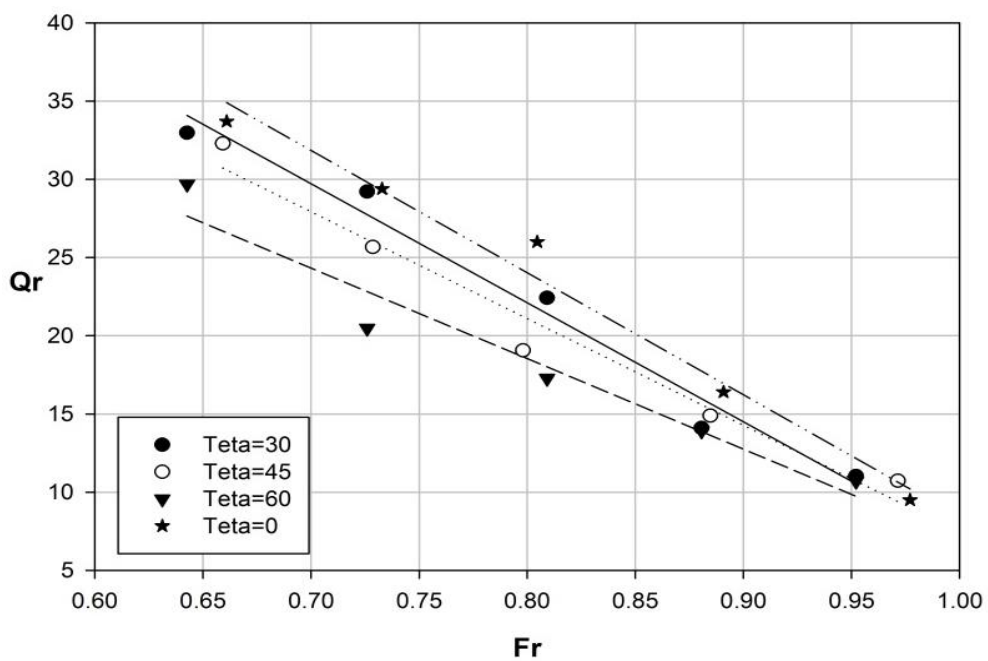
در بالاترین عدد فرود آزمایش ها مقادیر دبی منحرف شده تقریبا ثابت هستند اما در پایین ترین عدد فرود اختلاف در درصد دبی انحرافی وجود دارد.

با اعمال صفحات مستغرق با زاویه  $60$  درجه میزان دبی منحرف شده نسبت به حالت بدون صفحات مستغرق برای  $\frac{y}{B} = 0,08$  به میزان  $10$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,12$  به میزان  $4$  درصد و برای  $\frac{y}{B} = 0,16$  به میزان  $1/3$  درصد کاهش می یابد.

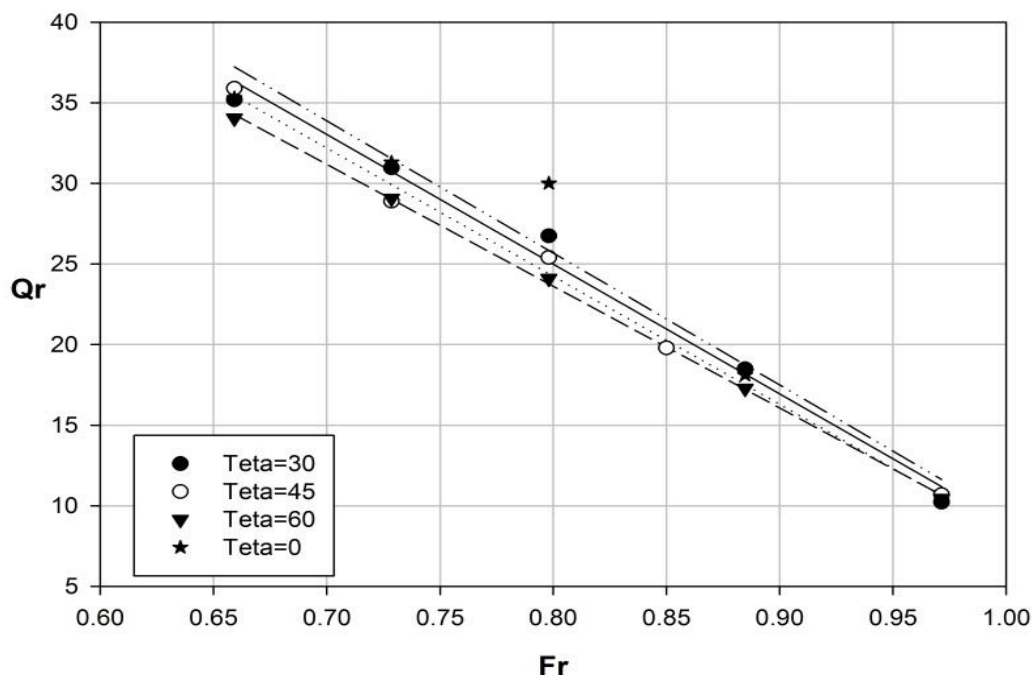
با توجه به نتایج می توان گفت که استفاده از صفحات مستغرق و زاویه  $60$  درجه آن به همراه افزایش عدد فرود در کاهش دبی انحرافی به کانال فرعی موثر می باشد.



شکل ۴-۲۱- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.08$



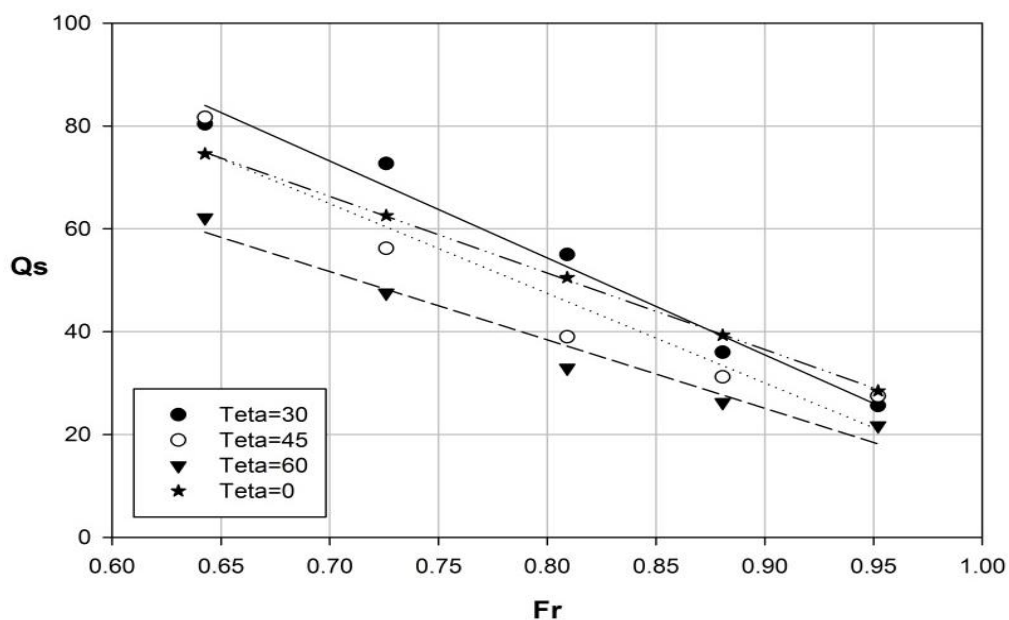
شکل ۴-۲۲- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0.12$



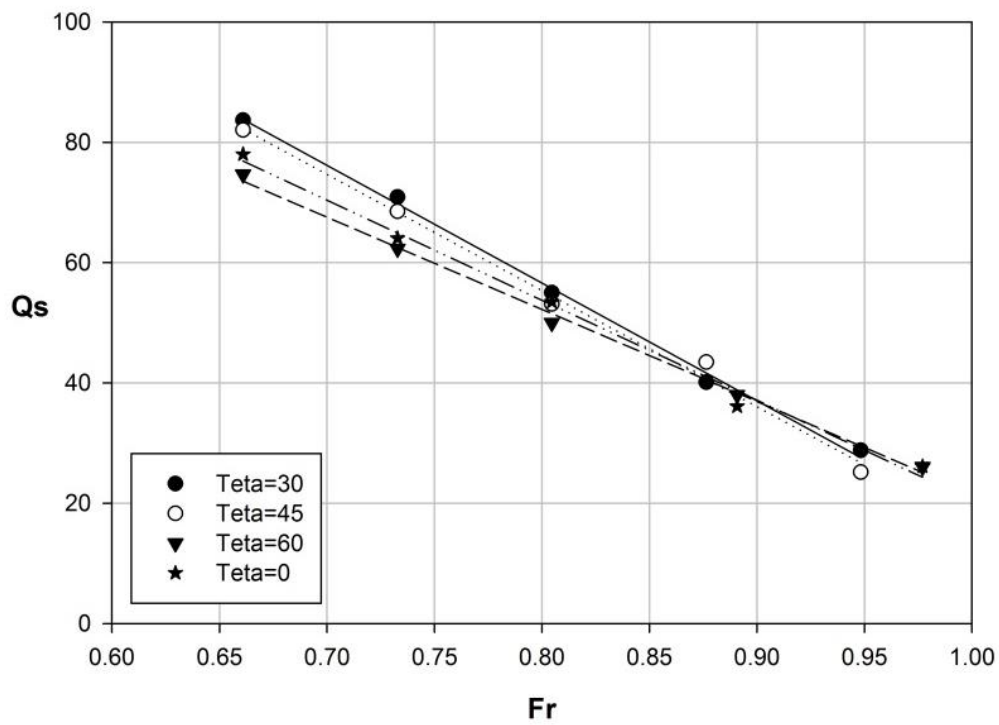
شکل ۴-۲۳- تغییرات نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,16$

شکل ۴-۲۴ الی ۴-۲۶ تاثیر تغییر زاویه صفحات مستغرق را بر میزان رسوب منحرف شده در اعماق متفاوت نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش زاویه صفحات در نسبت  $\frac{y}{B} = 0,08$ ، میزان رسوب منحرف شده کاهش می یابد اما با افزایش عمق جریان به  $\frac{y}{B} = 0,16$  تغییری در میزان رسوب منحرف شده مشاهده نمی شود. جریان پر سرعت در سطح آب نسبت به جریان کم سرعت کف کانال احتیاج به نیروی بیشتری برای تغییر مسیر دارد. هر چه نسبت سرعت جریان ورودی به انشعاب به سرعت جریان در کانال اصلی افزایش پیدا کند بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی که عامل موثر در انتقال رسوبات می باشد، افزوده می گردد. افزایش زاویه صفحات سبب کاهش ناگهانی سرعت ورودی به کانال انحرافی و در نتیجه کاهش نیروی گریز از مرکز می شود که باعث کاهش انتقال رسوبات به کانال فرعی خواهد شد. اما این امر در عمق های بالاتر تاثیر صفحات بر سرعت جریان در لایه های بالا کمتر می شود و سبب می شود که تغییرات زاویه در تغییر مقدار رسوب منحرف شده بی تاثیر

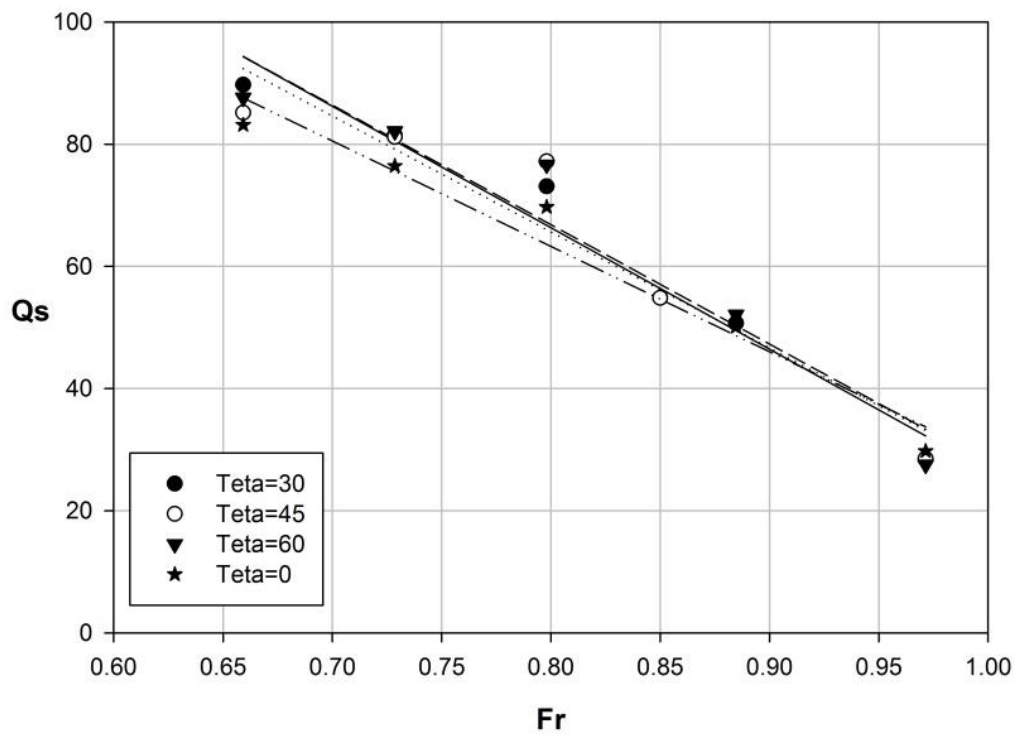
باشد. افزایش عدد فرود جریان بدلیل کاهش نیروی گریز از مرکز سبب کاهش سرعت ورودی به کانال انحرافی می‌گردد و این امر از قدرت جریان ثانویه ایجاد شده در کانال فرعی و همچنین انتقال رسوبات در آن می‌کاهد. با بررسی کمی نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود به طور متوسط باعث کاهش  $53/3$  درصدی رسوب منحرف شده به کانال فرعی می‌شود. در بالاترین عدد فرود آزمایش‌ها مقادیر رسوب منحرف شده تقریباً ثابت هستند در صورتی که در پایین‌ترین فرود، اختلاف در درصد رسوب انحرافی برای اعماق پایین‌تر مشهود است و با اعمال صفحات مستغرق با زاویه  $60$  درجه میزان رسوب منحرف شده نسبت به حالت بدون صفحات مستغرق برای  $\frac{y}{B} = 0,08$  به میزان  $12/4$  درصد کاهش و برای  $\frac{y}{B} = 0,12$  به میزان  $3/4$  درصد کاهش و برای  $\frac{y}{B} = 0,16$  به میزان  $4/4$  افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که افزایش عدد فرود در کاهش رسوب منحرف شده به کانال فرعی موثر می‌باشد اما استفاده از صفحات با زاویه  $60$  درجه فقط برای عمق‌های بالا و به مقدار ناچیز تاثیرگذار است و زاویه  $30$  درجه نتایج بهتری را در انتقال رسوب ارائه داده است.



شکل ۴-۲۴- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,08$

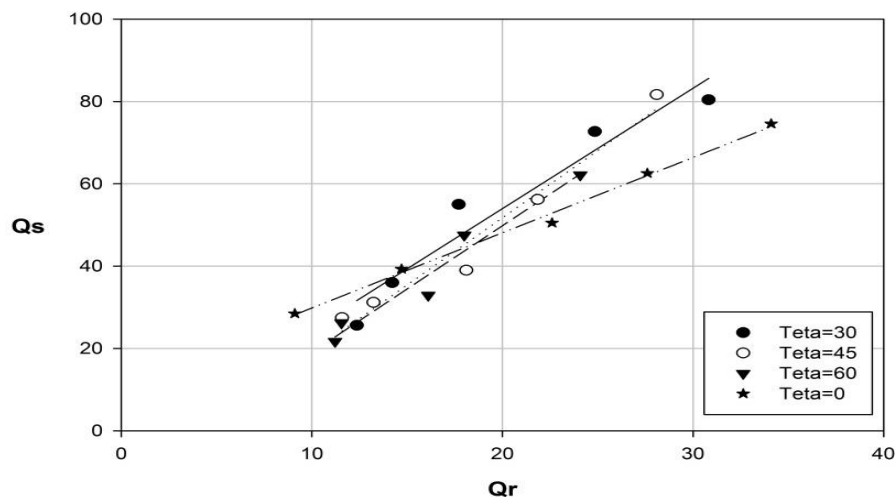


شکل ۴-۲۵- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,12$



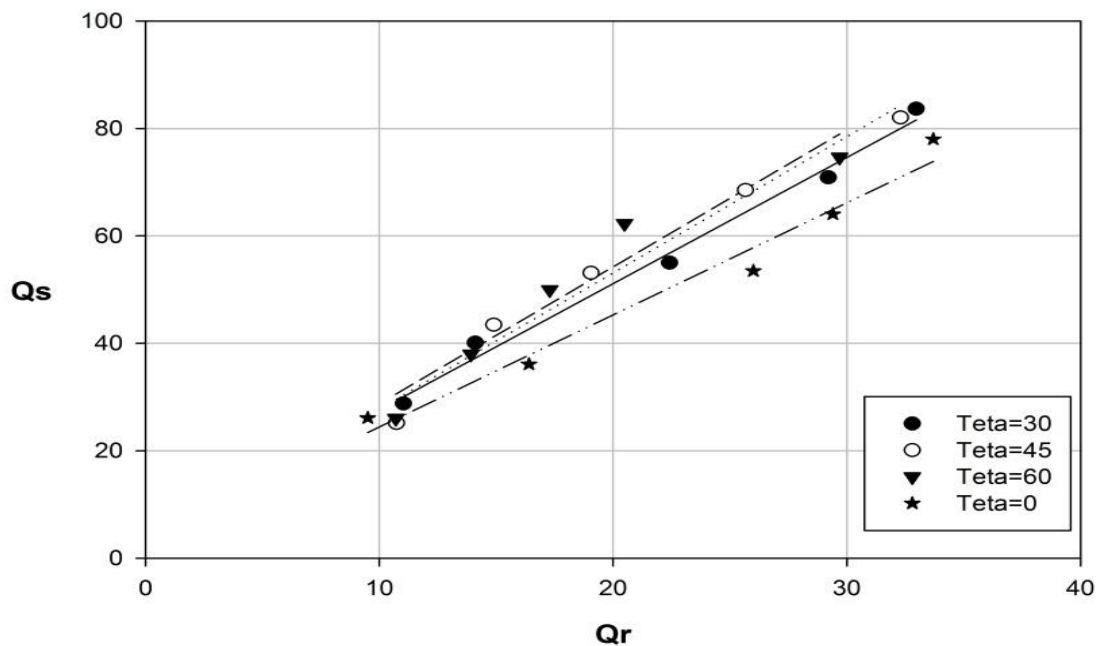
شکل ۴-۲۶- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب جریان اصلی با عدد فرود در  $\frac{y}{B} = 0,16$

با توجه به نتایج کمی بدست آمده می‌توان گفت که هرچه قدر میزان رسوب انحرافی بیشتر و دبی منحرف شده کمتر باشد، نتایج بهتر بوده و عملکرد مناسب‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر هرچه قدر شرایط هیدرولیکی و جانمایی صفحات مستغرق به گونه‌ای باشد که در دبی انحرافی کمتر، رسوب بیشتری منحرف شود بهترین بازده حاصل می‌شود. بنابراین با تعریف پارامتر  $\eta$  (نسبت رسوب منحرف شده به دبی انحرافی) به عنوان عملکرد، به بررسی شرایط آزمایش‌ها پرداخته شد. شکل ۴-۲۷ الی ۴-۲۹ نشان‌دهنده مقایسه میزان عملکرد کانال انحرافی در حالت‌های ذکر شده می‌باشد. با توجه به شکل شیب هر نمودار بیانگر مقدار پارامتر عملکرد خواهد بود و هر چه این مقدار بیشتر باشد کانال فرعی رسوب بیشتری و دبی کمتری را منحرف می‌کند. شرایطی مطلوب است که مقدار پارامتر عملکرد آن بزرگ‌تر از ۱ باشد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که در همه حالات مقادیر پارامتر عملکرد بزرگ‌تر از ۱ بوده و از مقدار ۱/۸۴ الی ۳/۲۶ متغیر می‌باشد و در نتیجه کانال انحرافی ۹۰ درجه، عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت استفاده از صفحات مستغرق باعث افزایش پارامتر عملکرد کانال انحرافی خواهد شد اما تغییرات زاویه تاثیر آنچنانی بر مقدار پارامتر عملکرد ندارد.



