

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد آب و خاک

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آب بند (cut off) بر روی گرادیان هیدرولیکی، نیروی  
زیرفشار و تراوش از زیر سدهای انحرافی

نگارنده: سید مصطفی اشرفی

استاد راهنما

دکتر خلیل اژدری

اساتید مشاور :

دکتر صمد امامقلی زاده

دکتر سید حسین حسینی

بهمن ۱۳۹۵

## دانشگاه صنعتی شاهرود

### دانشکده : کشاورزی

### گروه : آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید مصطفی اشرفی

تحت عنوان : بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آب بند (cut off) بر روی گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و تراوش از زیر سدهای انحرافی

در تاریخ ۱۳۹۵ / ۱۱ / ۱۲ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر صمد امامقلی زاده		دکتر خلیل اژدری
	دکتر سید حسین حسینی		

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		دکتر زهرا گنجی نوروزی
			دکتر روزبه مؤذن زاده

## مشکر و قدردانی

مشکر شایان نثار ایندمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از اساتید فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر اثری، جناب آقای دکتر امعلی زاده و جناب آقای دکتر حسینی که همواره مرا مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال مشکر را دارم.

این پایان نامه را ضمن مشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به محضر از زشمند پرو مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند. به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است و آنان که در این مسیر همراه و همگام من بودند تا این پایان نامه به ثمر رسد. از جناب آقای مهندس گللی عزیز بسیار سپاسگزارم که حامی خوبی در این راه برایم بود.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسوا علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کنسال عنایت بفرما.

## تعهد نامه

اینجانب سید مصطفی اشرفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آببند (cutoff) بر روی گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و تراوش از زیر سدهای انحرافی تحت راهنمایی دکتر اژدری، دکتر امامقلی زاده و دکتر حسینی متعهد می شوم:

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

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

در سال‌های اخیر مشکلات ویژه‌ای در خصوص ایمنی و پایداری سدهای انحرافی و همچنین نشت آب از پی در مخزن سد پدیدار شده است. در ضمن ظهور پدیده جوشش در پایین دست سدهای انحرافی و تخریب بستر پایین دست سد نیز از این قبیل مشکلات است. احداث پرده آب‌بند و کف بند در زیر سازه‌های آبی یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت کاهش میزان دبی نشت و تأخیر در وقوع پدیده‌ی پاپینگ است. در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقدار گرادیان خروجی، دبی نشت و نیروی زیر فشار برای موقعیت‌های مختلف پرده آب‌بند و کف بند به ازای هدهای مختلف آب در بالادست بررسی شد. همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی از مدل عددی از نرم افزار seep/w از بسته نرم افزاری Geo Studio 2007 استفاده گردید. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از کف بند پایین دست نسبت به استفاده از کف بند بالادست نتایج بهتری را به دنبال داشت. همچنین استفاده از کف بند به همراه دو پرده آب‌بند در ابتدا و انتها نتایج بهتری را در زمینه گرادیان خروجی، نیروی زیر فشار و دبی نشت نشان داد به طوری که مقدار خطای نسبی نتایج آزمایشگاهی و عددی به ترتیب برابر با ۲٪ و ۸٪ بود. در مدل آزمایشگاهی دبی نشت برای مدل‌های شاهد، حضور کف بند یا حضور پرده آب‌بند به تنهایی به ترتیب ۳۰۲ و ۱۷۵ و ۲۲۲ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. شبیه‌سازی مدل‌های جریان با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب‌بند در پی و همچنین کف بند و پرده آب‌بند در پایین دست نسبت به مدل آزمایشگاهی خطای نسبی در حدود ۸٪ داشته‌اند. نتایج مدل عددی مطابقت خوبی را با مدل آزمایشگاهی نشان داد به طوری که خطای مدل عددی  $\pm 10\%$  بود. با توجه به نتایج تحقیق حاضر می‌توان از مدل seep/w برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف حرکت آب در خاک با دقت قابل قبولی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: بند انحرافی، گرادیان خروجی، نیروی زیر فشار، دبی نشت، کف بند، پرده آب‌بند، جوشش، seep/w

۱	فصل اول .....
۱	کلیات .....
۳	۲-۱- کلیات .....
۵	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق .....
۶	۴-۱- هدف از انجام تحقیق .....
۹	فصل دوم .....
۹	پیشینه تحقیق .....
۱۰	۱-۲- مقدمه .....
۱۰	۲-۲- سد های انحرافی .....
۱۱	۱-۱-۱-۲- سد .....
۱۱	۲-۱-۱-۲- آبیگر .....
۱۲	۳-۲- نشست از پی سد .....
۱۲	۴-۲- مفاهیم اولیه .....
۱۲	۱-۴-۲- ترسیم شبکه جریان .....
۱۳	۲-۴-۲- پدیده گردان بحرانی .....
۱۵	۵-۲- روشهای کاهش نشست آب در زیر سد انحرافی .....
۱۵	۱-۵-۲- دیوارهای سپری .....
۱۵	۱-۱-۵-۲- آسترها و پوشش ها .....
۱۶	۲-۱-۵-۲- دیوار خاکی متراکم شده .....
۱۶	۳-۱-۵-۲- دیواره های بتنی .....
۱۶	۴-۱-۵-۲- دیوار با شمع های صفحه ای .....
۱۷	۵-۱-۵-۲- دیوار های گلی .....
۱۸	۶-۱-۵-۲- تزریق .....
۱۹	۲-۵-۲- زهکشها .....
۲۱	۶-۲- طول خزش .....
۲۱	۱-۶-۲- تئوری بلای .....
۲۱	۲-۶-۲- تئوری لین .....
۲۲	۷-۲- مروری بر مطالعات انجام شده .....
۲۵	فصل سوم .....
۲۵	مواد و روشها .....
۲۶	۱-۳- مدل آزمایشگاهی .....
۲۷	۱-۱-۳- نحوه انجام آزمایش .....

۲۹	مدل آزمایشگاهی شاهد	۲-۱-۳
۳۰	مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد	۳-۱-۳
۳۰	مدل آزمایشگاهی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد	۴-۱-۳
۳۱	مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد	۵-۱-۳
۳۲	مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست	۶-۱-۳
۳۲	مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد	۷-۱-۳
۳۲	کالیبراسیون	۲-۳
۳۵	فصل چهارم	
۳۵	نتایج و بحث	
۳۶	مقدمه	
۳۶	۱-۴- نتایج مربوط به خطوط نشت و گرادیان خروجی	
۳۶	۱-۱-۴ مدل آزمایشگاهی شاهد	
۳۷	۲-۱-۴ مدل عددی شاهد	
۴۰	۳-۱-۴ مدل آزمایشگاهی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد	
۴۰	۴-۱-۴ مدل عددی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد	
۴۲	۵-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد	
۴۳	۶-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در بالا دست سد	
۴۵	۱-۶-۱-۴ مقایسه کف بند بالادست و پایین دست	
۴۵	۷-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد	
۴۷	۸-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست	
۴۹	۲-۴- گرادیان خروجی	
۵۰	۳-۴- بررسی نیروی زیر فشار	
۵۰	۱-۳-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد	
۵۳	۲-۳-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در بالا دست سد	
۵۵	۳-۳-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد	
۵۸	۴-۳-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست	
۶۰	۵-۳-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد	
۶۶	۴-۴- دبی نشت	
۷۱	فصل پنجم	
۷۱	نتیجه گیری و پیشنهادها	
۷۵	پیوست و ضمیمه	
۷۶	۱-۶- مدل عددی	
۸۰	تعیین خصوصیات فیزیکی مدل	
۸۲	۳- خاک اشباع (Saturated Only)	
۸۹	اختصاص دادن Material به منطقه یا خط و مش بندی	



۹۱	..... اختصاص شرایط مرزی
۹۳	..... قرائت و اندازه گیری دبی
۹۵	..... - اجرای مدل
۹۵	..... - مشاهده نتایج
۹۹	..... منابع و مأخذ

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲-۱- نمایی از یک سد انحرافی ..... ۱۰
- شکل ۲-۲-۲- نمایی از یک بند ..... ۱۱
- شکل ۲-۲-۵- نمایی از یک آبگیر ..... ۱۱
- ۲-۶- تصویر شبکه جریان در زیر یک دیوار سپری ..... ۱۳
- ۲-۷- محدوده ایجاد پدیده گرادیان بحرانی ..... ۱۵
- ۲-۸- تصویر شماتیک پرده آببند ..... ۱۵
- ۲-۹- پتوی ناتراوا در بالادست ..... ۱۶
- ۲-۱۰- اجرای دیوار آببند بنتونیتی ..... ۱۷
- ۲-۱۱- اجرای دیوار آب بند با ملات دوغاب ..... ۱۸
- ۲-۱۲- رابطه نوع خاک و نوع پرده آببند تزریقی (طاحونی، ۱۳۷۶) ..... ۱۹
- ۲-۱۳- زهکش افقی در پاشنه سد خاکی ..... ۲۰
- ۲-۱۴- زهکش افقی و مایل در زیر سد خاکی ..... ۲۰
- ۲-۱۵- نحوه استقرار زهکش لوله ای زیر سد ..... ۲۰
- ۲-۱۶- ترانشه زهکش در پاشنه سد ..... ۲۱
- شکل ۳-۱- نمودار دانه بندی خاک ..... ۲۶
- شکل ۳-۲- نمایی از مدل آزمایشگاهی ..... ۲۷
- شکل ۳-۳- ابعاد مدل آزمایشگاهی و محل قرار گیری پیژومترها و سایر اجزای دستگاه ..... ۲۹
- شکل ۳-۴- نمای مدل آزمایشگاهی سد بدون حضور کف بند و پرده آب بند ..... ۲۹
- شکل ۳-۵- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد ..... ۳۰
- شکل ۳-۶- نمای مدل آزمایشگاهی سد بدون حضور کف بند و پرده آب بند ..... ۳۱
- شکل ۳-۷- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد ..... ۳۱
- شکل ۳-۸- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست ..... ۳۲
- شکل ۳-۹- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰- نمایی از مدل آزمایشگاهی بار ثابت ..... ۳۳
- شکل ۴-۲- نمای بالا از تخریب پی بر اثر پدیده جوشش ..... ۳۷
- شکل ۴-۳- مقایسه فشار پیژومتری آزمایشگاهی و عددی ..... ۳۸
- شکل ۴-۴- خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بدون حضور کف بند و پرده آب بند ..... ۳۸
- شکل ۴-۵- گرادیان خروجی عدم حضور کف بند پرده آب بند ..... ۳۹
- شکل ۴-۶- نمای روبروی پیژومترهای ردیف اول در مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست جریان ..... ۴۰
- شکل ۴-۷- خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست ..... ۴۱
- شکل ۴-۸- گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست ..... ۴۱
- شکل ۴-۱۰- گرادیان خروجی با حضور پرده آب بند ..... ۴۳
- شکل ۴-۱۱- خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در بالا دست ..... ۴۴