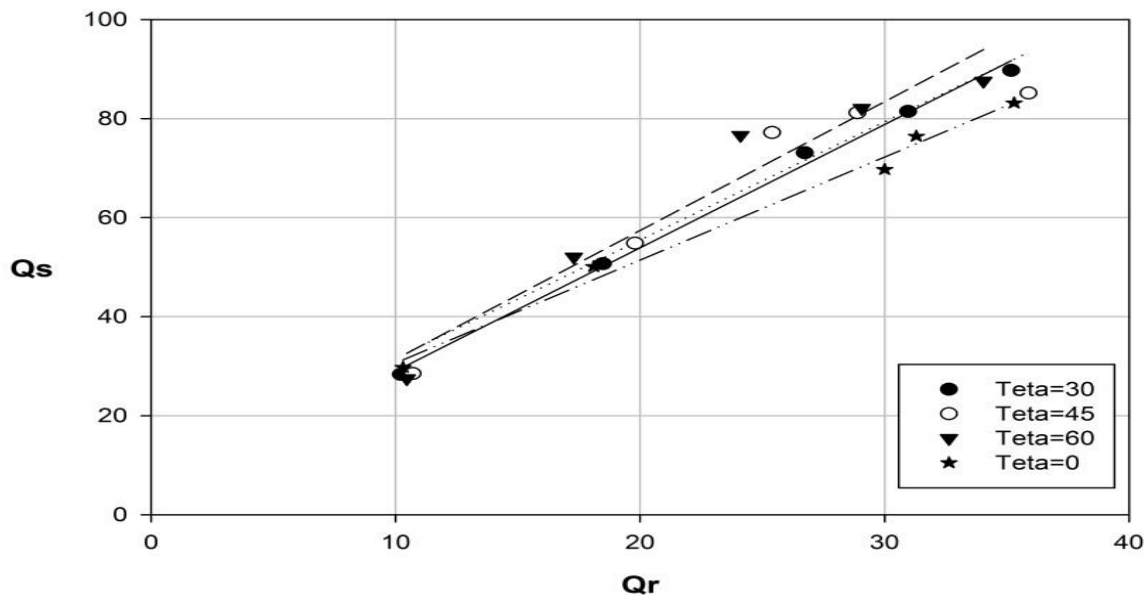
شکل ۴-۲۷- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,08$$



شکل ۴-۲۸- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,12$$

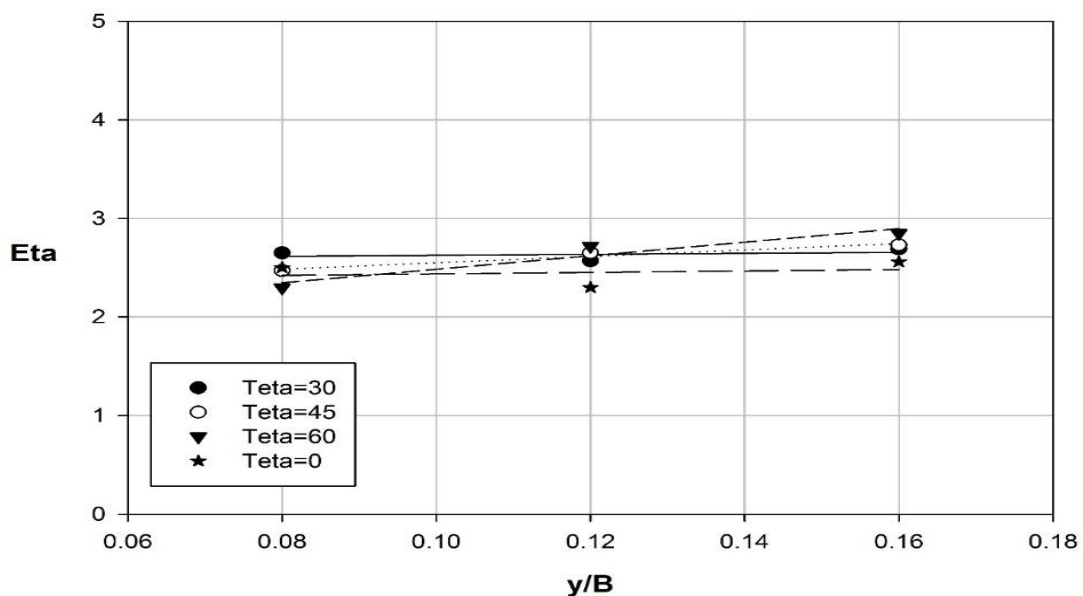


شکل ۴-۲۹- تغییرات نسبت رسوب انحرافی به رسوب کل با نسبت دبی انحرافی به دبی جریان اصلی در

$$\frac{y}{B} = 0,16$$



شیب خط نشان داده در شکل ۴-۲۷ الی ۴-۲۹ بیانگر متوسط مقدار عملکرد در بازه عدد فرود آزمایش‌ها می‌باشد. بنابراین جهت تعیین حالت بهینه، مقدار عملکرد برای هر حالت (شیب هر کدام از نمودارهای شکل ۴-۲۷ الی ۴-۲۹) محاسبه شده و تغییرات آن برحسب پارامتر بدون بعد عمق در شکل ۴-۳۰ برآزش داده شده است. این شکل در واقع بیانگر اندرکنش دبی انحرافی و رسوب منحرف شده برحسب عمق جریان می‌باشد.



شکل ۴-۳۰- تغییرات پارامتر عملکرد برحسب عمق جریان برای حالات وجود و عدم وجود صفحات مستغرق

با توجه به شکل ۴-۳۰ می‌توان دریافت که افزایش عمق جریان برای کانالهای بدون صفحات مستغرق و با صفحات مستغرق ۳۰ درجه اثر بسیار ناچیزی بر عملکرد تونلهای انتقال رسوب دارد (حدود ۱ تا ۲ درصد) در حالیکه برای صفحات مستغرق با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب سبب افزایش ۱۰ و ۲۴ درصدی عملکرد خواهد شد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که زاویه ۳۰ درجه صفحات مستغرق بهترین گزینه برای عمقهای کم  $\frac{y}{B} = 0,08$  و با افزایش عمق و زاویه صفحات مستغرق،

زاویه ۶۰ درجه می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به گونه‌ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف می‌شوند.

#### ۴-۵ بهینه‌سازی پارامترهای مدل با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین

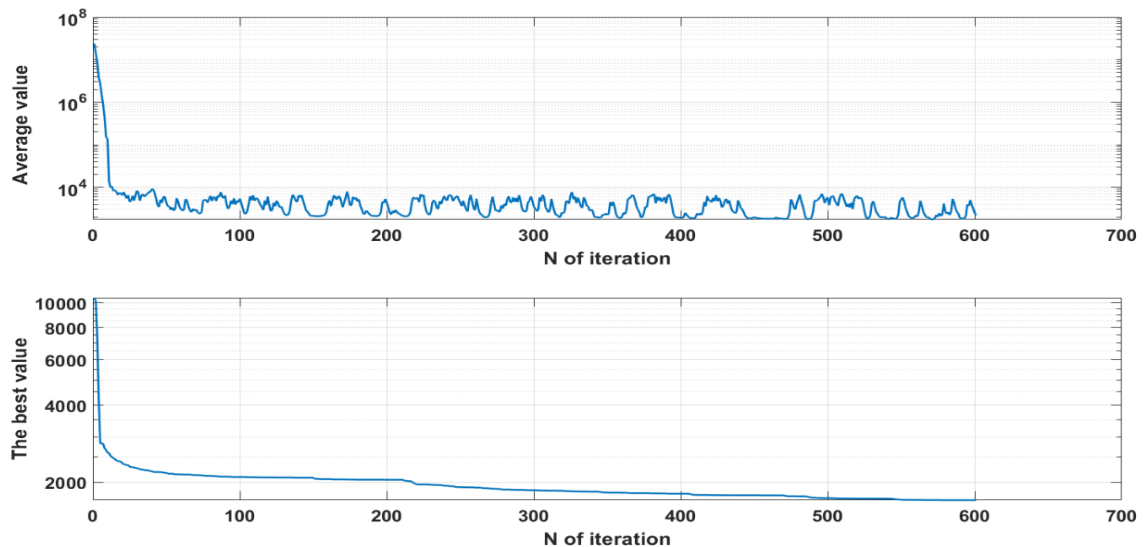
با توجه به توضیحات فوق و بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده پارامترهای  $Fr$  عدد فرود،  $b/B$  نسبت عرض کانال فرعی به اصلی،  $y/B$  نسبت عمق جریان به عرض کانال اصلی، زاویه  $teta$ ، و نسبت دبی جریان آب انحرافی  $Q_r$  به عنوان ورودی و نسبت دبی جریان رسوب انحرافی  $Q_s$  به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند. روشهای پیاده‌سازی شده ترکیب روش سطح پاسخ با الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین برای محاسبه ضرایب بوده است.

در هر دو مورد ترکیب داده‌های آموزش و آزمایش برابر ۷۰ درصد و ۳۰ درصد انتخاب شده است. معیارهای بهینه‌سازی در هر دو روش یکبار کمینه کردن میانگین مربعات خطا در هر دو مجموعه آموزش و آزمایش و بار دوم بیشینه کردن ضریب همبستگی بین خروجی مدل و خروجی واقعی بوده است.

#### ۴-۵-۱ پارامترهای پیاده‌سازی

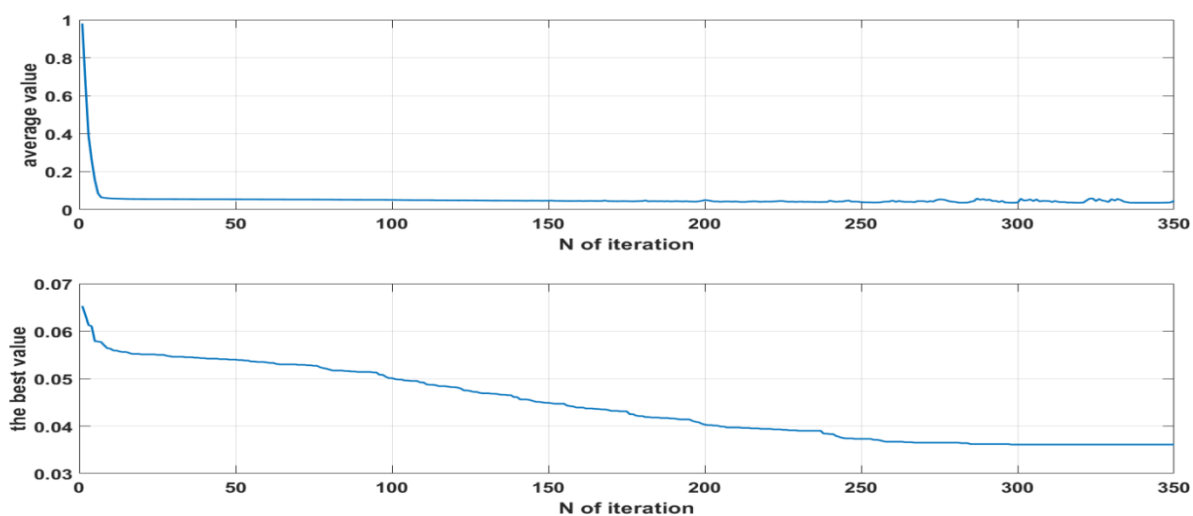
در این بخش بهینه‌سازی مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین بر داده‌های آموزش صورت گرفته است. پارامترهای فرض شده به شرح زیر است؛ الگوریتم از نوع باینری بوده و برای هر متغیر، ۱۰ بیت اختصاص داده شده است. به این ترتیب تعداد بیت هر کروموزوم، ۶۰ بیت می‌باشد. نقاط شروع اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. تعداد نقاط هم‌پوشانی با توجه به طول کروموزوم، ۵ نقطه و احتمال جهش، برابر ۰/۰۱ فرض شده است. انتخاب نمونه‌های باقی مانده به صورت ایده‌آل بوده است. تعداد تکرار برابر ۶۰۰ و تعداد نمونه اولیه برابر ۲۰۰ عدد انتخاب شده است. انتخاب نمونه‌های اولیه در فضای جواب به صورت تصادفی بوده است.

تغییرات تابع هزینه برای اجرای کمینه کردن میانگین مربعات خطا، الگوریتم ژنتیک در شکل ۴-۳۱ آورده شده است. محور عمودی مقدار تابع هزینه برای میانگین کل جمعیت و بهترین مقدار جمعیت در تکرار مربوطه و محور افقی شماره تکرار است. بدلیل تغییرات بسیار زیاد منحنی به صورت شبه لگاریتمی رسم شده است.



شکل ۴-۳۱- تغییرات تابع هزینه و همگرایی الگوریتم ژنتیک برای اجرای کمینه کردن میانگین مربعات خطا

تغییرات تابع هزینه برای اجرای بیشینه کردن ضریب همبستگی، الگوریتم ژنتیک در شکل ۴-۳۲ آورده شده است. لازم به ذکر است محور عمودی مقدار یک منهای تابع هزینه است که برای میانگین کل جمعیت و بهترین مقدار جمعیت در تکرار مربوطه محاسبه شده و محور افقی شماره تکرار است. دلیل انجام این کار این است که تابع ژنتیک به دنبال کمینه تابع می‌گردد و با این کار کمینه تابع جدید معادل بیشینه تابع اصلی خواهد بود.



شکل ۴-۳۲- تغییرات تابع هزینه و همگرایی الگوریتم ژنتیک برای اجرای بیشینه کردن ضریب همبستگی در نهایت چهار فرمول بازای ۴ حالت فرض شده بدست آمده که برای هر فرمول خطای نسبی، میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی برای دو دسته آموزش و آزمایش به تفکیک در جدول ۴-۱ آورده شده است. مجموعاً چهار بار پیاده سازی صورت گرفته (۲ بار با الگوریتم ژنتیک برای دو تابع هزینه مختلف و دو بار با گرادیان هسین) و نتایج به صورت روابط ۴-۱۸ تا ۴-۲۱ ضمیمه شده است.

جدول ۴-۱- نتایج مدل سازی صورت گرفته با ترکیب سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و گرادیان هسین

| شماره رابطه | روش بهینه سازی                                | میانگین مربعات خطا |        | ضریب همبستگی |        |
|-------------|---|--------------------|--------|--------------|--------|
|             |   | آموزش              | آزمایش | آموزش        | آزمایش |
| ۱۸-۴        | کمینه کردن میانگین مربعات خطا، الگوریتم ژنتیک | ۳۳/۱۸۹             | ۲۹/۵۷۰ | ۰/۹۵۷        | ۰/۹۶۴  |
| ۱۹-۴        | بیشینه کردن ضریب همبستگی، الگوریتم ژنتیک      | ۲۸/۹۳۷             | ۲۹/۲۱۸ | ۰/۹۶۵        | ۰/۹۶۶  |
| ۲۰-۴        | کمینه کردن میانگین مربعات خطا، گرادیان هسین   | ۳۳/۱۶۹             | ۲۹/۹۴۸ | ۰/۹۵۷        | ۰/۹۶۴  |
| ۲۱-۴        | بیشینه کردن ضریب همبستگی، گرادیان هسین        | ۲۸/۹۴۶             | ۲۹/۲۲۲ | ۰/۹۶۳        | ۰/۹۶۴  |

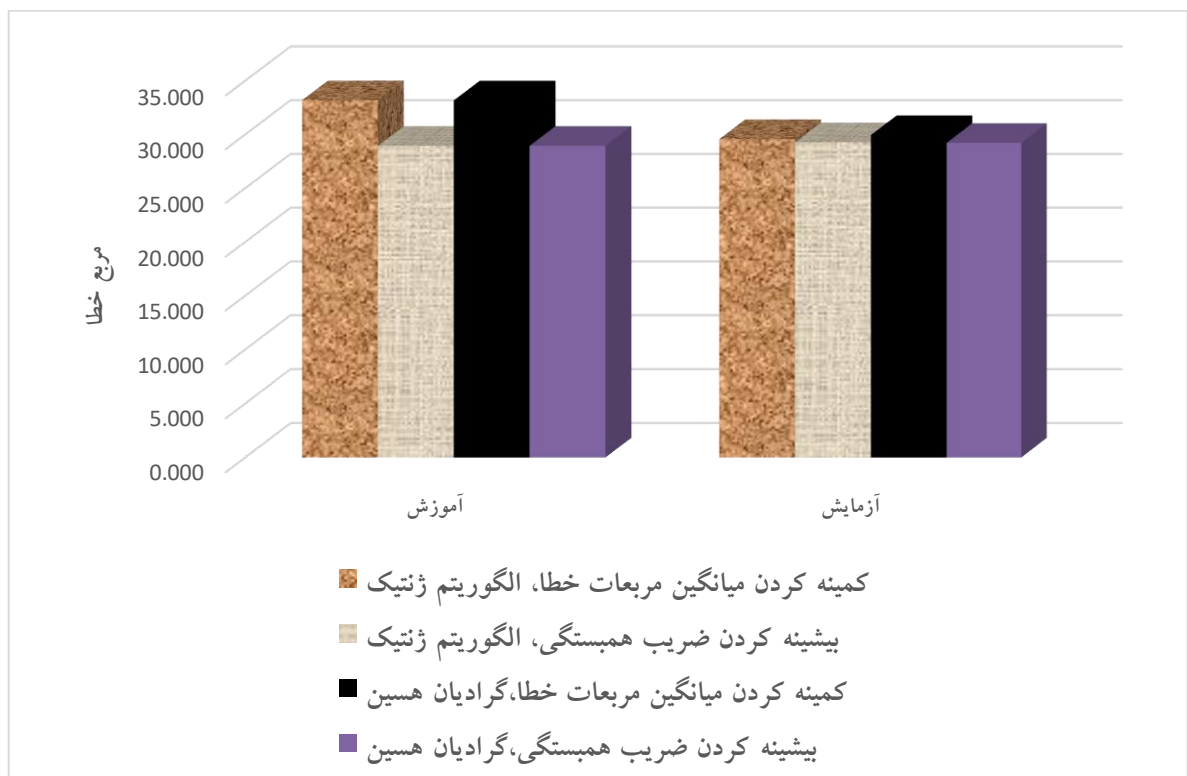
$$Q_s(\%) = 49.97 - 49.98Fr - 14.72 b/B + 12.9 y/B + 2.27 \text{tg}(\text{teta}) + 1.638 Qr \quad 1-4$$

$$Q_s(\%) = 1.92(-16.26 - 49.99Fr - 5 b/B + 6.93 y/B + 1.5 \text{tg}(\text{teta}) + 0.544 Qr) + 127.24 \quad 2-4$$

$$Q_s(\%) = 49.99 - 50Fr - 15.56 b/B + 12.9 y/B + 2.30 \text{tg}(\text{teta}) + 1.65 Qr \quad 3-4$$

$$Q_s(\%) = 62.65(0.28 - 1.54Fr - 0.147 b/B + 0.213 y/B + 0.045 \text{tg}(\text{teta}) + 0.0165 Qr) + 79.15 \quad 4-4$$

همانطور که مشاهده می‌کنید بهترین نتیجه برای رابطه ۲-۴ بوده است.



شکل ۴-۳۳- مقایسه خطای روشهای مختلف در دو دسته آموزش و آزمایش

شکل ۴-۳۳ نتایج خطای روشهای مختلف را به صورت مقایسه ای نشان داده تا بهتر بودن نتایج الگوریتم ژنتیک با تابع هزینه ضریب همبستگی کاملا مشخص شود.

## ۴-۶ مدل عددی 2 SSIIM

در این رساله برای تعریف مساله، به دلیل دو بلوکه شدن باید از مدل عددی SSIIM2 استفاده کرد که مراحل تولید شبکه، تعیین مقدار دبی، تکمیل فایل Control و Conrs/Con2res بطور کامل در پیوست "د" آمده است.

### ۴-۶-۱ واسنجی<sup>۱</sup> مدل عددی

برای طراحی یک مدل باید از فرایندها، معادلات ریاضی و الگوریتم‌هایی که فرایندها را توصیف می‌کنند شناخت نسبتاً کاملی داشته باشیم زیرا اکثر مدل‌های هیدرولیکی نیاز به تطبیق و تعدیل پارامترهای کنترل کننده فرایندها دارند که بطور مثال میتوان به ضریب زبری (ضریب مانینگ) جریان اشاره نمود. عملیات تطبیق پارامترها را جهت هماهنگی و سازگاری مدل در تولید داده‌هایی همانند نمونه اصلی سیستم، تنظیم مدل یا کالیبره کردن آن می‌گویند.

بعبارت دیگر هدف از کالیبراسیون حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است و این کار ممکن است بوسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا بوسیله روشهای بهینه سازی انجام شود. معمولاً رابطه خاص بین شکل عمومی مدل و سیستم فیزیکی مورد مطالعه از طریق پارامترهای مدل وجود دارد که این رابطه، دقت مقادیر پارامترها را برای خوبی برازش، بین خروجی مدل و خروجی ثبت شده تعیین می‌کند. ایده‌آل، آن است که مدل تا حد امکان واقعیت را منعکس کند. چنانچه مدل برای یک محل ناشناخته بکار رود (بطور مثال جریان یک رودخانه) مقادیر پارامترها باید از طریق اندازه‌گیری خواص فیزیکی سیستم تعیین شود. چنین پارامترهایی را پارامترهای فرایندی می‌نامند که ممکن است از پارامترهای بهینه شده (Optimized) که معمولاً بطور خود کار با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری تعیین می‌شوند تفاوت داشته باشند. بنابراین برای کالیبره کردن مدل روشهای متفاوتی وجود دارد که می‌توان از آنها استفاده نمود و یا در خود مدل این روشها تعبیه شده

---

<sup>۱</sup> Calibration

است. بطور معمول در روش عمومی کالیبره کردنی که در اکثر مدلها بکار می‌رود، کاربر تمام پارامترهایی را که می‌تواند براساس مشاهدات فیزیکی انجام دهد وارد کرده و تخمینی از پارامترهای ناشناخته را بعنوان برآورد اولیه انجام می‌دهد. سپس مدل اجرا می‌شود و خروجی آن با خروجی مشاهده شده در نمونه اصلی مقایسه می‌گردد. این کار تا بهترین تطبیق این دو خروجی ادامه می‌یابد. در این رساله نیز برای کالیبره کردن مدل مطابق آنچه توضیح داده شد، در هر بار اجرا نتایج مدل شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و در صورت وجود اختلاف زیاد، ضرایب معادلات و یا ضریب زبری تغییر داده شده است تا نتایج مدل شبیه سازی به نتایج مدل آزمایشگاهی نزدیک شود. این ضرایب باید قبل از اجرای هر برنامه در فایل Control تغییر داده شوند و سپس مدل جدید اجرا گردد و این کار تا بهترین تطبیق این دو خروجی ادامه داده شده است.

#### ۴-۶-۲ ارزیابی دقت (اعتبارسنجی نتایج) مدل عددی

اعتبارسنجی در مدل‌های عددی به فرآیندی گفته می‌شود که پس از محاسبه نتایج یا در طی آن اعمال می‌گردد تا از صحت و کارایی سیستم مورد نظر اطمینان حاصل شود. برای صحت‌سنجی مدل تعدادی از آزمایش‌ها در واسنجی شرکت داده نشد تا پس از واسنجی و اجرای مدل به توان قابلیت مدل برای سایر آزمایش‌ها را مورد ارزیابی قرارداد.

در این تحقیق آزمایش‌های جدول (۴-۲) برای صحت‌سنجی مدل عددی بدون صفحات مستغرق و جدول (۴-۴) برای صحت‌سنجی مدل عددی با صفحات مستغرق انتخاب گردید. برای تشخیص میزان تقارب نتایج محاسبه‌ای و مشاهده‌ای از معیار نش- ساتکلیف<sup>۲</sup> (معادله ۴-۴) استفاده شد، این شاخص در بازه منفی بی‌نهایت و یک تغییر پذیر است و هر چه مقدار آن به عدد ۱ نزدیک باشد بیانگر تقارب بیشتر بوده و مقادیر کمتر از نیم برای این شاخص نشانه عدم تطابق و تقارب دو دسته داده خواهد بود.