- شکل ۴-۱۳ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست.. ۴۶
- شکل ۴-۱۴ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست ..... ۴۶
- شکل ۴-۱۵ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در پایین دست  
..... ۴۷
- شکل ۴-۱۶ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در پایین دست..... ۴۸
- شکل ۴-۱۸ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست و پایین دست ..... ۴۹
- شکل ۴-۱۹ نمای مدل آزمایشگاهی بدون حضور کف بند و پرده آب بند ..... ۵۱
- شکل ۴-۲۲ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف در مدل عددی ..... ۵۲
- شکل ۴-۲۴ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در بالادست ..... ۵۳
- شکل ۴-۲۵ میزان نیروی زیر فشار آزمایشگاهی در هد های مختلف ..... ۵۴
- شکل ۴-۲۶ میزان نیروی زیر فشار عددی در هد های مختلف ..... ۵۴
- شکل ۴-۲۷ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی ..... ۵۵
- شکل ۴-۲۸ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پی سد ..... ۵۶
- شکل ۴-۳۰ تغییرات فشار در مدل عددی به ازای هد های مختلف ..... ۵۷
- شکل ۴-۳۱ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی ..... ۵۷
- شکل ۴-۳۱ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند و پرده آب بند در پایین دست ..... ۵۸
- شکل ۴-۳۲ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف ..... ۵۹
- شکل ۴-۳۴ مقایسه داده های آزمایشگاهی و عددی ..... ۶۰
- شکل ۴-۳۵ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در بالادست و پایین دست  
..... ۶۱
- شکل ۴-۳۶ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف ..... ۶۱
- شکل ۴-۳۷ میزان نیروی زیر فشار در هد های مختلف ..... ۶۲
- شکل ۴-۳۸ زیر فشار با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در بالادست و پایین دست ..... ۶۲
- شکل ۴-۳۹ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی ..... ۶۳
- شکل ۴-۴۰ میزان نیروی زیر فشار آزمایشگاهی ۴ مدل در هد یکسان ..... ۶۴
- شکل ۴-۴۱ میزان نیروی زیر فشار عددی ۴ مدل در هد یکسان ..... ۶۴
- شکل ۴-۴۲ تغییرات دبی نشست در برابر هدهای بالادست مختلف برای مدل های مختلف ..... ۶۸
- شکل ۴-۴۳ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی دبی نشست ..... ۶۸
- شکل ۶-۱ صفحه اولیه نرم افزار Seep/w ..... ۷۶
- شکل ۶-۲ تعیین اندازه صفحه کار جهت مدل سازی ..... ۷۷
- شکل ۶-۴ نمایش نقاط کمکی جهت شبکه بندی ..... ۷۸
- شکل ۶-۵ ویرایش فرم و نام محور های افقی و قائم جهت ترسیم ..... ۷۹
- شکل ۶-۶ تعیین طول و تعداد بازه های محور های افقی و قائم ..... ۷۹
- شکل ۶-۷ تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره Type و انتخاب اعداد سعی و خطا و مقدار خطای انتخابی در هر  
گام ..... ۸۰
- شکل ۶-۸ تعریف خاک جدید ..... ۸۱
- شکل ۶-۹ تعریف خاک در شرایط اشباع ..... ۸۳

- شکل ۱۰-۶ تعریف رابطه بین عبور دهی هیدرولیکی با فشار آب حفره ای در خاک های نیمه اشباع..... ۸۴
- شکل ۱۱-۶ تعریف رابطه بین ضریب ذخیره ویژه با فشار آب حفره ای..... ۸۴
- شکل ۱۲-۶ تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ..... ۸۵
- شکل ۱۳-۶ تعریف مختصات نقاط..... ۸۶
- شکل ۱۴-۶ Draw و انتخاب Points برای جانمایی دستی نقاط..... ۸۷
- شکل ۱۶-۶ منوی Regions برای مشخص کردن منطقه بین نقاط با داشتن شماره نقاط..... ۸۸
- شکل ۱۷-۶ نوار Draw و انتخاب Regions و Lines برای مشخص کردن منطقه و خط بین نقاط..... ۸۹
- شکل ۱۸-۶ پنجره Mesh Properties از نوار Draw برای مش بندی..... ۹۰
- شکل ۱۹-۶ اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی..... ۹۲
- شکل ۲۰-۶ تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی..... ۹۲
- شکل ۲۱-۶ رسم Flux Sections با استفاده از مختصات نقاط..... ۹۳
- شکل ۲۲-۶ رسم Flux Sections با استفاده از نشانگر موس..... ۹۴
- شکل ۲۳-۶ منوی Draw Contours برای شخصی سازی و انتخاب کنتور ها..... ۹۶
- شکل ۲۴-۶ پنجره Draw Garph برای رسم نمودار های مختلف..... ۹۷

### فهرست جداول

- جدول ۱-۴ مقادیر گرادیان خروجی برای مدل های مختلف در هد ۵۲ سانتی متر برای بالادست ..... ۵۰
- جدول ۲-۴ مقدار دبی آزمایشگاهی در مدل های مختلف ..... ۶۶
- جدول ۳-۴ مقدار دبی عددی در مدل های مختلف ..... ۶۷
- جدول ۴-۴ مقدار دبی نشست آزمایشگاهی برای تمامی مدل ها در یک هد ..... ۶۹
- جدول ۵-۴ مقدار دبی نشست عددی برای تمامی مدل ها در یک هد ..... ۷۰



فصل اول

کلیات

ایران کشوری کم آب است که در صورت عدم برنامه ریزی و استفاده بهینه از منابع آبی کشور به ویژه آب‌های سطحی با بحران کم آبی مواجه خواهد شد لذا مهمترین هدف متولیان آب و سد سازی مهار آب‌های سطحی و مدیریت بهینه از منابع آبی کشور جهت تأمین نیازهای اساسی مردم می‌باشد (قادری، ۱۳۹۲).

استفاده بهینه از آب در کشوری چون ایران که از نظر اقلیمی دارای وضعیت خشک تا نیمه خشک است از اهمیت فراوانی بخصوص در گسترش و توسعه فعالیت‌های کشاورزی برخوردار است. بهره برداری بهینه از این منابع آبی برای این منظور جز با توجه کامل به معیارهای اقتصادی و اجتماعی ممکن نیست. توجه به هزینه‌ها و فوائد اجتماعی در تخصیص منابع آب و در بهبود عملکرد اقتصادی بخش آب اهمیت دارد. از طرف دیگر روش‌های بهره برداری از منابع آب و بخصوص منابع آب سطحی چون رودخانه متفاوت است که هرکدام از این روش‌ها دارای ویژگی‌های خاص بوده و در شرایط متفاوت رودخانه و زمان‌های برداشت، عملکردهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهد که بررسی و ارزیابی آنها در بهبود استحصال آب نقش موثری دارد. بررسی عملکرد این روشها علاوه بر مقایسه اقتصادی و اجتماعی نقاط قوت و ضعف را نمایان ساخته و می‌تواند در انتخاب روش برداشت در شرایط مختلف منطقه و رودخانه مؤثر باشد و حداقل مشکلات را در بهره برداری ایجاد نماید (ساعتی، ۱۳۸۵).

سدها سازه‌هایی هستند که در مسیر رودخانه و برای ذخیره سازی منابع آب رودخانه‌ها احداث می‌شود. بطور کلی سدها به منظور استفاده آب ذخیره شده در پشت آنها برای آبیاری، شرب انسان و دام، تولید نیروی برق، جلوگیری از سیلاب‌ها و جلوگیری از فرسایش و تخریب آبخیز کاربرد دارد (معماریان، ۱۳۸۴).



در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به عنوان ماده‌ای بسیار ارزشمند و استراتژیک مد نظر بوده است به‌طوری‌که این موضوع سبب گردیده تا بندسازی، سد سازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره سازی و انتقال آب در آثار به جا مانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد. پادشاهان هخامنشی به واسطه نیاز جغرافیایی کشور ایران و علاقه ای که در گسترش و آبادانی سرزمین تحت فرمانروایی از خود نشان می دادند، در زمان امپراتوری خود سدها و بندهای زیادی در بخش‌های جنوب غربی و جنوبی ایران ساختند. بسیاری از سیستم های آبرسانی و آبیاری که تا سال‌های متمادی نیز در ایران از آنها استفاده شد مرهون تلاش مهندسان و صنعتگران ایرانی است که در زمان‌های بسیار دور تلاش نمودند تا نیازها و کمبودها را در زمینه های عمرانی و آبادی بر طرف نمایند و آثار و شواهد آن را نیز می توان در نقاط مختلف ایران درک نمود. علاوه بر آن بسیاری از آثار به جا مانده از این دوران ها در سرزمین های تابعه حکومت های ایران باستان نیز قابل مشاهده است (افشار، ۱۳۷۳).