---

<sup>۱</sup> Verification

<sup>۲</sup> Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE)

..... فصل چهارم: نتایج و تفسیر آنها

جدول ۴-۳ و جدول ۴-۵ نتایج داده‌های آزمایشگاهی عددی و همچنین مقادیر ضریب نشاتکلیف را نشان می‌دهد مقدار این ضریب برای همه آزمایش‌ها به خوبی نشان دهنده دقت مدل می‌باشد.

$$RE = 1 - \left( \frac{(x_i - x_0)^2}{(X_i - \bar{x})^2} \right) \quad (5-4)$$

در رابطه (۵-۴) RE ضریب نش،  $x_i$  مقدار مشاهده‌ای،  $x_0$  مقدار محاسبه‌ای،  $\bar{X}$  میانگین مقدار مشاهده‌ای می‌باشد. به منظور محاسبه درصد خطای نتایج مدل SSIIM، نسبت به مدل آزمایشگاهی از رابطه (۶-۴) استفاده گردید:

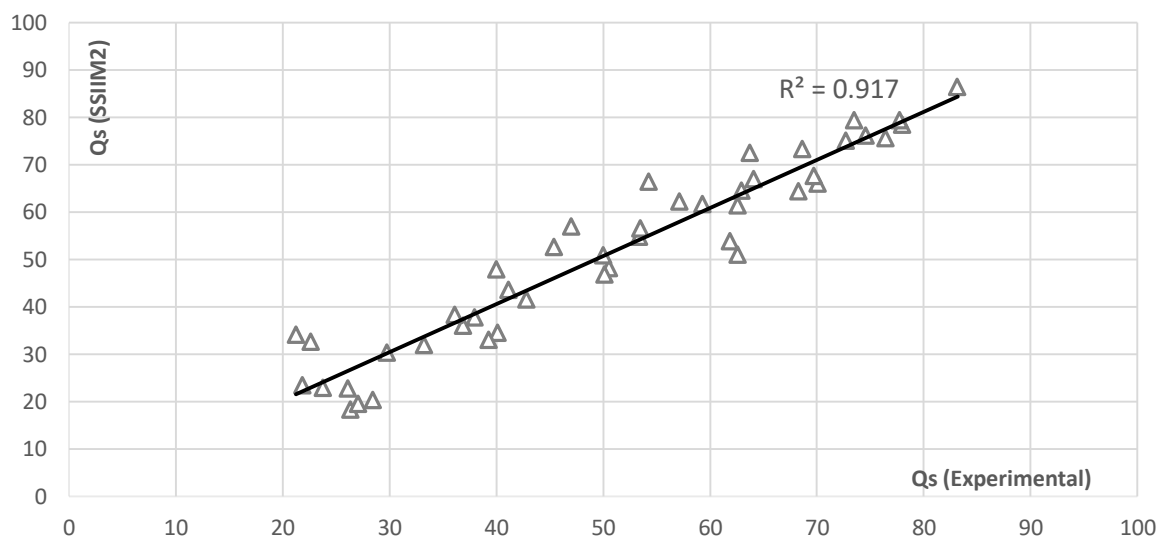
$$\Delta c = \frac{|c_m - c_l| * 100}{c_l} \quad (6-4)$$

در رابطه (۶)  $\Delta c$  درصد خطا،  $c_m$  رسوب منحرف شده محاسبه شده در مدل و  $c_l$  رسوب منحرف شده می‌باشند.

جدول ۴-۲- نمونه ای از آزمایش‌های که در اعتبارسنجی شرکت داده شدند (بدون صفحات مستغرق)

| ردیف | دبی (لیتر بر ثانیه) | عرض کانال انحرافی (متر) | عمق آب (متر) |
|------|---------------------|-------------------------|--------------|
| ۱    | ۲۳                  | ۰/۲                     | ۰/۰۷         |
| ۲    | ۲۸                  | ۰/۲                     | ۰/۰۷         |
| ۳    | ۳۴                  | ۰/۲                     | ۰/۰۷         |
| ۴    | ۲۳                  | ۰/۲۵                    | ۰/۰۷         |
| ۵    | ۲۸                  | ۰/۲۵                    | ۰/۰۷         |
| ۶    | ۳۴                  | ۰/۲۵                    | ۰/۰۷         |
| ۷    | ۲۳                  | ۰/۳                     | ۰/۰۷         |
| ۸    | ۲۸                  | ۰/۳                     | ۰/۰۷         |
| ۹    | ۳۴                  | ۰/۳                     | ۰/۰۷         |





شکل ۴-۳۴- مقایسه نتایج رسوب منحرف شده (آزمایشگاهی و مدل عددی SSIM2)

جدول ۴-۳- نتایج مدل عددی SSIM و آزمایشگاهی (بدون صفحات مستغرق)

| ردیف | دبی<br>(لیتر بر<br>ثانیه) | عرض کانال<br>انحرافی (متر) | عمق آب<br>(متر) | میزان درصد رسوب<br>انحرافی به رسوب کل<br>(مشاهده شده) | میزان درصد رسوب<br>انحرافی به رسوب کل<br>(محاسبه شده) | درصد<br>خطا | ضریب<br>نش |
|------|---------------------------|----------------------------|-----------------|---|---|-------------|------------|
| ۱    | ۲۳                        | ۰/۲                        | ۰/۰۷            | ۶۸/۹۳   | ۷۹/۳  | ۱۵/۰۴       | ۰/۸۹       |
| ۲    | ۲۸                        | ۰/۲                        | ۰/۰۷            | ۵۰  | ۴۵  | ۱۰          | ۰/۹۷       |
| ۳    | ۳۴                        | ۰/۲                        | ۰/۰۷            | ۲۳/۸  | ۱۶/۹  | ۲۸/۹۹       | ۰/۹۵       |
| ۴    | ۲۳                        | ۰/۲۵                       | ۰/۰۷            | ۷۲/۷۴   | ۵۷  | ۲۱/۶۴       | ۰/۷۴       |
| ۵    | ۲۸                        | ۰/۲۵                       | ۰/۰۷            | ۵۳/۳۶   | ۷۲/۷  | ۳۶/۲۴       | ۰/۶۱       |
| ۶    | ۳۴                        | ۰/۲۵                       | ۰/۰۷            | ۲۱/۸۶   | ۱۹/۱  | ۱۲/۶۳       | ۰/۹۹       |
| ۷    | ۲۳                        | ۰/۳                        | ۰/۰۷            | ۷۸  | ۶۷/۶  | ۱۳/۳۳       | ۰/۸۹       |
| ۸    | ۲۸                        | ۰/۳                        | ۰/۰۷            | ۵۳/۵۱   | ۴۸/۹  | ۸/۶۲        | ۰/۹۸       |
| ۹    | ۳۴                        | ۰/۳                        | ۰/۰۷            | ۲۶/۱  | ۲۸/۲  | ۸/۰۵        | ۱          |
|      |                           |                            |                 |   | میانگین   | ۱۷/۱۷       | ۰/۸۹       |

جدول ۴-۴- نمونه ای از آزمایش‌های که در اعتبارسنجی شرکت داده شدند (با صفحات مستغرق)

| ردیف | دبی (لیتر بر ثانیه) | عرض کانال انحرافی (متر) | زاویه صفحات مستغرق | عمق آب (متر) |
|------|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------|
| ۱    | ۲۳                  | ۰/۳                     | ۳۰                 | ۰/۰۷         |
| ۲    | ۲۸                  | ۰/۳                     | ۳۰                 | ۰/۰۷         |
| ۳    | ۳۴                  | ۰/۳                     | ۳۰                 | ۰/۰۷         |
| ۴    | ۲۳                  | ۰/۳                     | ۴۵                 | ۰/۰۷         |
| ۵    | ۲۸                  | ۰/۳                     | ۴۵                 | ۰/۰۷         |
| ۶    | ۳۴                  | ۰/۳                     | ۴۵                 | ۰/۰۷         |
| ۷    | ۲۳                  | ۰/۳                     | ۶۰                 | ۰/۰۷         |
| ۸    | ۲۸                  | ۰/۳                     | ۶۰                 | ۰/۰۷         |
| ۹    | ۳۴                  | ۰/۳                     | ۶۰                 | ۰/۰۷         |

مطابق جدول ۴-۳ میانگین درصد خطای مدل عددی بدون صفحات مستغرق ۱۷/۱۷ درصد و مطابق

جدول ۴-۵ میانگین درصد خطای مدل عددی با صفحات مستغرق ۱۸/۵۲ درصد بوده است که این

مقدار صحت نتایج مدل عددی را گواهی می‌دهد،

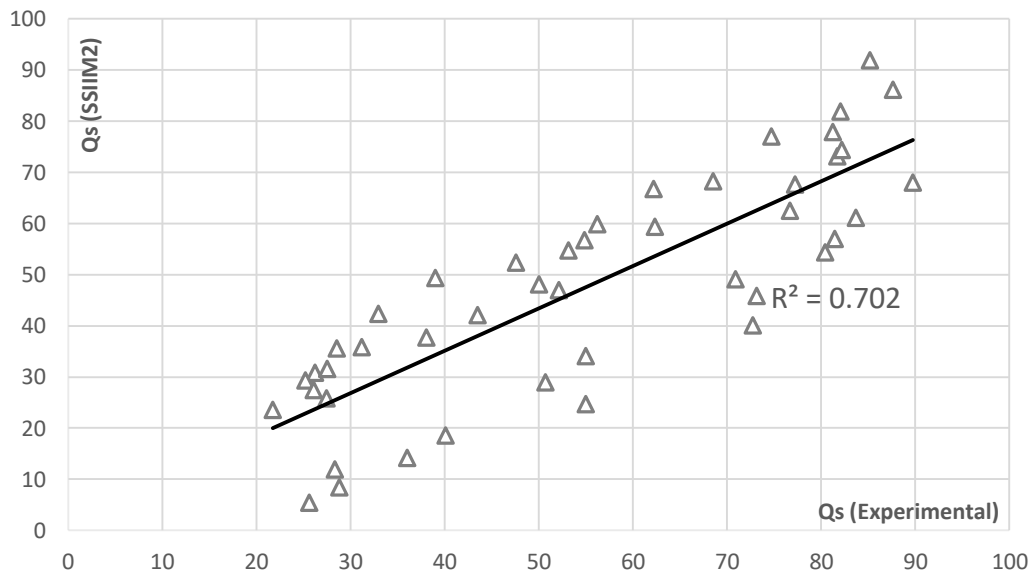
همچنین میانگین ضریب نش برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی در حالت بدون صفحات مستغرق

۰/۸۹ و در حالت با صفحات مستغرق ۰/۸۵ برآورد گردید که با توجه به این مقدار می‌توان به عملکرد

صحیح مدل پی برد.

جدول ۴-۵- نتایج مدل عددی SSIM و آزمایشگاهی (با صفحات مستغرق)

| ردیف | دبی<br>(لیتر بر<br>ثانیه) | عرض کانال<br>انحرافی<br>(متر) | عمق آب<br>(متر) | زاویه<br>صفحات<br>مستغرق | میزان درصد رسوب<br>انحرافی به رسوب کل<br>(مشاهده شده) | میزان درصد رسوب<br>انحرافی به رسوب کل<br>(محاسبه شده) | درصد<br>خطا | ضریب<br>نش |
|------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|---|---|-------------|------------|
| ۱    | ۲۳                        | .۳                            | ۰/۰۷            | ۳۰                       | ۸۳/۶۷   | ۷۵/۲  | ۱۰/۱۲       | ۰/۸۹       |
| ۲    | ۲۸                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۳۰                       | ۵۵  | ۴۴/۳  | ۱۹/۴۵       | ۰/۸۳       |
| ۳    | ۳۴                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۳۰                       | ۲۸/۷۹   | ۱۵/۶  | ۴۵/۸۱       | ۰/۷۴       |
| ۴    | ۲۳                        | .۳                            | ۰/۰۷            | ۴۵                       | ۸۲/۰۵   | ۶۹/۲  | ۱۵/۶۶       | ۰/۷۵       |
| ۵    | ۲۸                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۴۵                       | ۵۳/۱۴   | ۴۰/۸  | ۲۳/۲۲       | ۰/۷۷       |
| ۶    | ۳۴                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۴۵                       | ۲۵/۱۷   | ۲۰/۲  | ۱۹/۷۵       | ۰/۹۶       |
| ۷    | ۲۳                        | .۳                            | ۰/۰۷            | ۶۰                       | ۷۴/۶۶   | ۶۲/۶۳   | ۱۶/۱۱       | ۰/۷۸       |
| ۸    | ۲۸                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۶۰                       | ۵۰  | ۴۵/۵۵   | ۸/۹۰        | ۰/۹۷       |
| ۹    | ۳۴                        | ۰/۳                           | ۰/۰۷            | ۶۰                       | ۲۶/۰۵   | ۲۴/۰۶   | ۷/۶۴        | ۰/۹۹       |
|      |                           |                               |                 |                          |   | میانگین   | ۱۸/۵۲       | ۰/۸۵       |



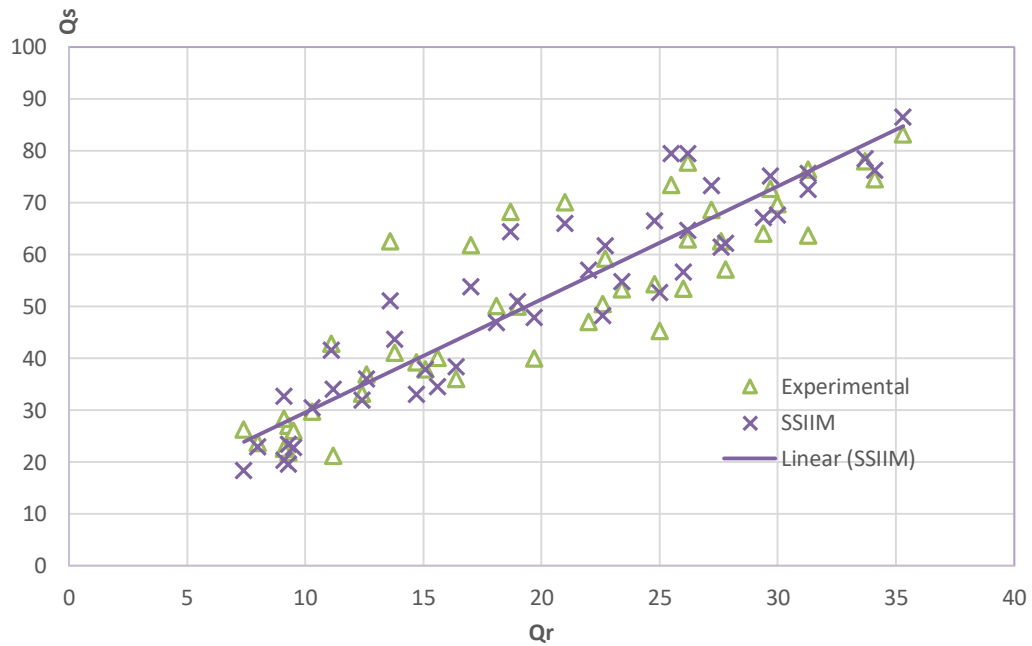
شکل ۴-۳۵- مقایسه نتایج رسوب منحرف شده (آزمایشگاهی و مدل عددی SSIM2)

حال با توجه به نتایج بدست آمده و اینکه مدل از اعتبار خوبی برخوردار است، برای مقادیری که بدلیل محدودیت های آزمایشگاهی، اندازه گیری آنها میسر نبوده است، شبیه سازی با مدل عددی انجام و نتایج در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

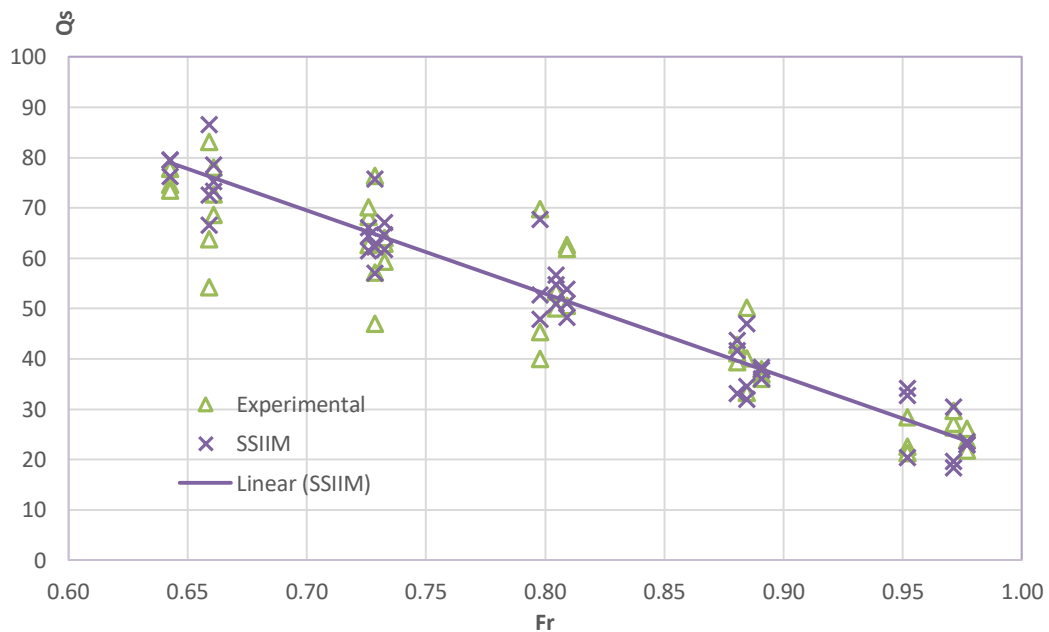
جدول ۴-۶- نتایج مدل عددی SSIM برای مقادیر آزمایش نشده

| ردیف | دبی<br>(لیتر بر<br>ثانیه) | عرض کانال<br>انحرافی<br>(متر) | عمق آب<br>(متر) | عمق<br>جریان<br>(متر) | زاویه<br>صفحات<br>مستغرق | میزان درصد رسوب<br>انحرافی به رسوب کل<br>(محاسبه شده) |
|------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|---|
| ۱    | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | -                        | ۸۲/۱۹   |
| ۲    | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | -                        | ۶۸/۶۸   |
| ۳    | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | -                        | ۵۱/۴۰   |
| ۴    | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۳۰                       | ۶۳/۷۴   |
| ۵    | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۳۰                       | ۵۰/۲۳   |
| ۶    | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۳۰                       | ۳۲/۹۵   |
| ۷    | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۴۵                       | ۸۶/۸۶   |
| ۸    | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۴۵                       | ۷۳/۳۴   |
| ۹    | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۴۵                       | ۵۶/۰۷   |
| ۱۰   | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۵۰                       | ۸۱/۴۱   |
| ۱۱   | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۵۰                       | ۶۷/۸۹   |
| ۱۲   | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۵۰                       | ۵۰/۶۲   |
| ۱۳   | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۶۰                       | ۸۳/۱۱   |
| ۱۴   | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۶۰                       | ۶۹/۶۰   |
| ۱۵   | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۶۰                       | ۵۲/۳۲   |
| ۱۶   | ۱۱۱                       | ۰/۶۶                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۷۰                       | ۸۵/۷۱   |
| ۱۷   | ۱۳۵                       | ۰/۸                           | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۷۰                       | ۷۲/۲۰   |
| ۱۸   | ۱۶۰                       | ۰/۹۸                          | ۰/۴             | ۰/۲                   | ۷۰                       | ۵۴/۹۲   |

در شکل‌های ۳۶-۴ و ۳۶-۴ نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی برای دو متغیر مهم و کلیدی دبی منحرف شده و عدد فرود، نسبت به مقدار خروجی و شبیه سازی شده در مدل عددی که همان دبی رسوب منحرف شده است، نشان داده شده است.



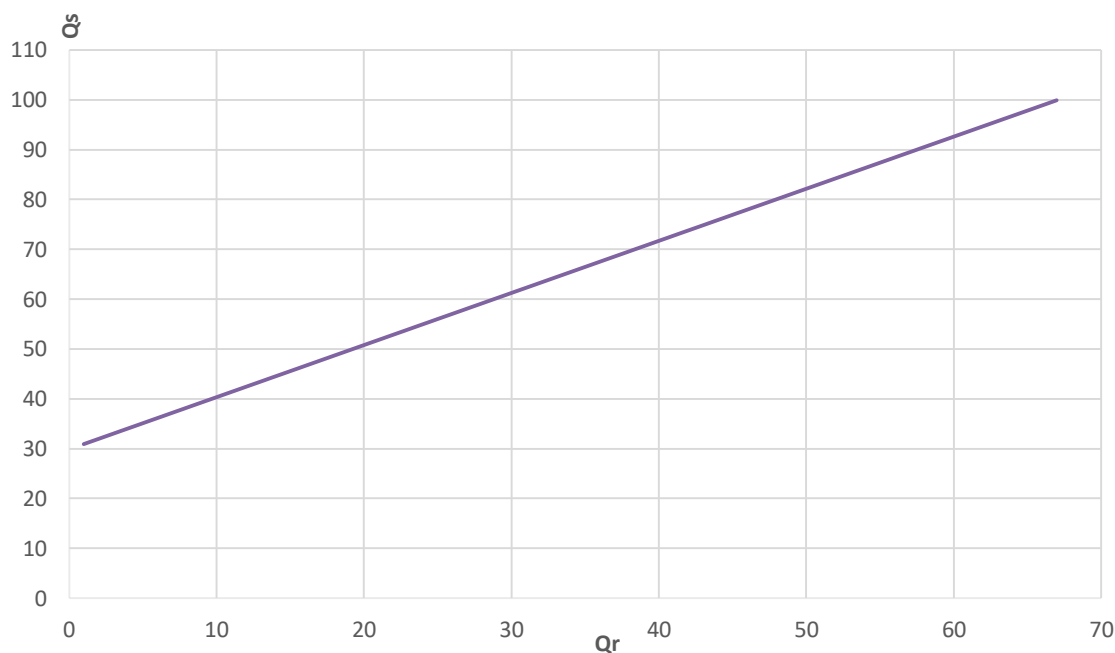
شکل ۳۶-۴- مقایسه نتایج دبی منحرف شده نسبت رسوب منحرف شده نتایج آزمایشگاهی و مدل



شکل ۳۷-۴- مقایسه نتایج عدد فرود نسبت رسوب منحرف شده نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی

### ۳-۶-۴ آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> پارامترها

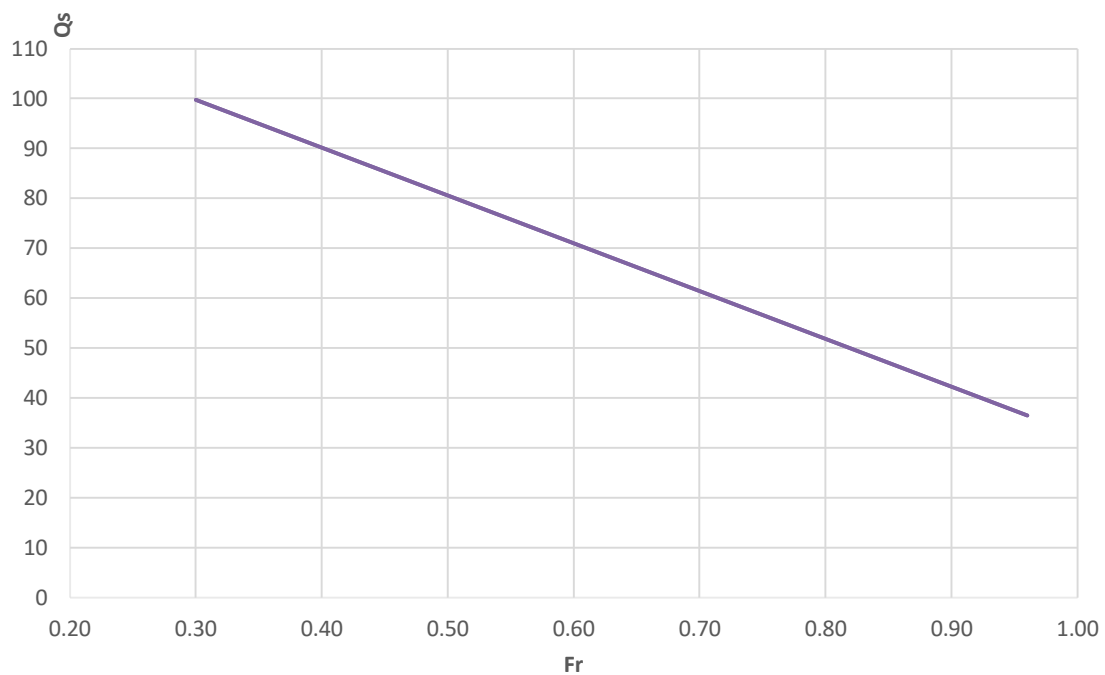
به مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل، آنالیز حساسیت گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری یا عددی به صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش بینی کرد. بدین منظور با توجه به معادله آنالیز ابعادی، متغیرهای ورودی مدل یعنی، درصد دبی منحرف شده، عدد فرود، عرض نسبی، عمق نسبی و زاویه صفحات مستغرق نسبت به متغیر خروجی مدل یعنی درصد رسوب منحرف شده، هر کدام بصورت مجزا بررسی گردیده است و نتایج آن در شکل‌های ۴-۳۸ الی ۴-۴۲ نشان داده شده است.



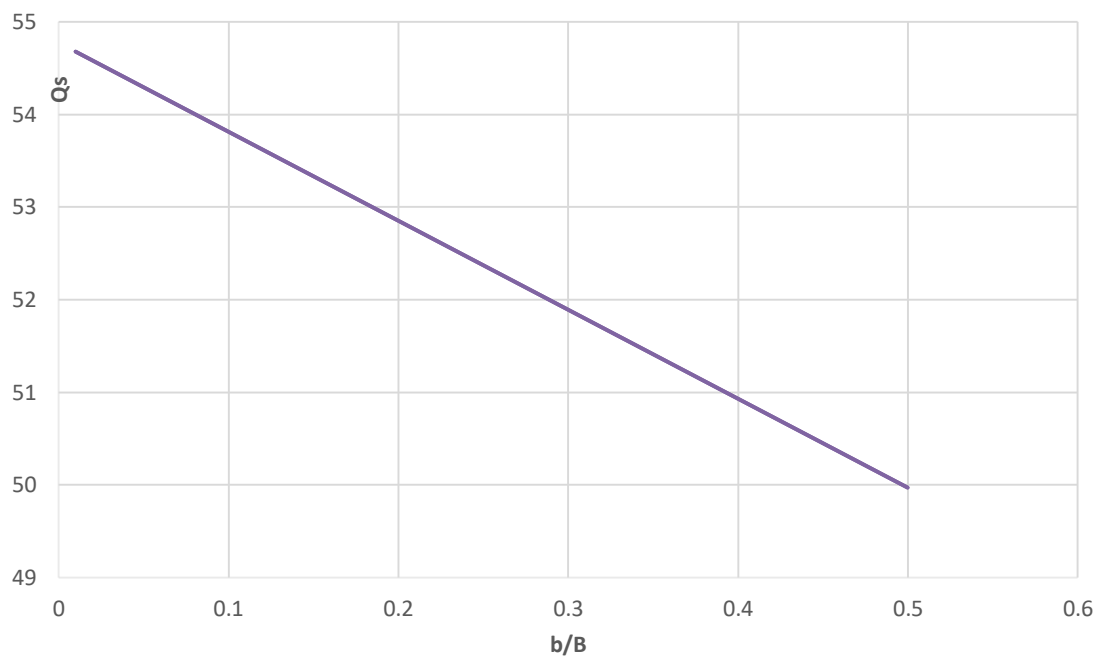
شکل ۴-۳۸- آنالیز حساسیت پارامتر دبی منحرف شده نسبت به رسوب منحرف شده (خروجی) مدل عددی

---

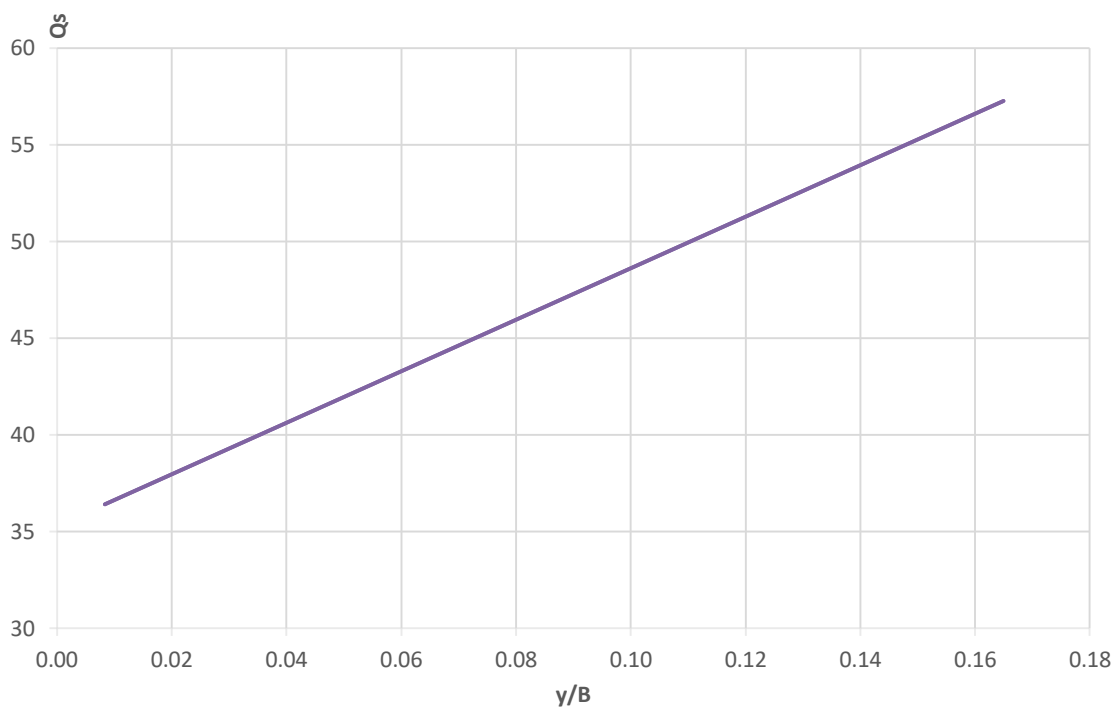
<sup>۱</sup> Sensitivity Analysis



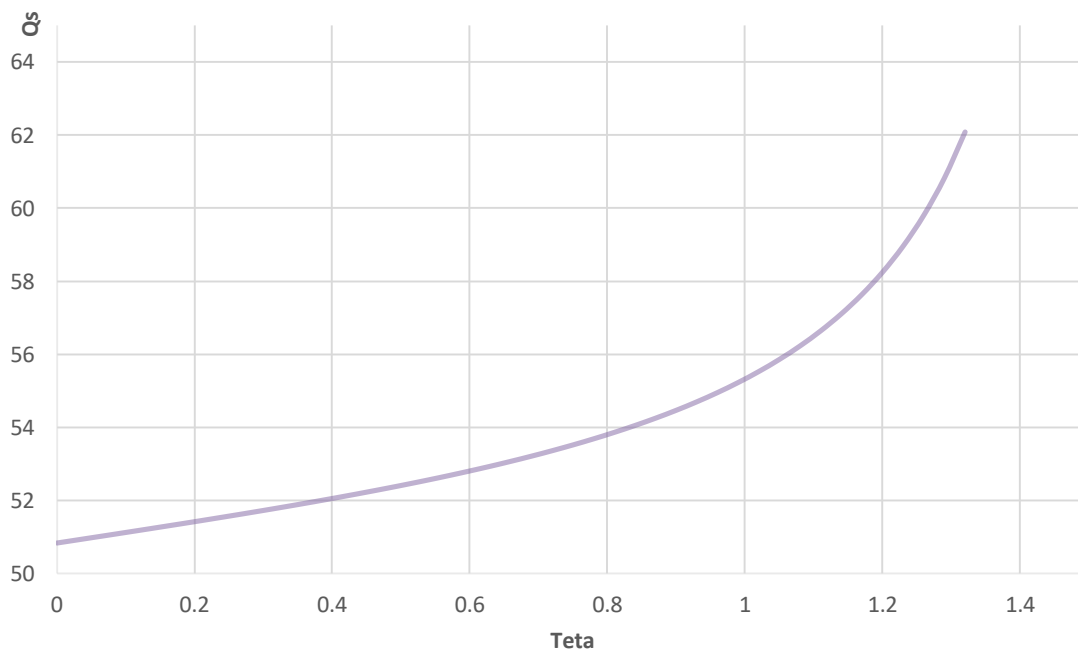
شکل ۴-۳۹- آنالیز حساسیت عدد فرود نسبت به رسوب منحرف شده (خروجی) مدل عددی



شکل ۴-۴۰- آنالیز حساسیت عرض نسبی نسبت به رسوب منحرف شده (خروجی) مدل عددی



شکل ۳۴-۴۱- مقایسه نتایج عمق نسبی نسبت رسوب منحرف شده نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی



شکل ۴-۴۲- آنالیز حساسیت زاویه صفحات مستغرق (بر حسب رادیان) نسبت به رسوب منحرف شده (خروجی) مدل عددی





فصل پنجم:

## جمع بندی و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

در رساله حاضر توسط مطالعه آزمایشگاهی در مرحله اول به بررسی تأثیر عرض کانال انحرافی بر میزان دبی منحرف شده و رسوب انحرافی به کانال فرعی پرداخته شد. در این راستا در سه عرض مختلف کانال انحرافی، متغیرهای عدد فرود جریان و عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد به بررسی تأثیر زاویه صفحات مستغرق بر میزان دبی منحرف شده و رسوب انحرافی به کانال فرعی پرداخته شد و نتایج با حالت بدون استفاده از صفحات مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا در سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای صفحات و متغیرهای عدد فرود جریان و عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدل عددی SSIIM ابتدا توسط ۱۸ آزمایش واسنجی شد و پس از صحت سنجی برای شرایط جدیدی که امکان آزمایشات جود نداشت شبیه سازی شده و در نهایت آنالیز حساسیت پارامترها انجام شده است. در این فصل نیز نتایج بدست آمده از این تحقیق و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه خواهد شد.

## ۵-۲ جمع بندی و نتیجه گیری

✓ نتایج آزمایشگاهی در تأثیر عرض کانال انحرافی نشان می دهد:

- افزایش عدد فرود از مقدار ۰/۶۵ به ۰/۹۸ به طور متوسط باعث کاهش ۲۰ درصدی دبی منحرف شده و کاهش ۴۴ درصدی رسوب منحرف شده به کانال فرعی می شود.
- با افزایش ۱/۵ برابری عرض نسبی کانال انحرافی از مقدار ۰/۳۳ به ۰/۵، در عمق نسبی ۰/۰۸ حدود ۲۰ درصد و برای اعماق نسبی بالاتر ۰/۱۲ و ۰/۱۶ هر کدام حدود ۱۰ درصد، رسوبات منحرف میگردند.

..... فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهاد ها

- با افزایش ۴۰ درصدی عمق نسبی جریان از مقدار ۰/۰۸ به ۰/۱۲، عملکرد تونلهای انتقال رسوب ۲ درصد و با افزایش ۴۰ درصدی آن از مقدار ۰/۱۲ به ۰/۱۶ عملکرد ۲۲ درصد افزایش می یابد بطوریکه از مقدار ۲/۴۳ در عمق نسبی ۰/۰۸ به ۳/۰۱ در عمق نسبی ۰/۱۶ میرسد.
- کانال انحرافی ۹۰ درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد و با کاهش عدد فرود جریان و از طرفی افزایش عمق و با مقدار عرض بدون بعد کانال انحرافی برابر ۰/۳۳ می توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به گونه ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند.
- با افزایش عرض نسبی کانال انحرافی از مقدار ۰/۳۳ به ۰/۵، تاثیر تغییرات عمق جریان بر عملکرد به شدت کاهش می یابد ولی در نسبت عرضهای کمتر، حساسیت عملکرد تونلهای انحرافی نسبت به عمق جریان بسیار چشمگیر است بطوریکه با افزایش ۱/۵ برابری عرض نسبی کانال انحرافی از مقدار ۰/۳۳ به ۰/۵، ضریب عملکرد آن ۳۹ درصد افزایش می یابد.

#### ✓ نتایج آزمایشگاهی در تاثیر زاویه صفحات مستغرق نشان می دهد:

- با افزایش ۲ برابری زاویه صفحات مستغرق از ۳۰ به ۶۰ درجه، میزان دبی منحرف شده، در عمق نسبی ۰/۰۸ حدود ۶ درصد و برای اعماق نسبی بالاتر (۰/۱۲ و ۰/۱۶) به حدود ۳ و ۱ درصد، کاهش می یابد.
- استفاده از صفحات مستغرق و زاویه ۶۰ درجه آن به همراه افزایش عدد فرود در کاهش دبی انحرافی به کانال فرعی موثر می باشد.
- در همه حالات مقادیر پارامتر عملکرد بزرگتر از ۱ بوده و در نتیجه کانال انحرافی ۹۰ درجه عملکرد مناسبی در انتقال رسوب دارد. استفاده از صفحات مستغرق باعث افزایش پارامتر عملکرد کانال انحرافی خواهد شد اما تغییرات زاویه تاثیر آنچنانی بر مقدار پارامتر عملکرد ندارد.

- با کاهش عمق جریان و با صفحات مستغرق با زاویه ۶۰ درجه می‌توان گزینه مطلوب در انتقال رسوب را فراهم نمود به گونه‌ای که در کمترین میزان دبی انحرافی بیشترین مقدار رسوبات منحرف شوند.
- در زوایای کمتر، حساسیت عملکرد تونلهای انحرافی نسبت به تغییر عمق جریان قابل چشم پوشی و در زاویه ۳۰ درجه به ۱ درصد میرسد ولی با افزایش زاویه صفحات مستغرق به ۴۵ و ۶۰ درجه، ضریب عملکرد تونلهای انتقال به ترتیب ۱۰ و ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.

#### ✓ نتایج بهینه سازی و مدل عددی SSIIM2 نشان می‌دهد:

- بر اساس اندازه گیری های انجام شده بهترین رابطه توسط الگوریتم ژنتیک جهت محاسبه دبی رسوب منحرف شده به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Q_s(\%) = 1.92 \left( 11.26 - 49.99F_r + 6.93 \frac{y}{B} + 1.5 \tan \theta + 0.544Q_r \right) + 127.24$$

- با مقایسه نتایج شبیه سازی شده مدل عددی SSIIM2 با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شد که درصد خطای مدل عددی حدود ۱۸ درصد و میانگین ضریب نش برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی حدود ۰/۸۷ برآورد گردید که با توجه به این مقدار می‌توان به عملکرد صحیح مدل پی برد.

### ۳-۵-۳ پیشنهادها

- به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی، در این تحقیق اثر اعماق بین ۵۰ و ۹۸ میلیمتر بررسی شده است که پیشنهاد میشود در تحقیقات بعدی برای اعماق کمتر و بیشتر از این رنج بررسی صورت گیرد.
- به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی، در این تحقیق جریان زیر بحرانی و با اعداد فرود بین ۰,۶۶ و ۰,۹۷ بوده است که پیشنهاد میشود در تحقیقات بعدی برای اعداد فرود کمتر از ۰,۶۶ و همچنین جریان فوق بحرانی بررسی صورت گیرد.
- به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی، در این تحقیق اثر صفحات مستغرق در یک سوم از عرض کانال بررسی شده است که پیشنهاد میشود در تحقیقات بعدی برای عرض دو سوم بررسی انجام شود.
- در این رساله طول صفحات مستغرق متفاوت فرض شده است که بررسی صفحات مستغرق با طول یکسان و ارتفاع های بیشتر و تاثیر اثر طول و ارتفاع آن توصیه میشود.

پیوست

## پیوست الف - نتایج آزمایشگاهی

| ردیف | Fr   | b  | b/B  | y | y/B  | teta | Qm (m <sup>3</sup> /s) | Ql (m <sup>3</sup> /s) | Qr (%) | Qsm (gr) | Qsl (gr) | Qs (%) |
|------|------|----|------|---|------|------|------------------------|------------------------|--------|----------|----------|--------|
| 1    | 0.66 | 20 | 0.33 | 5 | 0.08 | -    | 13.5                   | 3.35                   | 24.8   | 7027     | 3815     | 54.2   |
| 2    | 0.73 | 20 | 0.33 | 5 | 0.08 | -    | 15.2                   | 3.36                   | 22     | 6497     | 3055     | 47.0   |
| 3    | 0.80 | 20 | 0.33 | 5 | 0.08 | -    | 17                     | 3.35                   | 19.7   | 5967     | 2387     | 40.0   |
| 4    | 0.88 | 20 | 0.33 | 5 | 0.08 | -    | 18.5                   | 2.29                   | 12.4   | 8863     | 2947     | 33.2   |
| 5    | 0.97 | 20 | 0.33 | 5 | 0.08 | -    | 20                     | 1.48                   | 7.4    | 1175     | 3097     | 26.3   |
| 6    | 0.66 | 25 | 0.41 | 5 | 0.08 | -    | 13.5                   | 4.23                   | 31.3   | 1430     | 9119     | 63.7   |
| 7    | 0.73 | 25 | 0.41 | 5 | 0.08 | -    | 15.2                   | 4.24                   | 27.8   | 1311     | 7494     | 57.1   |
| 8    | 0.80 | 25 | 0.41 | 5 | 0.08 | -    | 17                     | 4.25                   | 25     | 1192     | 5413     | 45.3   |
| 9    | 0.88 | 25 | 0.41 | 5 | 0.08 | -    | 18.5                   | 2.89                   | 15.6   | 1034     | 4154     | 40.1   |
| 10   | 0.97 | 25 | 0.41 | 5 | 0.08 | -    | 20                     | 1.86                   | 9.3    | 8759     | 2374     | 27.1   |
| 11   | 0.64 | 30 | 0.5  | 5 | 0.08 | -    | 13.5                   | 4.60                   | 34.1   | 5015     | 3741     | 74.5   |
| 12   | 0.73 | 30 | 0.5  | 5 | 0.08 | -    | 15.2                   | 4.21                   | 27.6   | 7375     | 4615     | 62.5   |
| 13   | 0.81 | 30 | 0.5  | 5 | 0.08 | -    | 17                     | 3.84                   | 22.6   | 9735     | 4920     | 50.5   |
| 14   | 0.88 | 30 | 0.5  | 5 | 0.08 | -    | 18.5                   | 2.72                   | 14.7   | 1187     | 4666     | 39.3   |
| 15   | 0.95 | 30 | 0.5  | 5 | 0.08 | -    | 20                     | 1.82                   | 9.1    | 1400     | 3988     | 28.4   |
| 16   | 0.66 | 20 | 0.33 | 7 | 0.12 | -    | 23                     | 6.26                   | 27.2   | 5337     | 3663     | 68.6   |
| 17   | 0.73 | 20 | 0.33 | 7 | 0.12 | -    | 25.5                   | 5.79                   | 22.7   | 7334     | 4349     | 59.3   |
| 18   | 0.80 | 20 | 0.33 | 7 | 0.12 | -    | 28                     | 5.32                   | 19     | 9330     | 4665     | 50     |
| 19   | 0.89 | 20 | 0.33 | 7 | 0.12 | -    | 31                     | 3.91                   | 12.6   | 1212     | 4473     | 36.9   |
| 20   | 0.98 | 20 | 0.33 | 7 | 0.12 | -    | 34                     | 2.72                   | 8      | 1491     | 3549     | 23.8   |
| 21   | 0.66 | 25 | 0.41 | 7 | 0.12 | -    | 23                     | 6.83                   | 29.7   | 6054     | 4403     | 72.7   |