#### ۱-۲- کلیات

به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه‌های آبی احداث شده روی پی های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشت آب از پی این گونه سازه ها وجود دارد. اثرات تراوش از خاک زیر این سازه ها را می توان در سه بخش ایجاد نیروی زیرفشار، دبی نشت و گرادیان خروجی طبقه بندی کرد. نیروی زیرفشار، مقاومت برشی بین سد و پی آن را کاهش می دهد و باعث ایجاد تنش کششی شده و در نهایت منجر به لغزش یا واژگونی سد می شود. چنانچه در قسمت انتهایی سدها، سرعت نشت جریان آب افزایش یابد، ممکن است این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک گردد. این پدیده تسریع کننده پدیده مهم دیگری تحت عنوان زیرشویی می‌شود. بلای در سال ۱۹۱۰ در نخستین گام تئوری طول خزش را ارائه کرد (بلای، ۱۹۱۰).

به دلیل اختلاف بار آبی که در دو طرف سد بتنی وجود دارد، همواره نشت آب از خاک زیر آن برقرار است. اثرات تراوش از خاک زیر سازه ها، اغلب باعث آسیب جدی به آنها می گردد. مسائل نشت

در سازه های هیدرولیکی تعیین کننده طرح نهایی و ابعاد سازه است. یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی بدنه سدهای بتنی نیروی بالا برنده است زیرا این نیرو در جهت خلاف اطمینان در برابر پایداری واژگونی عمل می نماید. بنابراین در طراحی باید توجه خاصی به این نیرو مبذول داشت. (شریفی، ۱۳۸۹)

یکی از نیروهای مخربی که در جهت عدم پایداری سدها و بندهای انحرافی عمل می کند نیروی زیر فشار است که ناشی از جریان آب در محیط متخلخل پی سدها و بندهای انحرافی می باشد. گرادیان خروجی نیز مهمترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی می باشد. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیرفشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می رود ایجاد دیواره های آب بند می باشد. دیواره های آب بند که غالباً نفوذ ناپذیر می باشند و یا خیلی کم نفوذپذیرند باعث کند کردن و کم کردن حرکت آب زیر سازه های آبی می شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می کنند. کاهش شدت زیرفشار ناشی از ایجاد دیواره آب بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می شود. فاکتور شدت برابر است با نسبت واقعی زیرفشار در حالتی که دیواره آب بند وجود دارد به شدت زیرفشار در حالت بدون دیواره آب بند (کوپایی، ۱۳۸۰).

تجربیات نشان داده است که مشکلات نشت از سدها، بازتاب های اقتصادی حائز اهمیتی را در پی دارد و اقدامات علاج بخشی معمولاً پر خرج می باشد. در بسیاری از موارد این اقدامات، نتیجه ای جز شکست اقدامات و یا بالا بردن هزینه ها در پی نداشته است. همچنین پدیده زیرشویی زیر پی و بدنه، موجب شکست های فاجعه آمیز در سدها گردیده است و خسارات جانی و مالی عمده ای را به دنبال داشته است. گرادیان خروجی مهمترین معیار بررسی ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی است، بنابراین یافتن روش های کاهش مقدار نشت و گرادیان خروجی بسیار حائز اهمیت خواهند بود. همچنین از آنجایی که اقدامات تعمیراتی قبل و در مراحل اولیه ساخت سد به مراتب ارزانتر می باشند، جلوگیری و پیش بینی مشکلات آتی می تواند بسیار سودمند باشد و آگاهی اولیه از دبی نشت و

گرادیان خروجی مطمئناً کمک بسیاری را در اجرای اقدامات تزریق و نفوذ ناپذیرسازی در طول ساخت سد خواهد کرد (شمسائی، ۱۳۸۴).

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

نشت آب در سدها و نحوه کنترل آن اولین گام مؤثر و یکی از مهمترین مسائلی است که در طراحی آن مورد توجه خاص متخصصین قرار گرفته است. دانش و آگاهی از قوانین بنیادی نشت به متخصصین اجازه می دهد تا از بوجود آمدن مشکلات جدی در اثر نشت جلوگیری کرده و بهترین نوع سیستم کنترل نشت را انتخاب نمایند. تا کنون محققین و صاحب نظران مطالعات مؤثری در ارتباط با نشت و کنترل آن در سدها انجام داده اند، لیکن با توجه به اینکه هر سد دارای هندسه خاص خود می باشد همچنین آگاهی از تأثیر پارامترهای زیادی که در نشت آب دخالت دارند، می تواند در رفع سریعتر مشکلات طراحی کمک شایانی نماید (دارابی، ۱۳۸۸).