| Qs (%) | Qsl(g r) | Qsm (gr) | Qr (%) | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) | teta | y/B  | y   | b/B  | b  | Fr   | ردیف |
|--------|----------|----------|--------|-----------|-----------|------|------|-----|------|----|------|------|
| 62.9   | 3921     | 6229     | 26.2   | 6.68      | 25.5      | -    | 0.12 | 7   | 0.41 | 25 | 0.73 | 22   |
| 53.3   | 3418     | 6405     | 23.4   | 6.55      | 28        | -    | 0.12 | 7   | 0.41 | 25 | 0.80 | 23   |
| 37.9   | 4164     | 1096     | 15.1   | 4.68      | 31        | -    | 0.12 | 7   | 0.41 | 25 | 0.89 | 24   |
| 21.8   | 3393     | 1552     | 9.3    | 3.16      | 34        | -    | 0.12 | 7   | 0.41 | 25 | 0.98 | 25   |
| 78     | 3909     | 5012     | 33.7   | 7.75      | 23        | -    | 0.12 | 7   | 0.5  | 30 | 0.66 | 26   |
| 64.0   | 4478     | 6988     | 29.4   | 7.50      | 25.5      | -    | 0.12 | 7   | 0.5  | 30 | 0.73 | 27   |
| 53.5   | 4797     | 8964     | 26     | 7.28      | 28        | -    | 0.12 | 7   | 0.5  | 30 | 0.80 | 28   |
| 36.1   | 3793     | 1050     | 16.4   | 5.08      | 31        | -    | 0.12 | 7   | 0.5  | 30 | 0.89 | 29   |
| 26.1   | 3144     | 1204     | 9.5    | 3.23      | 34        | -    | 0.12 | 7   | 0.5  | 30 | 0.98 | 30   |
| 73.4   | 3937     | 5357     | 25.5   | 9.69      | 38        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.33 | 20 | 0.64 | 31   |
| 68.2   | 4202     | 6156     | 18.7   | 7.85      | 42        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.33 | 20 | 0.73 | 32   |
| 62.6   | 4354     | 6954     | 13.6   | 6.26      | 46        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.33 | 20 | 0.81 | 33   |
| 42.8   | 4506     | 1052     | 11.1   | 5.66      | 51        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.33 | 20 | 0.88 | 34   |
| 22.6   | 3187     | 1409     | 9.1    | 5.10      | 56        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.33 | 20 | 0.95 | 35   |
| 77.7   | 3305     | 4249     | 26.2   | 9.96      | 38        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.41 | 25 | 0.64 | 36   |
| 70.0   | 3885     | 5542     | 21     | 8.82      | 42        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.41 | 25 | 0.73 | 37   |
| 61.8   | 4230     | 6835     | 17     | 7.82      | 46        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.41 | 25 | 0.81 | 38   |
| 41.1   | 4435     | 1078     | 13.8   | 7.04      | 51        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.41 | 25 | 0.88 | 39   |
| 21.2   | 3126     | 1472     | 11.2   | 6.27      | 56        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.41 | 25 | 0.95 | 40   |
| 83.1   | 2756     | 3314     | 35.3   | 13.4      | 38        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.5  | 30 | 0.66 | 41   |
| 76.4   | 3554     | 4649     | 31.3   | 13.1      | 42        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.5  | 30 | 0.73 | 42   |
| 69.7   | 4173     | 5984     | 30     | 13.8      | 46        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.5  | 30 | 0.80 | 43   |
| 50.1   | 4850     | 9677     | 18.1   | 9.23      | 51        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.5  | 30 | 0.88 | 44   |
| 29.7   | 3978     | 1337     | 10.3   | 5.77      | 56        | -    | 0.16 | 9.8 | 0.5  | 30 | 0.97 | 45   |
| 80.4   | 2872     | 3571     | 30.8   | 4.16      | 13.5      | 30   | 0.08 | 50  | 0.5  | 30 | 0.64 | 46   |
| 72.7   | 6459     | 8883     | 24.8   | 3.79      | 15.2      | 30   | 0.08 | 50  | 0.5  | 30 | 0.73 | 47   |

| Qs (%) | Qsl(g r) | Qsm (gr) | Qr (%) | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) | teta | y/B  | y | b/B | b  | Fr   | ردیف |
|--------|----------|----------|--------|-----------|-----------|------|------|---|-----|----|------|------|
| 55     | 7808     | 1419     | 17.7   | 3.01      | 17        | 30   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.81 | 48   |
| 36     | 4858     | 1349     | 14.2   | 2.63      | 18.5      | 30   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.88 | 49   |
| 25.6   | 3277     | 1279     | 12.3   | 2.47      | 20        | 30   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.95 | 50   |
| 81.6   | 3033     | 3714     | 28.1   | 3.79      | 13.5      | 45   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.66 | 51   |
| 56.2   | 4811     | 8561     | 21.8   | 3.33      | 15.2      | 45   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.73 | 52   |
| 39     | 5229     | 1340     | 18.1   | 3.08      | 17        | 45   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.80 | 53   |
| 31.1   | 4575     | 1466     | 13.2   | 2.45      | 18.5      | 45   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.88 | 54   |
| 27.4   | 4374     | 1592     | 11.5   | 2.32      | 20        | 45   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.97 | 55   |
| 62.1   | 4446     | 7150     | 24.0   | 3.25      | 13.5      | 60   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.64 | 56   |
| 47.5   | 4878     | 1025     | 17.9   | 2.74      | 15.2      | 60   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.73 | 57   |
| 32.9   | 4401     | 1336     | 16.1   | 2.74      | 17        | 60   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.81 | 58   |
| 26.2   | 3559     | 1356     | 11.5   | 2.14      | 18.5      | 60   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.88 | 59   |
| 21.7   | 2991     | 1376     | 11.2   | 2.24      | 20        | 60   | 0.08 | 5 | 0.5 | 30 | 0.95 | 60   |
| 83.6   | 2904     | 3471     | 32.9   | 7.58      | 23        | 30   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.64 | 61   |
| 70.9   | 2707     | 3818     | 29.2   | 7.45      | 25.5      | 30   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.73 | 62   |
| 55     | 2291     | 4165     | 22.4   | 6.28      | 28        | 30   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.81 | 63   |
| 40.0   | 3698     | 9225     | 14.1   | 4.30      | 30.5      | 30   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.88 | 64   |
| 28.7   | 4113     | 1428     | 11.0   | 3.64      | 33        | 30   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.95 | 65   |
| 82.0   | 2576     | 3139     | 32.3   | 7.43      | 23        | 45   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.66 | 66   |
| 68.5   | 3906     | 5699     | 25.6   | 6.55      | 25.5      | 45   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.73 | 67   |
| 53.1   | 4389     | 8258     | 19.0   | 5.33      | 28        | 45   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.80 | 68   |
| 43.4   | 4681     | 1077     | 14.8   | 4.54      | 30.5      | 45   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.88 | 69   |
| 25.1   | 3343     | 1328     | 10.7   | 3.54      | 33        | 45   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.97 | 70   |
| 74.6   | 3651     | 4890     | 29.6   | 6.83      | 23        | 60   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.64 | 71   |
| 62.3   | 6129     | 9832     | 20.4   | 5.22      | 25.5      | 60   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.73 | 72   |
| 50     | 7388     | 1477     | 17.2   | 4.84      | 28        | 60   | 0.12 | 7 | 0.5 | 30 | 0.81 | 73   |

| Qs (%) | Qsl(gr) | Qsm (gr) | Qr (%) | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) | teta | y/B  | y   | b/B | b  | Fr   | ردیف |
|--------|---------|----------|--------|-----------|-----------|------|------|-----|-----|----|------|------|
| 38.0   | 5444    | 1431     | 13.9   | 4.32      | 31        | 60   | 0.12 | 7   | 0.5 | 30 | 0.88 | 74   |
| 26.0   | 3611    | 1386     | 10.7   | 3.64      | 34        | 60   | 0.12 | 7   | 0.5 | 30 | 0.95 | 75   |
| 89.7   | 1768    | 1970     | 35.1   | 13.3      | 38        | 30   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.66 | 76   |
| 81.4   | 2901    | 3563     | 30.9   | 13.0      | 42        | 30   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.73 | 77   |
| 73.1   | 3769    | 5155     | 26.7   | 12.3      | 46        | 30   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.80 | 78   |
| 50.7   | 4672    | 9214     | 18.4   | 9.42      | 51        | 30   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.88 | 79   |
| 28.3   | 3761    | 1327     | 10.2   | 5.72      | 56        | 30   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.97 | 80   |
| 85.1   | 2447    | 2873     | 35.8   | 13.6      | 38        | 45   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.66 | 81   |
| 81.1   | 2887    | 3556     | 28.8   | 12.1      | 42        | 45   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.73 | 82   |
| 77.1   | 3272    | 4240     | 25.4   | 11.6      | 46        | 45   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.80 | 83   |
| 54.8   | 4752    | 8665     | 19.7   | 9.70      | 49        | 45   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.85 | 84   |
| 28.5   | 3925    | 1377     | 10.6   | 5.99      | 56        | 45   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.97 | 85   |
| 87.6   | 2160    | 2465     | 34.0   | 12.9      | 38        | 60   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.66 | 86   |
| 82.1   | 2847    | 3467     | 29.0   | 12.2      | 42        | 60   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.73 | 87   |
| 76.6   | 3425    | 4468     | 24.1   | 11.0      | 46        | 60   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.80 | 88   |
| 52.1   | 4686    | 8995     | 17.2   | 8.81      | 51        | 60   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.88 | 89   |
| 27.5   | 3723    | 1352     | 10.4   | 5.85      | 56        | 60   | 0.16 | 9.8 | 0.5 | 30 | 0.97 | 90   |

## پیوست ب-1 کد الگوریتم ژنتیک

```

clc;
clear
close all
x=xlsread('data.xlsx');
x(isnan(x)==1)=0;
y=x(:,end);
x(:,end)=[];
x1=[ones(size(x,1),1) x ];
x2=[ones(size(x,1),1) x log(x+1)];
q1=regress(y,x1);
q2=regress(y,x2);
y1=x1*q1;
y2=x2*q2;

err=abs((y-y1)./y)*100;
mean(err)
max(err)
err1=abs((y-y2)./y)*100;
mean(err1)
max(err1)

EQ=@(q) Var(q,x1,y);
% xn=ga(EQ,size(x1,2),[],[],[],-50*ones(1,6),50*ones(1,6));
xn=[ 46.5545 -43.5016 -20.7018 10.3212 0.0601 1.7608];
% xn=[30.5472 -49.9999 -1.0884 7.7621 0.0485 0.6482];

y1=xn*x1';
qq=polyfit(y1,y',1);
y1=polyval(qq,y1);
y2=abs(y1'-y);
err=mean((abs(y2./y)'*100))

```

## پیوست ب-2 تابع Function

```

function [y1]=var(q,x,y)
% y1=q*x'-y';
y2=q*x';

```

```
% y1=mean(abs(y1./y')*100);  
% 46.5545 -43.5016 -20.7018 10.3212 0.0601 1.7608
```

```
y1=corrcoef(y2,y');  
y1=1-y1(1,2);  
% 30.5472 -49.9999 -1.0884 7.7621 0.0485 0.6482
```

### پیوست ج- مقایسه خطاها و ضریب همبستگی در فرمولهای الگوریتم ژنتیک

| E (%) | Eq. 4 | E (%) | Eq. 3 | E (%) | Eq. 2 | E (%) | Eq. 1 | Qs (%) | Qr (%) | teta | y/B  | b/B  | Fr   | ردیف |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| 22.9  | 66.7  | 17.0  | 63.5  | 22.5  | 66.5  | 16.9  | 63.4  | 54.2   | 24.8   | 0    | 0.08 | 0.33 | 0.66 | 1    |
| 21.6  | 57.1  | 17.8  | 55.4  | 21.1  | 56.9  | 17.9  | 55.4  | 47.0   | 22     | 0    | 0.08 | 0.33 | 0.73 | 2    |
| 20.2  | 48.1  | 20.3  | 48.1  | 19.6  | 47.8  | 20.4  | 48.2  | 40.0   | 19.7   | 0    | 0.08 | 0.33 | 0.80 | 3    |
| 3.22  | 32.1  | 4.41  | 31.7  | 3.99  | 31.9  | 4.04  | 31.9  | 33.2   | 12.4   | 0    | 0.08 | 0.33 | 0.88 | 4    |
| 29.2  | 18.6  | 27.1  | 19.2  | 30.2  | 18.3  | 26.4  | 19.3  | 26.3   | 7.4    | 0    | 0.08 | 0.33 | 0.97 | 5    |
| 14.1  | 72.7  | 14.5  | 73.0  | 13.7  | 72.5  | 14.4  | 72.9  | 63.7   | 31.3   | 0    | 0.08 | 0.41 | 0.66 | 6    |
| 9.26  | 62.4  | 11.5  | 63.7  | 8.91  | 62.2  | 11.5  | 63.7  | 57.1   | 27.8   | 0    | 0.08 | 0.41 | 0.73 | 7    |
| 16.4  | 52.8  | 22.6  | 55.6  | 15.9  | 52.6  | 22.7  | 55.7  | 45.3   | 25     | 0    | 0.08 | 0.41 | 0.80 | 8    |
| 13.4  | 34.7  | 10.8  | 35.8  | 14.1  | 34.5  | 10.4  | 35.9  | 40.1   | 15.6   | 0    | 0.08 | 0.41 | 0.88 | 9    |
| 26.6  | 19.8  | 22.1  | 21.0  | 27.6  | 19.6  | 21.3  | 21.3  | 27.1   | 9.3    | 0    | 0.08 | 0.41 | 0.97 | 10   |
| 2.43  | 76.4  | 3.29  | 77.0  | 2.15  | 76.1  | 3.30  | 77.0  | 74.5   | 34.1   | 0    | 0.08 | 0.5  | 0.64 | 11   |
| 1.49  | 61.6  | 0.68  | 62.1  | 1.87  | 61.4  | 0.54  | 62.2  | 62.5   | 27.6   | 0    | 0.08 | 0.5  | 0.73 | 12   |
| 4.15  | 48.4  | 1.58  | 49.7  | 4.64  | 48.1  | 1.29  | 49.8  | 50.5   | 22.6   | 0    | 0.08 | 0.5  | 0.81 | 13   |
| 15.0  | 33.3  | 15.6  | 33.1  | 15.8  | 33.0  | 15.0  | 33.3  | 39.3   | 14.7   | 0    | 0.08 | 0.5  | 0.88 | 14   |
| 27.2  | 20.7  | 28.6  | 20.3  | 28.4  | 20.3  | 27.5  | 20.6  | 28.4   | 9.1    | 0    | 0.08 | 0.5  | 0.95 | 15   |
| 7.26  | 73.6  | 4.59  | 71.7  | 6.93  | 73.3  | 4.51  | 71.7  | 68.6   | 27.2   | 0    | 0.12 | 0.33 | 0.66 | 16   |
| 4.60  | 62.0  | 2.47  | 60.7  | 4.21  | 61.8  | 2.47  | 60.7  | 59.3   | 22.7   | 0    | 0.12 | 0.33 | 0.73 | 17   |
| 2.54  | 51.2  | 2.13  | 51.0  | 2.06  | 51.0  | 2.22  | 51.1  | 50     | 19     | 0    | 0.12 | 0.33 | 0.80 | 18   |
| 1.53  | 36.3  | 1.92  | 36.1  | 2.25  | 36.0  | 1.58  | 36.3  | 36.9   | 12.6   | 0    | 0.12 | 0.33 | 0.89 | 19   |
| 2.25  | 23.2  | 2.07  | 24.2  | 3.39  | 22.9  | 2.83  | 24.4  | 23.8   | 8      | 0    | 0.12 | 0.33 | 0.98 | 20   |
| 3.73  | 75.4  | 2.64  | 74.6  | 3.42  | 75.2  | 2.61  | 74.6  | 72.7   | 29.7   | 0    | 0.12 | 0.41 | 0.66 | 21   |

| E (%) | Eq. 3 | E (%) | Eq. 2 | E (%) | Eq. 1 | Qs (%) | Qr (%) | teta | y/B  | b/B  | Fr   | ردیف |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| 3.74  | 65.2  | 2.77  | 64.6  | 3.78  | 65.3  | 62.9   | 26.2   | 0    | 0.12 | 0.41 | 0.73 | 22   |
| 6.97  | 57.0  | 2.81  | 54.8  | 7.08  | 57.1  | 53.3   | 23.4   | 0    | 0.12 | 0.41 | 0.80 | 23   |
| 2.88  | 39.0  | 0.17  | 37.9  | 3.30  | 39.2  | 37.9   | 15.1   | 0    | 0.12 | 0.41 | 0.89 | 24   |
| 15.2  | 25.1  | 7.88  | 23.5  | 16.3  | 25.4  | 21.8   | 9.3    | 0    | 0.12 | 0.41 | 0.98 | 25   |
| 2.38  | 79.8  | 0.70  | 78.5  | 2.39  | 79.8  | 78     | 33.7   | 0    | 0.12 | 0.5  | 0.66 | 26   |
| 7.95  | 69.1  | 4.81  | 67.1  | 8.04  | 69.2  | 64.0   | 29.4   | 0    | 0.12 | 0.5  | 0.73 | 27   |
| 12.0  | 59.9  | 5.98  | 56.7  | 12.2  | 60.0  | 53.5   | 26     | 0    | 0.12 | 0.5  | 0.80 | 28   |
| 10.2  | 39.8  | 6.37  | 38.4  | 10.8  | 40.0  | 36.1   | 16.4   | 0    | 0.12 | 0.5  | 0.89 | 29   |
| 7.57  | 24.1  | 12.1  | 22.9  | 6.40  | 24.4  | 26.1   | 9.5    | 0    | 0.12 | 0.5  | 0.98 | 30   |
| 3.17  | 75.8  | 8.16  | 79.4  | 3.12  | 75.7  | 73.4   | 25.5   | 0    | 0.16 | 0.33 | 0.64 | 31   |
| 11.4  | 60.4  | 5.68  | 64.3  | 11.4  | 60.4  | 68.2   | 18.7   | 0    | 0.16 | 0.33 | 0.73 | 32   |
| 23.5  | 47.8  | 18.4  | 51.0  | 23.3  | 47.9  | 62.6   | 13.6   | 0    | 0.16 | 0.33 | 0.81 | 33   |
| 6.21  | 40.1  | 2.84  | 41.6  | 5.88  | 40.3  | 42.8   | 11.1   | 0    | 0.16 | 0.33 | 0.88 | 34   |
| 47.2  | 33.2  | 44.4  | 32.6  | 47.9  | 33.4  | 22.6   | 9.1    | 0    | 0.16 | 0.33 | 0.95 | 35   |
| 2.63  | 75.7  | 2.15  | 79.4  | 2.60  | 75.7  | 77.7   | 26.2   | 0    | 0.16 | 0.41 | 0.64 | 36   |
| 10.1  | 62.9  | 5.80  | 66.0  | 10.0  | 63.0  | 70.0   | 21     | 0    | 0.16 | 0.41 | 0.73 | 37   |
| 15.6  | 52.2  | 12.9  | 53.8  | 15.4  | 52.3  | 61.8   | 17     | 0    | 0.16 | 0.41 | 0.81 | 38   |
| 5.43  | 43.3  | 6.12  | 43.6  | 5.86  | 43.5  | 41.1   | 13.8   | 0    | 0.16 | 0.41 | 0.88 | 39   |
| 67.2  | 35.5  | 60.5  | 34.0  | 68.2  | 35.7  | 21.2   | 11.2   | 0    | 0.16 | 0.41 | 0.95 | 40   |
| 6.44  | 88.5  | 4.01  | 86.5  | 6.42  | 88.5  | 83.1   | 35.3   | 0    | 0.16 | 0.5  | 0.66 | 41   |
| 2.63  | 78.4  | 1.01  | 75.6  | 2.68  | 78.4  | 76.4   | 31.3   | 0    | 0.16 | 0.5  | 0.73 | 42   |
| 4.46  | 72.8  | 2.98  | 67.6  | 4.54  | 72.8  | 69.7   | 30     | 0    | 0.16 | 0.5  | 0.80 | 43   |
| 2.51  | 48.8  | 6.44  | 46.8  | 2.11  | 49.0  | 50.1   | 18.1   | 0    | 0.16 | 0.5  | 0.88 | 44   |
| 6.41  | 31.6  | 2.26  | 30.4  | 7.40  | 31.9  | 29.7   | 10.3   | 0    | 0.16 | 0.5  | 0.97 | 45   |
| 29.2  | 56.9  | 32.4  | 54.3  | 28.9  | 57.1  | 80.4   | 30.8   | 30   | 0.08 | 0.5  | 0.64 | 46   |
| 41.0  | 42.8  | 44.8  | 40.0  | 40.5  | 43.2  | 72.7   | 24.8   | 30   | 0.08 | 0.5  | 0.73 | 47   |

| E (%) | Eq. 3 | E (%) | Eq. 2 | E (%) | Eq. 1 | Qs (%) | Qr (%) | teta | y/B  | b/B | Fr   | ردیف |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|-----|------|------|
| 51.0  | 26.9  | 55.2  | 24.6  | 50.3  | 27.3  | 55     | 17.7   | 30   | 0.08 | 0.5 | 0.81 | 48   |
| 51.1  | 17.6  | 60.7  | 14.1  | 49.9  | 18.0  | 36     | 14.2   | 30   | 0.08 | 0.5 | 0.88 | 49   |
| 57.1  | 10.9  | 79.1  | 5.34  | 55.3  | 11.4  | 25.6   | 12.3   | 30   | 0.08 | 0.5 | 0.95 | 50   |
| 14.2  | 70.0  | 10.5  | 73.0  | 14.1  | 70.0  | 81.6   | 28.1   | 45   | 0.08 | 0.5 | 0.66 | 51   |
| 0.12  | 56.2  | 6.44  | 59.8  | 0.30  | 56.3  | 56.2   | 21.8   | 45   | 0.08 | 0.5 | 0.73 | 52   |
| 19.5  | 46.6  | 26.2  | 49.2  | 19.8  | 46.7  | 39     | 18.1   | 45   | 0.08 | 0.5 | 0.80 | 53   |
| 9.75  | 34.2  | 14.8  | 35.8  | 10.4  | 34.4  | 31.1   | 13.2   | 45   | 0.08 | 0.5 | 0.88 | 54   |
| 1.04  | 27.1  | 6.12  | 25.7  | 0.20  | 27.4  | 27.4   | 11.5   | 45   | 0.08 | 0.5 | 0.97 | 55   |
| 1.51  | 61.2  | 7.17  | 66.6  | 1.33  | 61.3  | 62.1   | 24.0   | 60   | 0.08 | 0.5 | 0.64 | 56   |
| 1.08  | 47.0  | 9.98  | 52.2  | 0.68  | 47.2  | 47.5   | 17.9   | 60   | 0.08 | 0.5 | 0.73 | 57   |
| 20.7  | 39.7  | 28.5  | 42.3  | 21.4  | 39.9  | 32.9   | 16.1   | 60   | 0.08 | 0.5 | 0.81 | 58   |
| 9.28  | 28.6  | 17.0  | 30.7  | 10.3  | 28.9  | 26.2   | 11.5   | 60   | 0.08 | 0.5 | 0.88 | 59   |
| 12.9  | 24.5  | 8.15  | 23.5  | 14.1  | 24.8  | 21.7   | 11.2   | 60   | 0.08 | 0.5 | 0.95 | 60   |
| 22.5  | 64.8  | 26.9  | 61.0  | 22.2  | 65.0  | 83.6   | 32.9   | 30   | 0.12 | 0.5 | 0.64 | 61   |
| 23.1  | 54.4  | 30.6  | 49.1  | 22.8  | 54.7  | 70.9   | 29.2   | 30   | 0.12 | 0.5 | 0.73 | 62   |
| 28.9  | 39.1  | 38.0  | 34.0  | 28.2  | 39.4  | 55     | 22.4   | 30   | 0.12 | 0.5 | 0.81 | 63   |
| 45.6  | 21.8  | 53.7  | 18.5  | 44.5  | 22.2  | 40.0   | 14.1   | 30   | 0.12 | 0.5 | 0.88 | 64   |
| 54.2  | 13.1  | 70.5  | 8.48  | 52.6  | 13.6  | 28.7   | 11.0   | 30   | 0.12 | 0.5 | 0.95 | 65   |
| 0.84  | 81.3  | 0.16  | 81.9  | 0.86  | 81.3  | 82.0   | 32.3   | 45   | 0.12 | 0.5 | 0.66 | 66   |
| 2.30  | 66.9  | 0.29  | 68.3  | 2.22  | 67.0  | 68.5   | 25.6   | 45   | 0.12 | 0.5 | 0.73 | 67   |
| 1.09  | 52.5  | 3.04  | 54.7  | 0.08  | 52.7  | 53.1   | 19.0   | 45   | 0.12 | 0.5 | 0.80 | 68   |
| 4.84  | 41.3  | 3.17  | 42.0  | 4.40  | 41.5  | 43.4   | 14.8   | 45   | 0.12 | 0.5 | 0.88 | 69   |
| 19.8  | 30.1  | 16.8  | 29.4  | 20.7  | 30.4  | 25.1   | 10.7   | 45   | 0.12 | 0.5 | 0.97 | 70   |
| 0.31  | 74.8  | 3.18  | 77.0  | 0.37  | 74.9  | 74.6   | 29.6   | 60   | 0.12 | 0.5 | 0.64 | 71   |
| 10.8  | 55.5  | 4.65  | 59.4  | 10.6  | 55.7  | 62.3   | 20.4   | 60   | 0.12 | 0.5 | 0.73 | 72   |
| 7.83  | 46.0  | 3.84  | 48.0  | 7.43  | 46.2  | 50     | 17.2   | 60   | 0.12 | 0.5 | 0.81 | 73   |



| E (%) | Eq. 3 | E (%) | Eq. 2 | E (%) | Eq. 1 | Qs (%) | Qr (%) | teta | y/B  | b/B | Fr   | ردیف |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|-----|------|------|
| 2.76  | 36.9  | 0.79  | 37.7  | 2.12  | 37.2  | 38.0   | 13.9   | 60   | 0.12 | 0.5 | 0.88 | 74   |
| 7.83  | 28.0  | 5.58  | 27.5  | 8.91  | 28.3  | 26.0   | 10.7   | 60   | 0.12 | 0.5 | 0.95 | 75   |
| 17.9  | 73.5  | 24.3  | 67.9  | 17.7  | 73.7  | 89.7   | 35.1   | 30   | 0.16 | 0.5 | 0.66 | 76   |
| 22.4  | 63.1  | 30.1  | 56.8  | 22.1  | 63.3  | 81.4   | 30.9   | 30   | 0.16 | 0.5 | 0.73 | 77   |
| 27.8  | 52.7  | 37.3  | 45.8  | 27.4  | 53.0  | 73.1   | 26.7   | 30   | 0.16 | 0.5 | 0.80 | 78   |
| 31.4  | 34.7  | 43.1  | 28.8  | 30.6  | 35.1  | 50.7   | 18.4   | 30   | 0.16 | 0.5 | 0.88 | 79   |
| 40.7  | 16.7  | 58.0  | 11.8  | 39.0  | 17.2  | 28.3   | 10.2   | 30   | 0.16 | 0.5 | 0.97 | 80   |
| 9.45  | 93.2  | 7.77  | 91.7  | 9.38  | 93.1  | 85.1   | 35.8   | 45   | 0.16 | 0.5 | 0.66 | 81   |
| 3.67  | 78.2  | 4.14  | 77.8  | 3.65  | 78.2  | 81.1   | 28.8   | 45   | 0.16 | 0.5 | 0.73 | 82   |
| 10.6  | 68.9  | 12.5  | 67.5  | 10.5  | 69.0  | 77.1   | 25.4   | 45   | 0.16 | 0.5 | 0.80 | 83   |
| 4.14  | 57.1  | 3.30  | 56.6  | 4.38  | 57.2  | 54.8   | 19.7   | 45   | 0.16 | 0.5 | 0.85 | 84   |
| 26.4  | 36.0  | 24.5  | 35.4  | 27.2  | 36.2  | 28.5   | 10.6   | 45   | 0.16 | 0.5 | 0.97 | 85   |
| 0.49  | 87.1  | 1.71  | 86.1  | 0.50  | 87.1  | 87.6   | 34.0   | 60   | 0.16 | 0.5 | 0.66 | 86   |
| 8.07  | 75.5  | 9.59  | 74.2  | 8.00  | 75.5  | 82.1   | 29.0   | 60   | 0.16 | 0.5 | 0.73 | 87   |
| 16.7  | 63.8  | 18.5  | 62.4  | 16.5  | 63.9  | 76.6   | 24.1   | 60   | 0.16 | 0.5 | 0.80 | 88   |
| 7.40  | 48.2  | 9.87  | 46.9  | 7.01  | 48.4  | 52.1   | 17.2   | 60   | 0.16 | 0.5 | 0.88 | 89   |
| 18.5  | 32.6  | 14.4  | 31.5  | 19.6  | 32.9  | 27.5   | 10.4   | 60   | 0.16 | 0.5 | 0.97 | 90   |

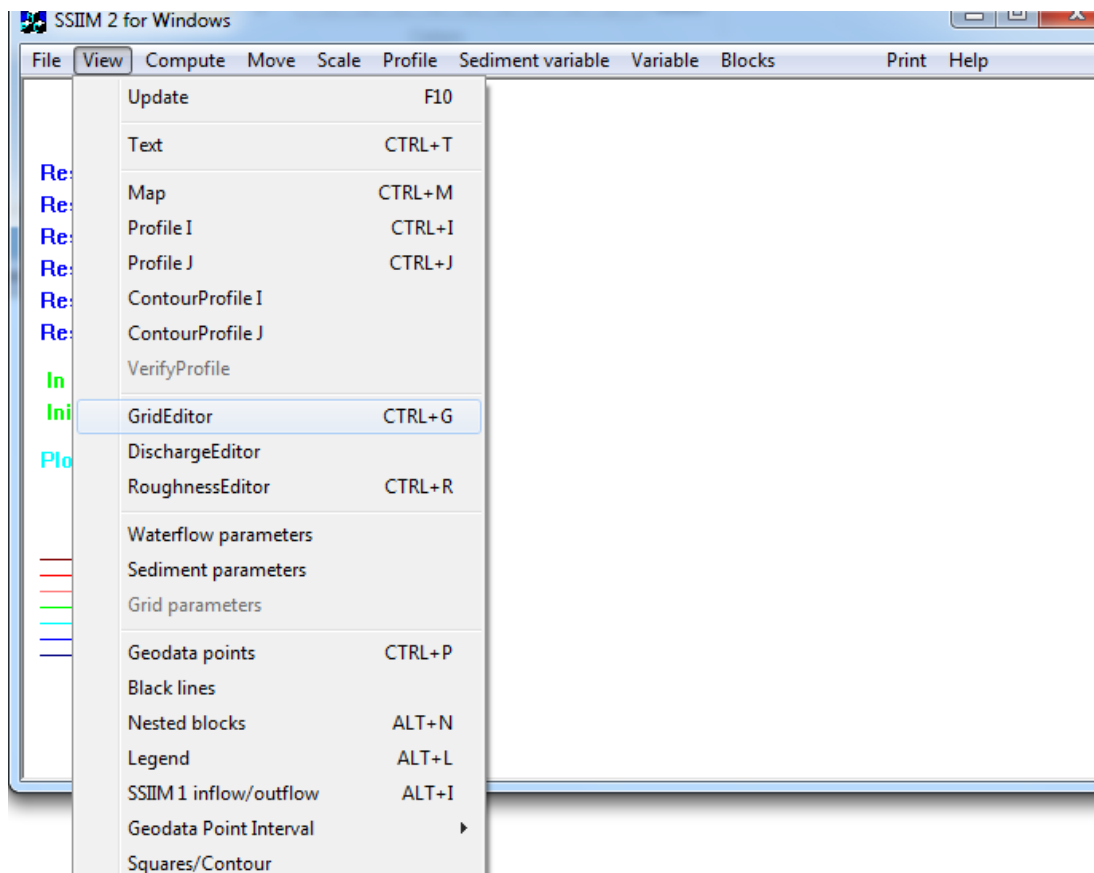
## پیوست د- مراحل شبیه سازی در مدل عددی SSIIM

### د-۱- شبیه سازی کانال انحرافی

برای شبیه سازی این گونه مسائل در نرم افزار به دلیل دو بلوکه بودن باید از SSIIM2 استفاده می شود.

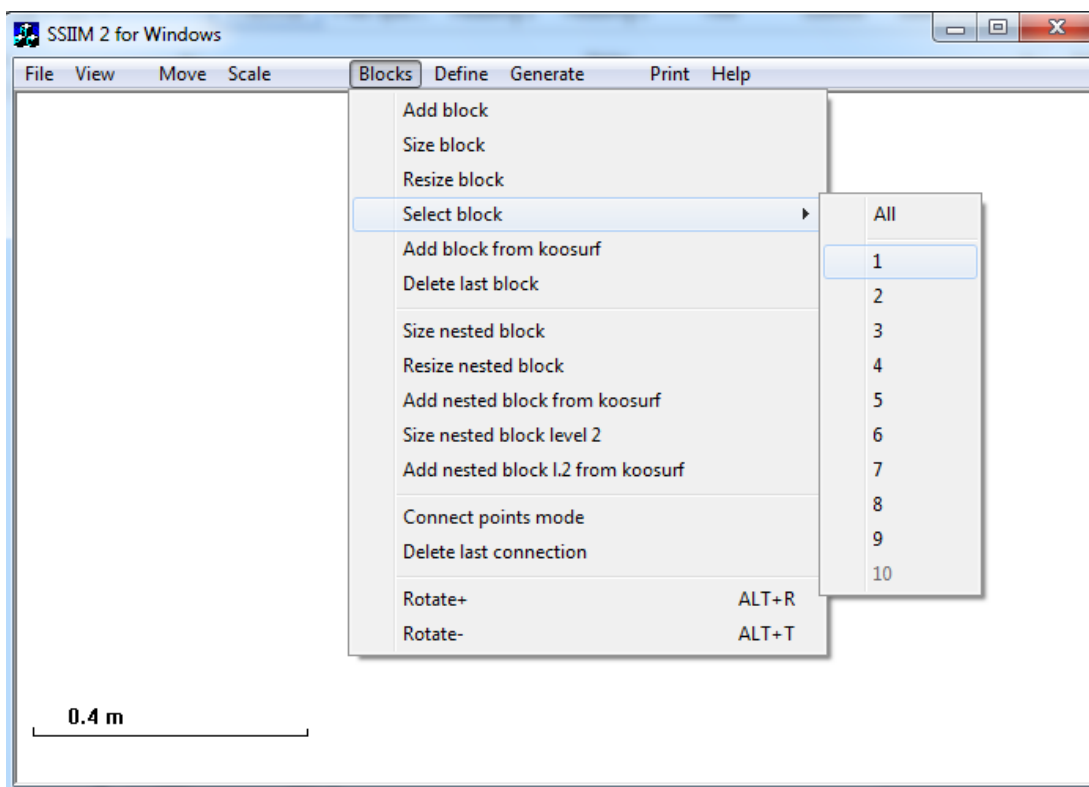
### د-۲- تولید شبکه

برای تولید شبکه نرم افزار SSIIM2 را اجرا شده و از قسمت view گزینه Grid editor را انتخاب گردید شکل (۵-۱).



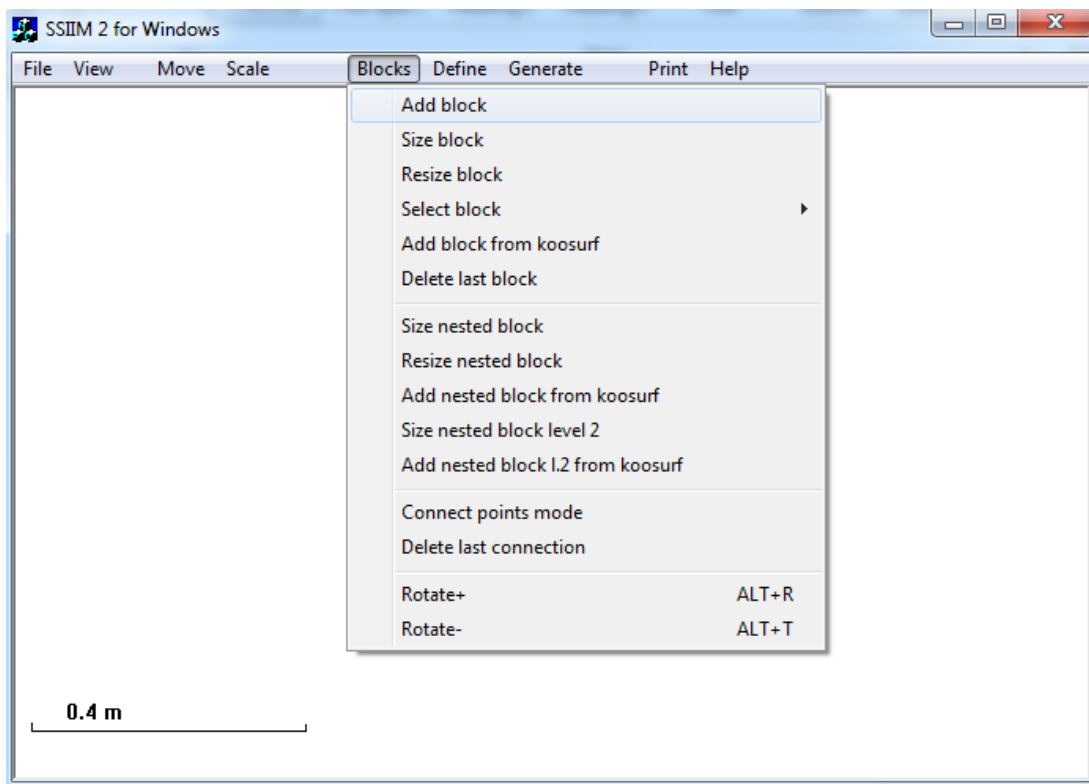
شکل ۳-۳: تنظیمات شبکه

سپس مانند شکل (۵-۲) از گزینه blocks-select block بلوک شماره ۱ را انتخاب شد



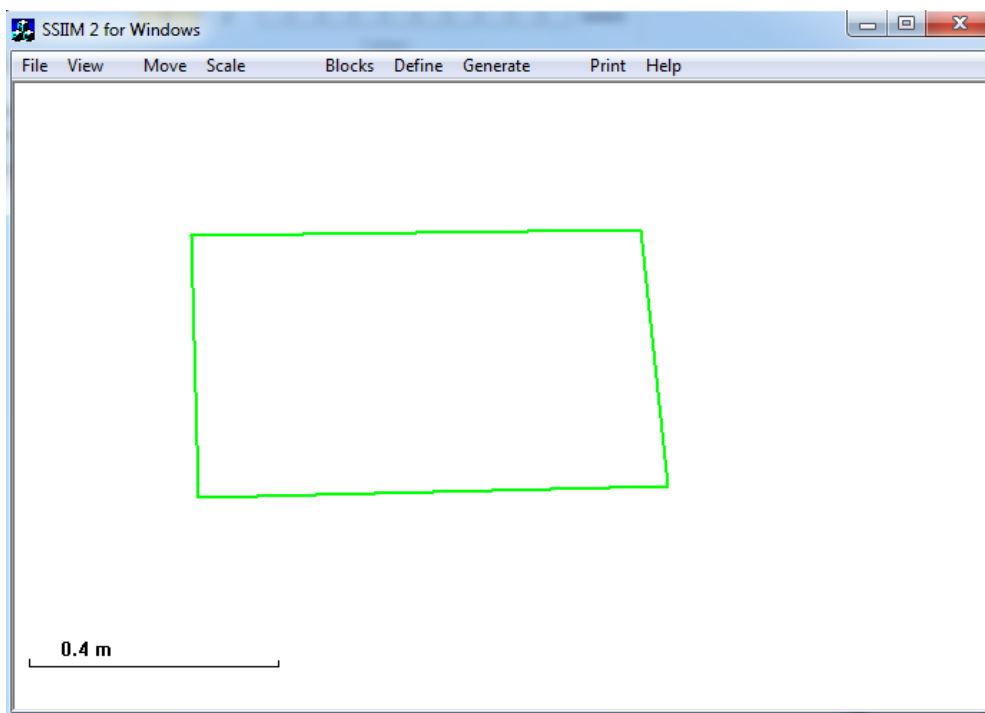
شکل ۳-۴: انتخاب بلوک

سپس گزینه add block مطابق شکل (۳-۵) انتخاب شد.



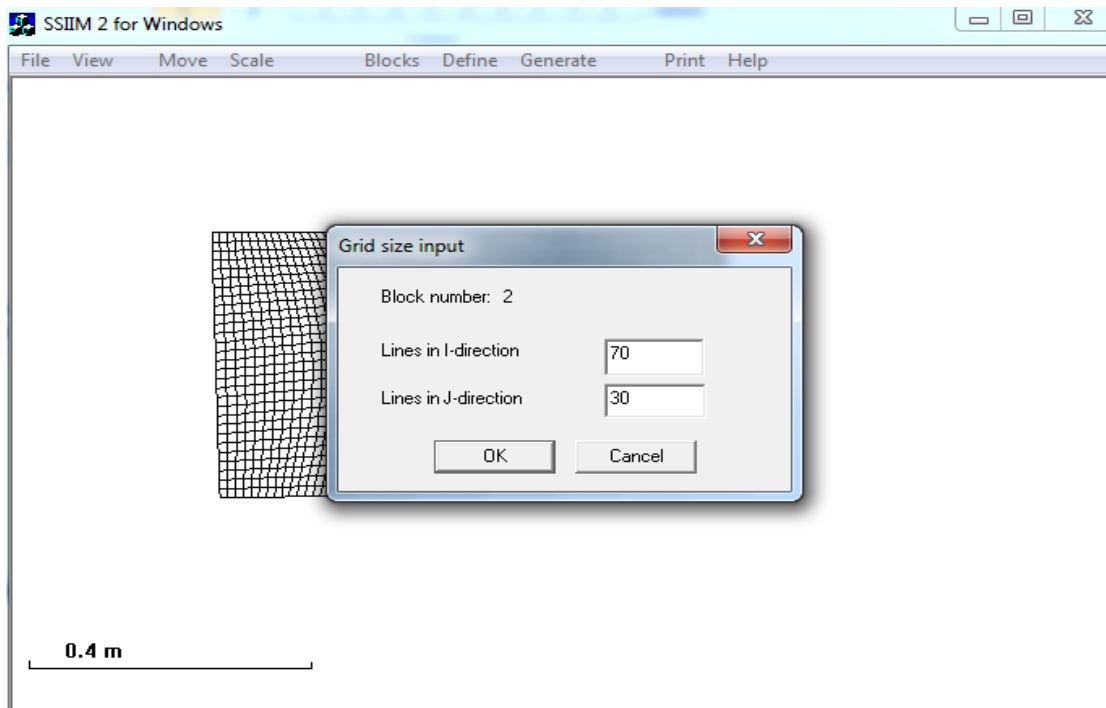
شکل ۳-۵: مراحل تولید بلوک یک

در مرحله بعد چهار نقطه در جهت عقربه های ساعت انتخاب شد تا چهار ضلعی مانند شکل زیر تولید گردد.



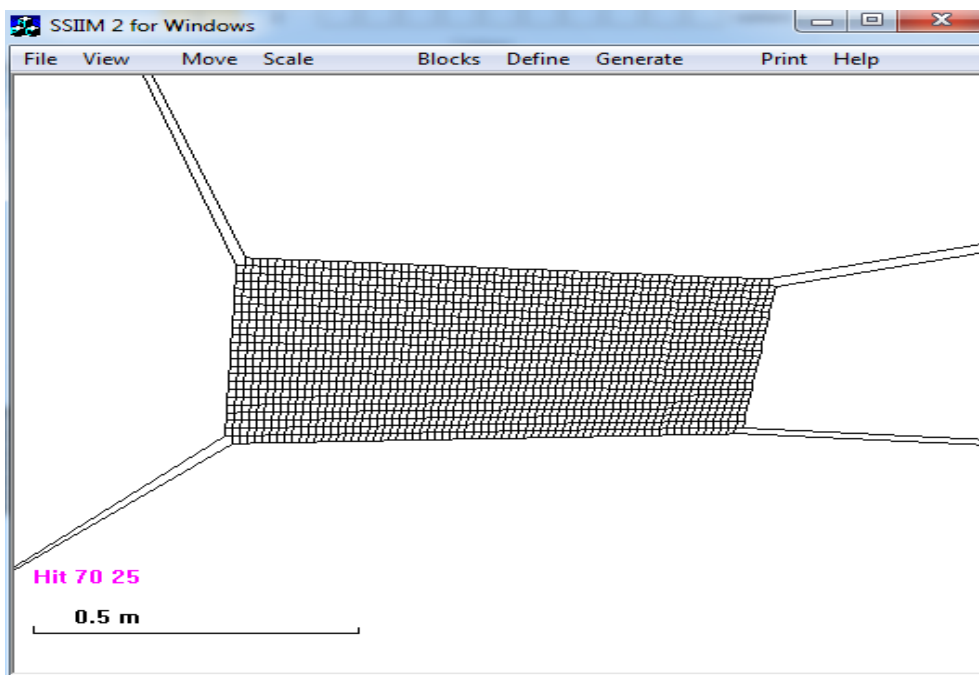
شکل ۳-۶: تولید چهارچوب شبکه بندی بلوک ۱

سپس از گزینه block-size block مقادیر خواسته شده را مطابق شکل وارد شد.