نفوذ آب از زیر سازه هایی که بر روی خاک های نفوذ پذیر بنا می شوند، یکی از عوامل ایجاد ناپایداری در زیر سد می باشد. این ناپایداری ها عمدتاً به علت توسعه زیر فشار (نیروی بالا برنده)، فرسایش تدریجی درونی مصالح پی (piping) و یا وقوع پدیده جوشش ماسه رخ می دهد. لذا محاسبه فشار وارده به سطح تماس سد و نیز گرادیان هیدرولیکی خروجی در پایین دست این گونه سازه ها ضروری به نظر می رسد. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از پدیده زیر شویی، کاهش گرادیان خروجی و همچنین کاهش دبی نشت از زیر سدهای انحرافی صورت می گیرد، احداث دیواره های آب بند و نیز زهکش می باشد. در فرآیند طراحی سد انحرافی، یکی از مهمترین نیروهای وارد بر آن، نیروی بالابرنده ناشی از فشار آب است که این نیرو از اختلاف بین تراز آب مخزن و تراز آب پایین دست سد در اثر جریان تراوش آب در زیر سازه ایجاد می گردد. همچنین بررسی پایداری حوضچه آرامش در مقابل نیروی بالابرنده و بلند شدگی نیز مهم می باشد.

#### ۱-۴- هدف از انجام تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی میزان تأثیر نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در کف حوضچه آرامش سد انحرافی بر میزان کاهش نیروی بالابرنده است. برای این کار، در این پایان نامه با استفاده از مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی مدل عددی سد انحرافی و بررسی نحوه قرارگیری کف بند و ترکیب آن با دیوار آب بند در پی سد و پایین دست، میزان حداقل نیروی بالابرنده مشخص می شود.

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آب بند بر روی گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیرفشار و تراوش از زیر سدهای انحرافی قرار گرفت. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیرفشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می رود ایجاد دیواره های آب بند می باشد. دیواره های آب بند که غالباً نفوذ ناپذیر می باشند و یا خیلی کم نفوذپذیرند باعث کند کردن و کم کردن حرکت آب زیر سازه آبی می شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می کند. کاهش شدت زیرفشار ناشی از ایجاد دیواره آب بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می شود. فاکتور شدت برابر است با نسبت واقعی زیرفشار در حالتی که دیواره آب بند وجود دارد به شدت زیر فشار در حالت بدون دیواره آب بند. در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقدار دبی نشت و فشار پیژومتری برای موقعیت های مختلف پرده آب بند در ابعاد مختلف، موقعیت های مختلف کف بند در بالادست و پایین دست سد در ابعاد متفاوت و همچنین بازشدگی دریاچه در هد های متفاوت به تعداد ۱۰۵ مرحله داده آزمایشگاهی برداشت گردید. نتایج نشان داد مقادیر بدست آمده از روش حل عددی دارای دقت بالایی می باشد. داده های عددی به حدود ۷۵۰۰ عدد در حالات مختلف زیر بدست آمد:

- شاهد بدون وجود پرده آب بند و کف بند

- وجود کف بند در سه طول در بالادست

- وجود کف بند در سه طول در پایین دست

- وجود پرده آب بند در زیر پی سد

- وجود کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پی سد

- وجود کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پایین دست

- وجود کف بند در پایین دست همراه با وجود دو پرده آب بند در بالادست و پایین دست



## فصل دوم

### پیشینه تحقیق

## ۱-۲- مقدمه

در این فصل به بررسی مطالعات انجام شده و تشریح مفاهیم اولیه مورد بحث اعم از دبی نشت، نیروی زیر فشار کاربرد دریچه در سد های انحرافی، پدیده جوشش<sup>۱</sup>، گرادیان خروجی و روش های کاهش دبی نشت پرداخته، در انتها تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه شده است.

## ۲-۲- سد های انحرافی

سدهای انحرافی معمولاً برای مقاصدی از جمله انحراف مسیر آب و بالا آوردن سطح آن معمولاً بعد از سدهای ذخیره ای یا بر حسب نیاز مستقلاً در قسمت های مناسبی از رودخانه ساخته می شوند. از جمله دیگر کاربری این سدها انحراف آب رودخانه از مسیر اصلی برای ساخت سد های بزرگتر روی رودخانه است. شکل ۱-۲ یک سد انحرافی را نمایش می دهد.



شکل ۱-۲ - نمایی از یک سد انحرافی

## ۱-۲-۲- اجزاء اصلی سدهای انحرافی

در شکل ۲ اجزاء معمول سدهای انحرافی را مشاهده می کنید. اما در اینجا به طور کلی دو قسمت را برای سد انحرافی در نظر میگیریم:

۲- آبگیر

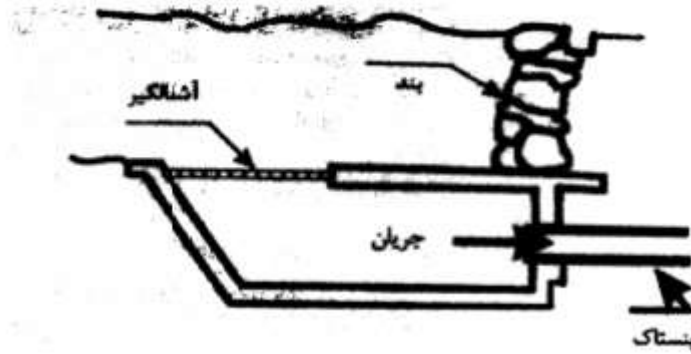
۱- سد

<sup>1</sup> Piping



۱-۱-۲-۲ سد

ساده ترین حالت سد از قرار گرفتن تعدادی سنگ در مسیر رودخانه ساخته می شود که به آن بند نیز گفته می شود.