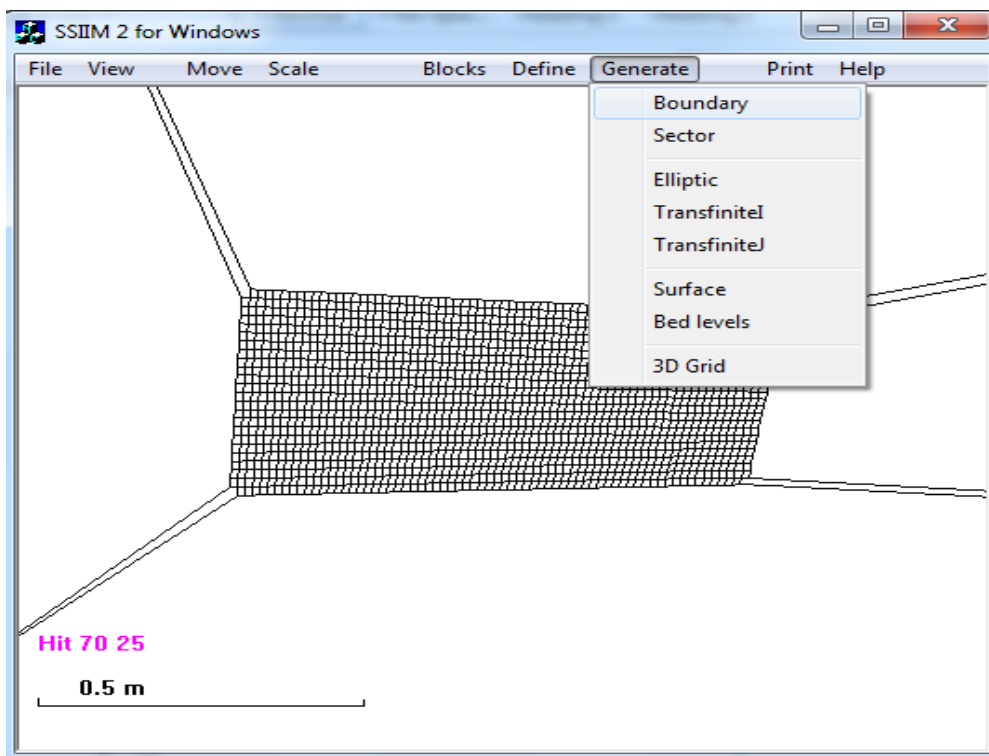


شکل ۳-۷: وارد کردن تعداد گره های شبکه

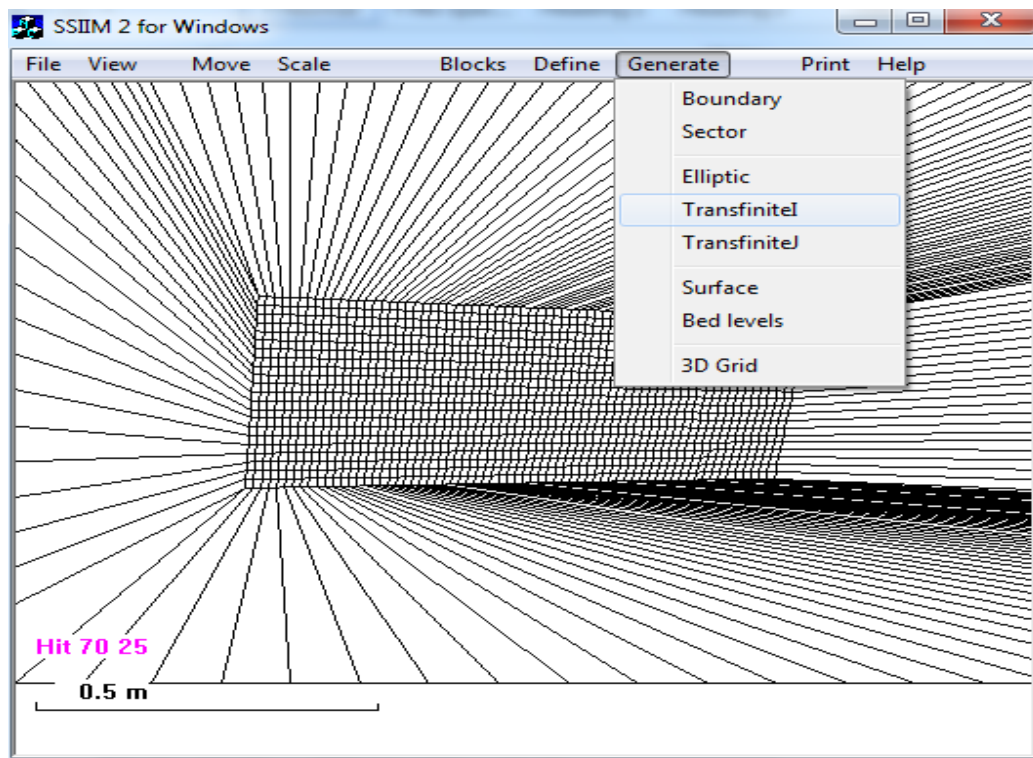
در مرحله بعد مختصات (۰-۰) و (۰-۲) و (۷-۰) و (۷-۲) را در چهار گوشه کانال وارد شد. و مراحل را مطابق شکل های زیر انجام گردید تا کانال در مختصات قابل فهم قرار گیرد.



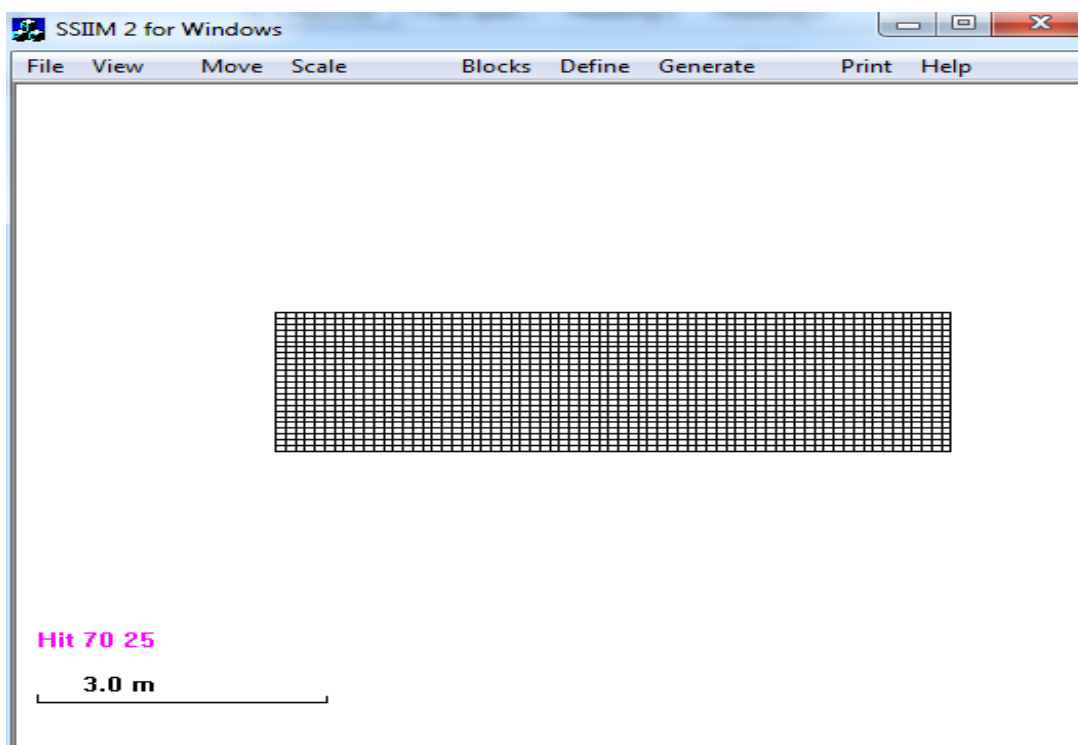
شکل ۳-۸: دادن مختصات به شبکه



شکل ۳-۹: درون یابی شبکه

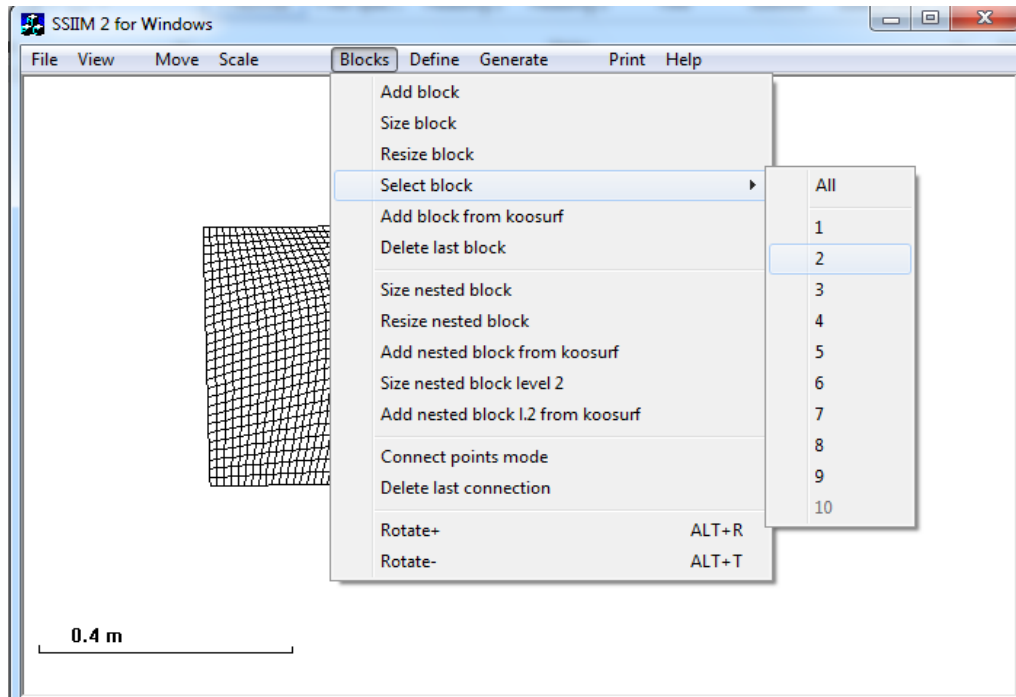


شکل ۳-۱۰: درون یابی در جهت I

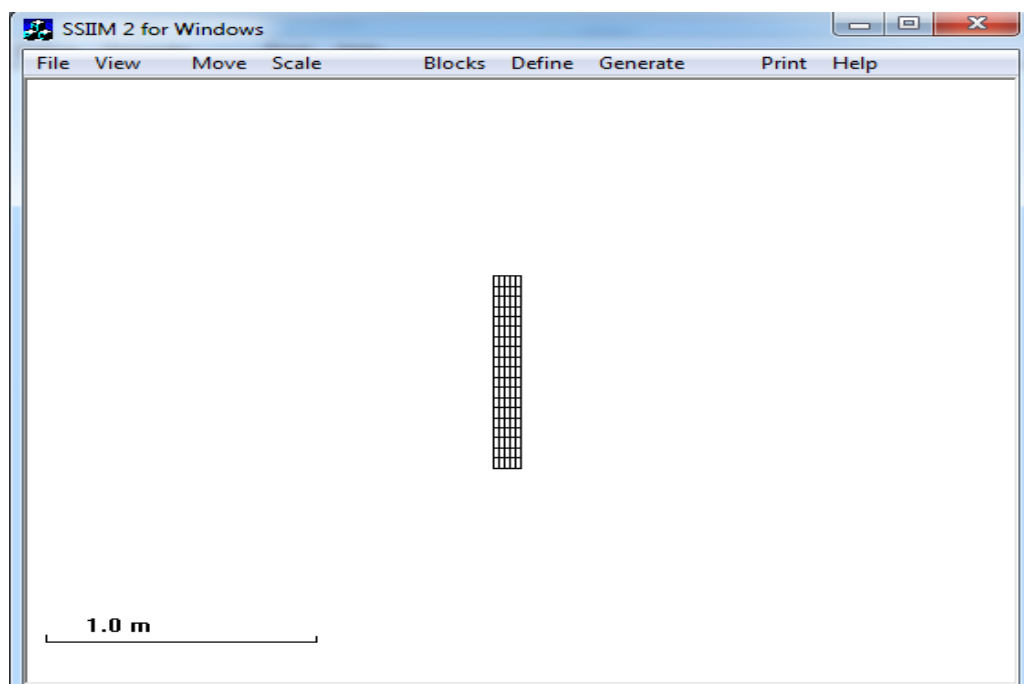


شکل ۳-۱۱: نمای کلی کانال اصلی

حال از گزینه select block بلاک ۲ را مانند شکل زیر انتخاب شد. مختصات کانال فرعی مانند مراحل قبل انجام شد و در نهایت با انتخاب گزینه ALL از قسمت BLOCK نمای کلی مدل مانند شکل زیر تولید گردید.

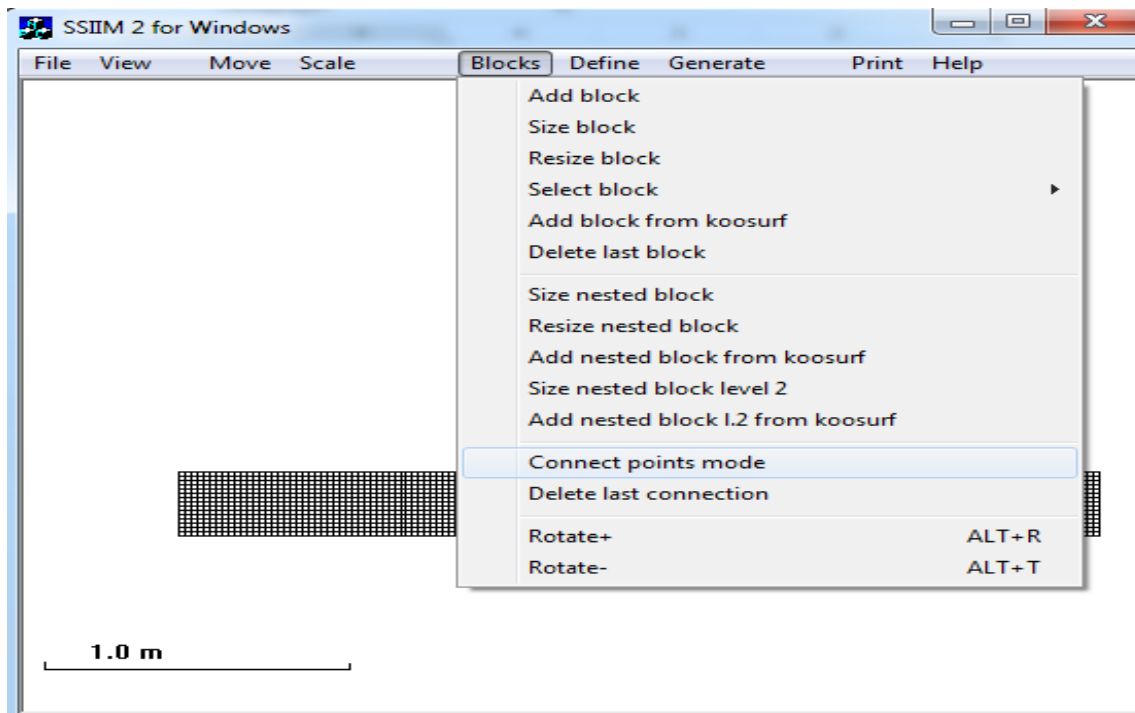


شکل ۳-۱۲: تولید بلوک ۲



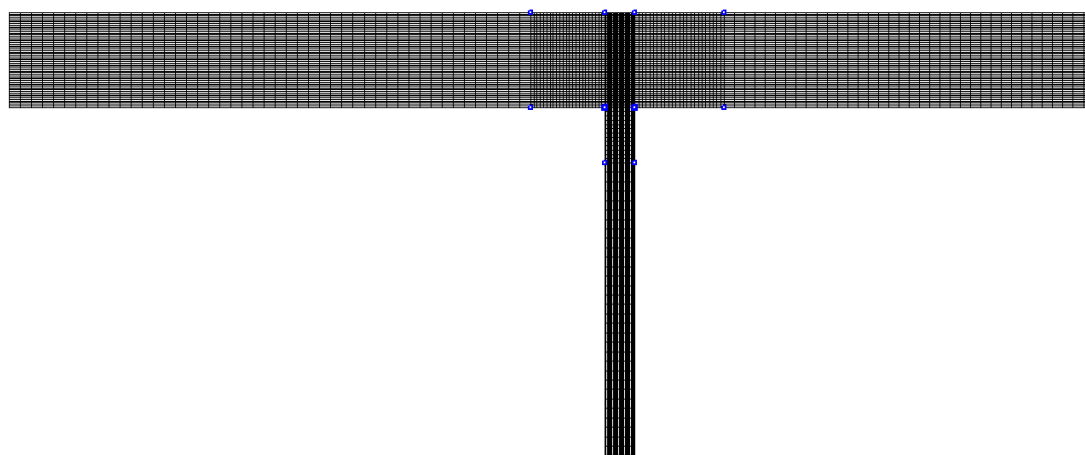
شکل ۳-۱۳: نمای از بلوک ۲ (کانال فرعی)

حال باید در قسمت block گزینه connect point mode را انتخاب شود تا نقاط مشترک محل دو کانال اصلی و فرعی به یک دیگر متصل شود.



شکل ۳-۱۴: نحوه متصل کردن دو کانال اصلی و فرعی (بلوک ۱ و ۲)

بار دیگر روی گزینه connected point mode کلیک شد و این گزینه غیر فعال گردید. از گزینه Generate بر روی 3D GRIDE کلیک و شبکه با گزینه writ unestruct file از منو file ذخیره شد.

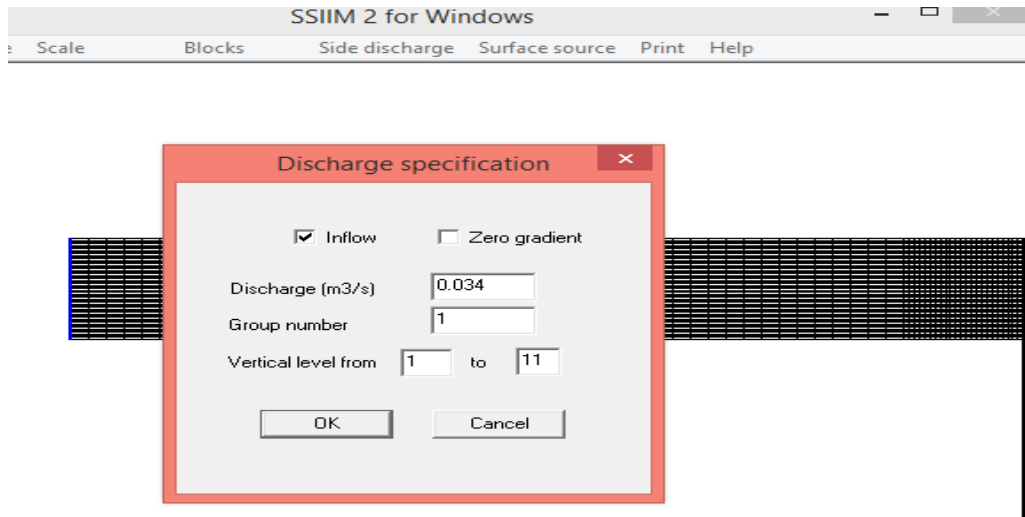


شکل ۳-۱۵: نمای کلی از شبکه تولید شده



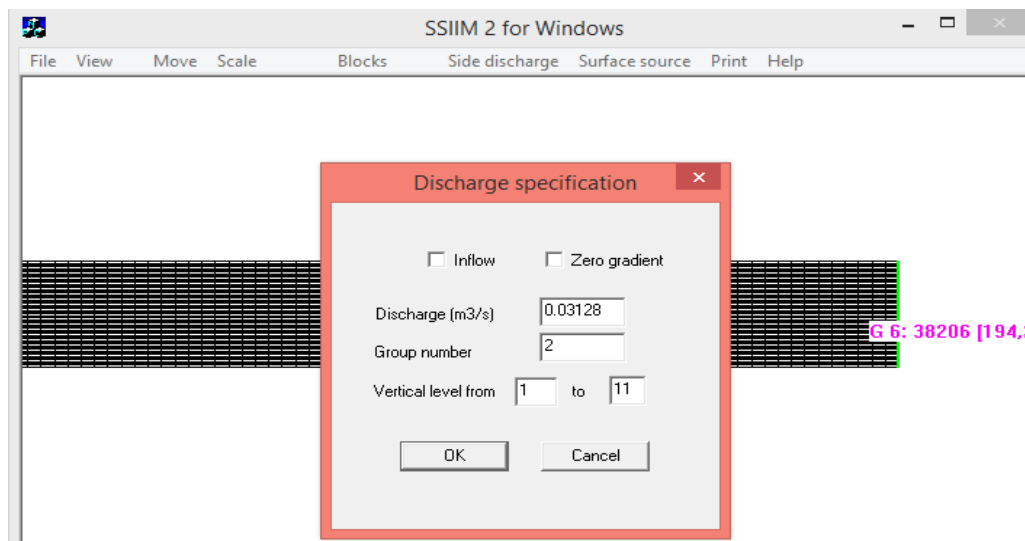
### د-۳- تعیین مقدار دبی

ابتدا از قسمت Viwe گزینه Deschargh Editor انتخاب شد و مانند شکل های زیر دبی وارد گردید:

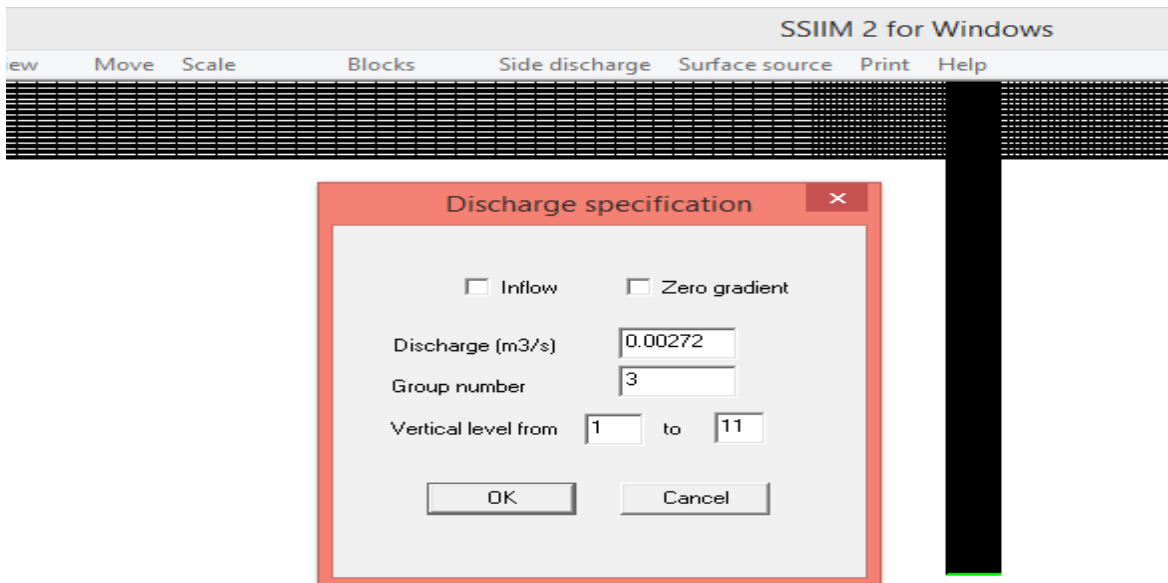


شکل ۳-۱۶: تعیین دبی ورودی

در این قسمت مقدار دبی و گروه دبی وارد می شود برای دبی ورودی باید گزینه Inflow فعال باشد. سپس با تایید موارد مرز ورودی جریان انتخاب شد. برای تعیین مقدار دبی خروجی نیز مانند روش بالا انجام شد با این تفاوت که گزینه Inflow غیر فعال گردید و گروه دبی ۲ و ۳ (دو مرز خروجی وجود داشت) انتخاب شد.



شکل ۳-۱۷: انتخاب دبی خروجی



شکل ۳-۱۸: تنظیمات دبی خروجی کانال انحرافی

#### د-۴- تکمیل فایل control

در این فایل پارامترها و کدهای مورد نیاز برای حل معادلات جریان و رسوب نوشته می شود. بعضی از این پارامترها در حین حل معادلات می توانند تغییر کنند. که این موارد در دقت نتایج و همگرایی تاثیر دارند. برای بررسی فرسایش و رسوب میتوان کدهای مربوط به حل میدان رسوب را در این نرم افزار وارد کرد. بعد از وارد کردن کدهای مربوطه نوبت به کالیبراسیون مدل میرسد که این کار را می توان با تغییر ضرایب مربوط به معادلات و ضریب مانینگ انجام داد. بعضی از کدهای مربوط به مدل به صورت زیر می باشند:

F4 که فاکتورهای آرامش برای میانگین گیری مرتبه دوم غلظت بستر، حداکثر تکرار برای محاسبات و ملاک همگرایی برای محاسبات بار معلق رسوب هستند

همچنین کد F6 ضریب فرمول غلظت بستر وارد می شود. پیش فرز نرم افزار ضرایب فرمول فان راین می باشد  $0.15$ ،  $1/5$  و  $0.3$  و با استفاده از کد F10 R فرمول فان راین انتخاب می گردد.

یکی دیگر از موارد جهت کالیبراسیون کد F 16 که مربوط به ضریب مانینگ است میباشد که میتوان با تغییر آن در رنج مربوط به اندازه ذرات، مدل را کالیبره کرد.

کد K3 ضرایب همگرایی برای معادلات هستند که سه عدد اول برای سرعت (در سه جهت) در ادامه ضرایب فشار ، K و  $\epsilon$  هستند.

پیش فرض: K 3 0.8 0.8 0.8 0.2 0.5 0.5

معمولا اگر مقدار دهی اولیه در k3 درست نباشد ناپایداری به وجود میاید اگر ناپایداری وجود داشته باشد مقدریر پیش فرض را میتوان مانند زیر کم کرد

K 3 0.4 0.4 0.4 0.1 0.2 0.2.

K 3 0.2 0.2 0.2 0.05 0.1 0.1

بعد از هر اجرا و به اتمام آن نتایج غلظت در فایل con2res و یا تک پلات ذخیره می شوند نحوه ذخیره موارد خواسته شده در فایل تک پلات ب صورت زیر می باشد ابتدا باید کد F 48 8 جهت نوشتن فایل تک پلات در CONTRL نوشته شود سپس با کد G24 نام متغییر خواسته شده ذکر گردد. برای مثال

کد های زیر دستور می دهد فایل تک پلات غلظت رسوب در لایه اول برای اندازه رسوب ۱ نوشته شود

F48 8

G 24 1 C 1 1

برای حل میدان رسوب حتما باید کد های I,S ,B استفاده شود.

اگر فقط یک گروه استفاده شود، B 0 0 0 0 0 داده شود، که نشان می دهد که این گروه در همه سلول ها توزیع می شود.

کد I مربوط به دبی رسوب می باشد.

I 1 0 یعنی دبی گروه رسوب شماره یک صفر است.

کد S نیز قطر رسوب و سرعت سقوط را میخواند.

S 1 0.00111 0.06

معرف قطر رسوب 0.00111 و سرعت سقوط 0.6 برای گروه رسوب شماره یک می باشد.

## د-۵- فایل conres/con2res

این فایل شامل غلظت رسوب در هر سلول می باشد. فایل con2res برای ssiim2 و conres برای ssiim1 تولید می شوند. فایل conres پس از اتمام محاسبه غلظت رسوب نوشته شده اند مشابه فایل زیر ابتدا شماره هر گره نوشته می شود . سپس کل غلظت نوشته می شود. در فایل con2res هر خط تنها با یک عدد صحیح شروع می شود.

## منابع و مراجع

- [1] The feasibility of flushing sediment from reservoirs. (1996) Atkinson, E. Project Report. HR Wallingford Ltd
- [2] Emamgholizadeh S and M. Fathi-Moghadam. (2014). Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Dam Reservoir. *Journal of Hydrology, ASCE*, 2014.19:674-681.
- [3] Fathi-Moghadam, M. S, Emamgholizadeh, M. Bina and M. Ghomeyshi. (2010). Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 48, No. 4 (2010), pp. 509–514.
- [4] Torabi, H., Emamgholizadeh, S., Fathi, M. (2014). Experimental study of the velocity of density currents in convergent and divergent channels. *International Journal of Sediment Research, Elsevier*, 29 (4) 518–523 (ISI, IF=0.718).
- [5] Morris, G. L., and Fan, J. (1997). *Reservoir sedimentation handbook*, McGraw-Hill, New York.
- [6] Vischer, D. et al. (1997). Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. Q. 74 R. 37. Proc. of the 19<sup>th</sup> Congress of ICOLD, Florence, Italy
- [7] Sumi, T., Okano, M. and Takata, Y. (2005). Reservoir Sedimentation Management with Bypass Tunnels in Japan, 9th International Symposium on River Sedimentation, II, pp. 1036-1043.
- ۸- عابدینی، م.، و طالب بیدختی، ن. (۱۳۶۸). “چگونگی توزیع و کنترل رسوب در مخازن سدها.” مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهتاب قدس، تهران، ۷۹۱-۸۲۰.
- ۹- رهنمایی، د. (۱۳۷۴). “رسوب‌گذاری در مخازن سدها.” آب و توسعه، ۳(۱)، ۵۸-۵۰.

- ۱۰- تقوی، م.، و طالب بیدختی، ن. "بررسی و کاربرد روشهای معمول و متداول رسوب گذاری مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود" نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۱۳۶، ۴۷-۵۹.
- ۱۱- قمشی، م. صدقی، ح. صدقی و بینا م. (۱۳۶۸). "نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز." مجموعه مقالات، اولین کنفرانس هیدرولوژی/ایران، تهران، مهتاب قدس، ۸۲۱-۸۴۴.
- ۱۲- شعبانلو، س. (۱۳۷۹). "بررسی نحوه رسوب گذاری در تعدادی از سدهای مخزنی ایران با حجمهای متفاوت." پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- [13] Auel C. and Boes R. 2011. Sediment bypass tunnel design - review and outlook. Proc. 79th Annual Meeting of ICOLD "Dams and Reservoirs under Changing Challenges". Lucerne, Switzerland. Taylor&Francis, London. 403-412.
- [14] Boes R.M., Auel C., Haggmann M. and Albayrak I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. Reservoir Sedimentation by Schleiss A., DeCesare G., Franca M., Pfister M. (Eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02675-9
- [15] Jacobs, F., Winkler, K., Hunkeler, F. & Volkart, P. 2001. Betonabrasion im Wasserbau ('Concrete abrasion at hydraulic structures'). VAW-Mitteilung 168 (H.-E. Minor, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland [in German].
- [16] Neary, V. S. (1992). Flow Structure at an Open Channel Diversion. MS thesis, Civil and Environmental Engineering. University of Iowa,
- [17] Neary, V., Sotiropoulos, F., and Odgaard, A.J.(1999). Three-dimensional Numerical Model of Lateral-Intake in Flows. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE.125(2)126-140

- [18]Barkdoll, B. D.(1977). Sediment control at lateral diversion, Ph.D. dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa
- [19]Barkdoll, B.D., R. Ettema and A.J. Odgaard. (1999). Sediment control at lateral diversion: limits and enhancements to vane use. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 125(8): 862-870.
- [20]Izadpanah, Z. and Salehi Neishabouri,, A. (2003).Investigation of sediment transport in lateral intakes. Journal of Agriculture, 26:15-24
- [21]Pirestani, M. (2004). Investigation on flow pattern and scouring at intakes incurved channels.PhD Thesis on irrigation engineering, Islamic Azad University, Science and Reseach center, Tehran Branch. p176.
- [22]Abbasi, A. (2003). Experimental investigation on sediment control at latralintaks in straight channels. PhD Thesis on civil engineering, Tarbiat Modares University.
- [23]Behbahani, H and Shafaei Bajestan, M. (2004).Investigation on hydraulic conditions at lateral intaks with diversion angles  $90^\circ$  and  $75^\circ$  by using physical model. Master thesis, water structures engineering, ShahidChamran University.
- [24]Dehghani, A., Ghodsian, M., Salehi Neyshabouri,A. and Shafieifar, M. (2006). Sediment control into the intake with  $180^\circ$  angle by using submerged vanes. 7th civil engineering conference, Tehran, Tarbiat Modares University.
- [25]Karami Moghadam, M., Shafai Bajestan, M., Sedghi, H. (2010). Sediment entry investigation at the 30 degree water intake installed at a trapezoidal channel, World Applied Sciences Journal 11 (1):82-88
- [26]Salemnia, A. and Shafaei-Bajestan, M. 2011. Investigation on the effect of submerged vanes on the amount of sediment entrance of trapezoidal channel into the lateral intake by changing the discharge diversion ratio. Proceeding of the 10th Iranian Hydraulic Conference. University of Guilan. Rasht. Iran.(in Farsi)

[27] Jafari-Mianaei, S. and Ayyoubzadeh, S. A. 2014. Experimental investigation of the effect of inclined mainchannel wall on the amount of delivered sediment into the lateral intake with/without submerged vanes. Iranian J. Irrig. Drain. 4(7): 521-534.

[28] Hashid, M., A. Hussain and Z. Ahmad. (2015). Discharge characteristics of lateral circular intakes in open channel flow. Flow Measurement and Instrumentation, 46: 87-92

[۲۹] ساجدی سابق، م.م. حبیبی و م. رحمانیان. ۱۳۷۶. بررسی کاربرد صفحات مستغرق بر عملکرد آنها در مدخل های آبیگری از رودخانه. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

[۳۰] عباسی، ع. ۱۳۸۲. مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب بار بستر در آبیگرهای جانبی در مسیر های مستقیم. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس.

[۳۱] قلانی، ع. ۱۳۷۷. بررسی آزمایشگاهی درباره تاثیر زاویه قرارگیری صفحات مستغرق بر عملکرد آنها در مدخل های آبیگری از رودخانه ها. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

[۳۲] یونسی، ح. ۱۳۸۱. بررسی تاثیر آرایش طولی صفحات مستغرق بر تغییر مورفولوژی بستر رودخانه در مجاورت آبیگری های ثقیلی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران. دانشکده کشاورزی.

[۳۳] اسماعیل ورکی، م. و ج. فرهودی. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی اثر زاویه آبیگری بر مقدار رسوب به دهانه آبیگر در بند های انحرافی. هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. اهواز. دانشگاه شهید چمران.

[۳۴] جلیلی، ح. ع. حسین زاده دلیر و د. فرسادی زاده. 1390. تاثیر هندسه دهانه آبیگر بر مقدار و الگوی رسوب گذاری در آبیگر جانبی. مجله پژوهش ایران. سال پنجم. شماره نهم. ص ۱۰-۱.



- [۳۵] سیدیان، س.م، و م.شفاعی بجستان. ۱۳۸۹. مقایسه رسوب معلق به آبگیر با تغییر زاویه دیواره کانال اصلی از قام به ۴۵ درجه. نشریه آب و خاک. جلد ۲۴. شماره ۵. ص ۹۸۵-۹۴۴.
- [36] Joglekar, D.V. and Wadekar, G.T., 1951. The effects of weirs and dams on the regime of rivers. In Proceedings of the 4th Meeting of I.A.H.R.
- [37] Inglis, C.C., 1949. The behavior and control of rivers and canals. Research Publication No. 13 Central Water Power.
- [38] Nicklow, J.W. and Mays, L.W., 2001. OPTIMAL CONTROL OF RESERVOIR RELEASES TO MINIMIZE SEDIMENTATION IN RIVERS AND RESERVOIRS 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 37(1), pp.197-211.
- [39] Amar, A.C. and Gatwood, E.J., 1986. Prediction of Sediment Yield for Southern California Watersheds. In Water Forum'86: World Water Issues in Evolution (pp. 1420-1427). ASCE.
- [40] Scheuerlein, H., Tritthart, M. and Nunez-Gonzalez, F., 2004. Numerical and physical modelling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs. Hydraulics of Dam and River Structures, p.328.
- [41] Kondolf, G. M. et al. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2: 256-280, doi:10.1002/2013EF000184
- [42] Kantoush S., Sumi T., Murasaki M. (2012). Evaluation of sediment bypass efficiency by flow field and sediment concentration monitoring techniques. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Volume 67, Issue 4: 169-174 (2012). DOI: 10.2208/jscejhe.67.I\_169
- [43] Jenzer-Althaus J. (2011). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow, EPFL PhD thesis N°4927/LCH Communication N° 45 (eds. Schleiss A, De Cesare G.)

- [44] Emamgholizadeh, S. H. Samadi. 2008. Desilting of deposited sediment at the upstream of the Dez Reservoir in Iran. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, January-April, 2008. Vol. 3, No.1, pp: 25-35
- [45] Tetsuya Sumi, Comprehensive reservoir sedimentation countermeasures in Japan, First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, April 27-29, ETH Zurich, 2015
- [46] Kataoka, K. (2003). Sedimentation management at Asahi dam, 3rd world water forum, Kyoto-Shiga, pp197-207.
- [47] Mitsuzumi, A., Kato, M. and Omoto, Y. (2009). Effect of sediment bypass system as a measure against long-term turbidity and sedimentation in dam reservoir, ICOLD, 23rd Congress, Brasilia, Q89-R8.
- [48] Suzuki, M. (2009). Outline and Effects of Permanent Sediment Management measures for Miwa Dam, 23rd ICOLD Congress, Brasilia, Q.90-R.1.
- [49] Sumi, T. and Kantoush, S. A. (2011a). Comprehensive Sediment Management Strategies in Japan: Sediment bypass tunnels, Proc. 34th IAHR World Congress, 1803-1810.
- [50] Sumi, T., Kantoush, S. A. and Suzuki, S., (2012). Performance of Miwa Dam Sediment Bypass Tunnel : Evaluation of Upstream and Downstream State and Bypassing Efficiency, Proc. 24th ICOLD Congress, Kyoto, Q92-R38, pp.576-596.
- [51] Ando, N., Terazono, K. and Kitazume, R. (1994). Sediment removal project at Miwa dam, The 18th Congress of ICOLD, Durban, Q.69, R.27, pp.421-441.
- [52] Kashiwai, J., Sumi, T. and Honda, T. (1997). Hydraulic study on diversion facilities required for sediment bypass systems, 19th Congress of ICOLD, Florence, Q.74, R.59, pp.957-976.
- [53] Harada, M., Terada, M. and Kokubo, T. (1997). Planning and hydraulic design of bypass tunnel for sluicing sediments past Asahi reservoir, Proc. 19th Congress of ICOLD, Florence, C.9, pp.509-539.

- [54]Shanthakumar, R., Nasir, S. M., Fathullah, M., Noriman, N. Z., & Rashidi, M. M. (2018, November). Optimisation of thin shell parts by using response surface methodology (RSM) method. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2030, No. 1, p. 020164). AIP Publishing.
- [55]Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P., & Davim, J. P. (2019). Other Computational Methods for Optimization. In Computational Methods for Application in Industry 4.0 (pp. 57-67). Springer, Cham.
- [56]Makwana, A. D., & Patel, T. M. (2018). Comparative Analysis of Mathematical Models Developed by RSM And MLR Method for SFC Of Single Cylinder Diesel Engine Fueled with Diesel and Diesel-Jatropha Blends. *Development*, 5(03).
- [57]Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. In *Evolutionary Algorithms and Neural Networks* (pp. 43-55). Springer, Cham.
- [58]Estrada, E. D. S. D., dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O. (2019). Constructal Design Associated with Genetic Algorithm to Maximize the Performance of H-Shaped Isothermal Cavities. In *Computational Intelligence, Optimization and Inverse Problems with Applications in Engineering* (pp. 215-226). Springer, Cham.
- [59]Mohanty, D. K., Jana, R. K., & Biswal, M. P. (2019). Genetic Algorithm for Multi-choice Integer Linear Programming Problems. In *Soft Computing for Problem Solving* (pp. 809-819). Springer, Singapore.
- [60]Begušić, T., Cordova, M., & Vaníček, J. (2019). Single-Hessian thawed Gaussian approximation. *The Journal of chemical physics*, 150(15), 154117.
- [61]Hinkel, E. (2018). Error Analysis. *The TESOL Encyclopedia of English Language Teaching*, 1-5.

## Abstract

In recent decades, although dam construction has increased in number and multiplicity, unfortunately, most of these dams are subjected to sediment accumulation during their operation period. As a scientific way, Sediment Bypass Tunnels (SBTs) could be hired to solve this problem. They are deviant channels that convey the current containing sediments from the upstream of the reservoir to the downstream of the dam. In this research, the effect of hydraulic parameters of flow and changes in the angle of plates on sediment transport and deviated flow have been investigated through applying submerged plates on the entrance of a 90-degree diversion channel for sediment transport and then, compared with the state without using submerged plates. The experiments were conducted on a 10-meter-long Laboratory Flume, with a main channel of 60 cm width and a secondary channel of 30 cm width and a height of 75 cm. In this regard, the variables of Froude number and flow depth in three angles of 30, 45, and 60 degrees were studied. Then 18 experiments were simulated with SSIIM2 numerical model and compared with laboratory results and verified. Experimental results show that increasing the Froude number from 0.65 to 0.98 on average causes a 20% decrease in deviated flow and a 44% decrease in deviated sediments to the sediment bypass tunnel. Also, the effect of flow depth changes on performance is decreased drastically by an increase of 1.5 times in the relative width of the diversion channel; however, in lower width ratios, the sensitivity of the diversion tunnels to the flow depth is very significant where with an increase of 1.5 times in the relative width of the diversion channel from 0.33 to 0.50, the Coefficient of Performance (CoP) increases by 39%. Moreover, by increasing the angle of the submerged plates from 30 to 60 degrees, the rate of deviated flow decreases by about 6% at a relative depth of 0.08, 3% and 1% at higher relative depths (0.12 and 0.16 respectively) where the performance sensitivity of diversion channels to flow depth changes in lower angles is negligible and reaches to 1% at an angle of 30 degrees. Nevertheless, increasing the angle of submerged plates to 45 and 60 degrees would increase the Coefficient of Performance (CoP) of sediment bypass tunnels by 10% and 24%, respectively. Consequently, it was observed that by decreasing the flow depth, submerged plates with an angle of 60 degrees demonstrated the optimum sediment transport option with the highest performance. Based on dimensional analysis and using the Genetic Algorithm (GA) the best equation proposed to estimate the deviated sedimentation flow to the secondary channel. Comparison of numerical simulation results of the SSIIM model showed that the numerical model error rate was about 18% and the mean of the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) was estimated to be 0.87 for the laboratory and numerical data, Given this value, the correct performance of the model can be deduced.

**Keywords:** Sediment Bypass Tunnel, sediment management, deviated flow, secondary flow



Shahrood University of  
Technology

Department of Civil Engineering

Ph.D Thesis in Hydraulic Structures

**An experimental study on the  
influence of inlet geometry on the  
performance of  
sediment bypass tunnels (SBTs)**

By: Pejman Aminian

Supervisor:  
Dr. Ahmad Ahmadi

Advisor:  
Dr. Samad Emamgholizadeh

November 2019