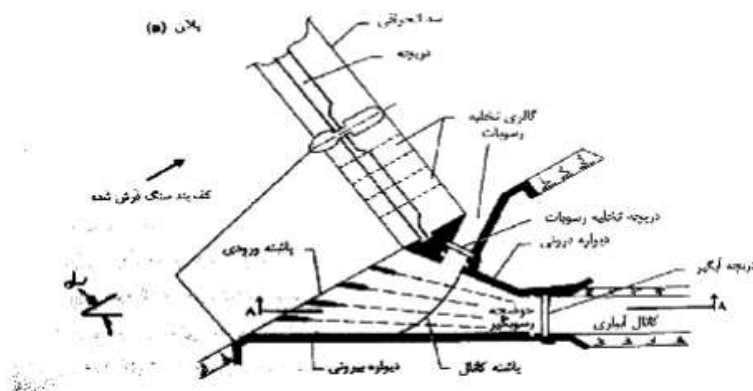


شکل ۲-۲- نمایی از یک بند

اگر ارتفاع زیاد باشد به حفاری نیاز است و باید از توری های فولادی که سنگ داخلشان است استفاده شود.

۲-۱-۱-۲- آبگیر

قسمتی از سد که آب را به سمت کانال یا پنستاک یا جهتی که مقصود ما است هدایت می کند.



شکل ۲-۵- نمایی از یک آبگیر

## ۲-۳- نشت از پی سد

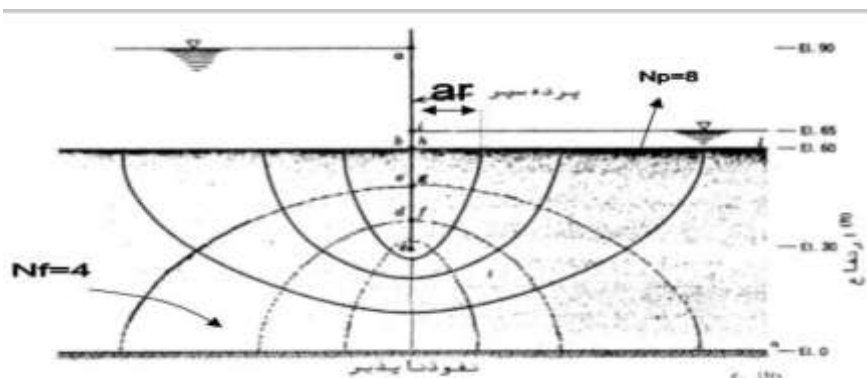
به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه های آبی احداث شده روی پی های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشت آب از پی این گونه سازه ها وجود دارد. اثرات تراوش از خاک زیر این سازه ها را می توان در سه بخش ایجاد نیروی زیرفشار، دبی نشت و گرادیان خرومی طبقه بندی کرد. نیروی زیرفشار، مقاومت برشی بین سد و پی آن را کاهش می دهد و باعث ایجاد تنش کششی شده و در نهایت منجر به لغزش یا واژگونی سد می شود. چنانچه در قسمت انتهایی سدها، به علت افزایش گرادیان خروجی، سرعت نشت جریان آب افزایش یابد، ممکن است این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک گردد. این پدیده تسریع کننده پدیده مهم دیگری تحت عنوان زیرشویی نامیده می شود (خلیلی شایان و تکلدانی، ۱۳۹۱).

تا حدود نیم قرن طراحی سدهای خاکی و خاکریزها تنها بر اساس تجربه صورت می گرفت ولی امروزه به طرح علمی سدهای خاکی پرداخته می شود. بیشترین عامل پیشرفت تحقیقات در ارتباط با مسئله تراوش تاثیر بالای آن بر روی پایداری سدها به عنوان یکی از علل تخریب آنهاست (عباسی و غفوری، ۱۳۸۵).

## ۲-۴- مفاهیم اولیه

### ۲-۴-۱ ترسیم شبکه جریان

در شکل ۲-۶ تصویر شبکه جریان نشت داده شده است. همان طور که در بحث های مکانیک خاک مطرح است یکی از راه حل های تشخیص نحوه جریان آب در خاک روش ترسیم شبکه جریان است (طاحونی، ۱۳۷۶).



۲-۶- تصویر شبکه جریان در زیر یک دیوار سپری

رابطه پیوستگی جریان برای یک محیط خاک ایزوتروپیک نشان‌دهنده دو خانواده منحنی عمود برهم است که نام یکی خطوط جریان و نام دیگری خطوط هم پتانسیل است. خط جریان<sup>۲</sup> خطی است که ذرات آب در امتداد آن از بالادست به پایین دست در خاک نفوذ پذیر جریان می‌یابند. خط هم پتانسیل<sup>۳</sup> خطی است که نقاط واقع در روی آن دارای یک انرژی پتانسیل می‌باشند. ترکیبی از تعدادی خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل، شبکه جریان نامیده می‌شود.

پس از رسم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل داریم:

$$q = kh \frac{N_f}{N_p} \quad (1-2)$$

که در آن  $q$  دبی در واحد عرض برحسب مترمکعب بر ثانیه در متر،  $k$  نفوذپذیری خاک بر حسب متر بر ثانیه،  $h$  اختلاف بار آب بالادست و پایین دست برحسب متر،  $N_f$  تعداد خطوط جریان و  $N_p$  تعداد خطوط هم پتانسیل می‌باشد.

#### ۲-۴-۲- پدیده گرادیان بحرانی

در تمام جریان‌های ثقلی آب در داخل خاک نیروی نشت وجود دارد. آبی که در داخل خاک جریان می‌یابد نیرویی در جهت جریان به توده خاک وارد می‌سازد. این نیرو متناسب با شیب هیدرولیکی می‌باشد. شیب هیدرولیکی نیرویی است که آب را در داخل خاک تحت فشار قرار می‌دهد

<sup>۲</sup>Flow line

<sup>۳</sup>Equipotential line

و به حرکت در می آورد. نیرویی که با نیروی مذکور مقابله می کند عبارت است از اصطکاک. برای آنکه از گسیختگی ناشی از شسته شدن ذرات و آبشستگی داخلی یا بیرون زدن ذرات خاک جلوگیری بعمل آید، لازم است که این نیروی محرک توسط نیروهای اصطکاکی موجود در طول قاعده سد تقریباً خنثی گردد (بیفنگ و چانگ بینگ، ۲۰۰۸).

می دانیم فشار موثر بر هر جزء خاک عبارت است از :

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-2)$$

$$u = \gamma_{\omega} \cdot z \quad (3-2)$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot z \quad (4-2)$$

$u$  فشار آب حفره ای  $\sigma'$  تنش موثر،  $\sigma$  تنش کل می باشد.

برای فشار ناشی از تراوش داریم:

$$h \cdot \gamma_{\omega} = i z \gamma_{\omega} \quad (5-2)$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot z - i z \gamma_{\omega} \quad (6-2)$$

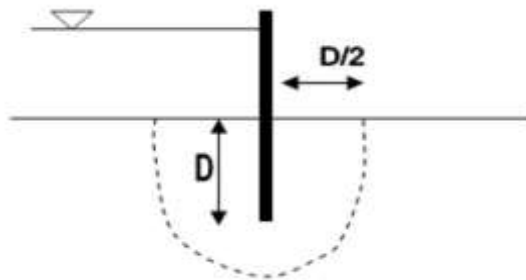
در صورتیکه فشار موثر صفر باشد یعنی گرادیان هیدرولیکی در سطح خروجی بحرانی باشد داریم:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_{\omega}} \quad (7-2)$$

اگر گرادیان خروجی برابر گرادیان بحرانی شود پدیده شسته شدن ذرات خاک در پایاب سد پیش می

آید. آزمایشات ترزاقی نشان داد که روان شدگی خاک در فاصله  $\frac{D}{2}$  از پایین دست کات آف رخ

میدهد یعنی مطابق شکل ۲-۱۰ در منشوری به عمق  $D$  و عرض  $\frac{D}{2}$  (طاحونی، ۱۳۷۶).

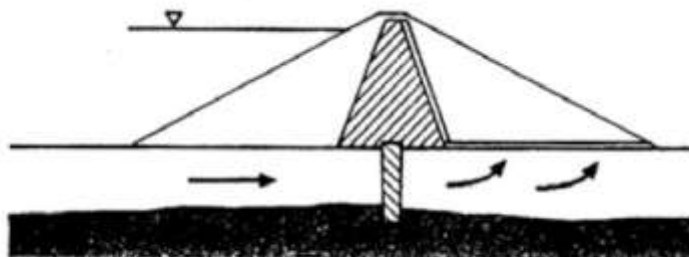


۷-۲- محدوده ایجاد پدیده گردابیان بحرانی

۵-۲- روشهای کاهش نشست آب در زیر سد انحرافی

۱-۵-۲- دیوارهای سپری

یکی از راه‌های متداول کاهش دبی نشست، نیروی زیر فشار و گردابیان خروجی در پی نفوذپذیر سازه‌های آبی، استفاده از دیوارهای سپری است. دیوارهای سپری به دلیل ایجاد افت در مسیر جریان و افزایش طول مسیر باعث کاهش دبی نشست می‌گردند. در شکل ۱۱-۲ تصویر شماتیک پرده آب‌بند در زیر سد نمایش داده شده است.



۱۱-۲- تصویر شماتیک پرده آب‌بند

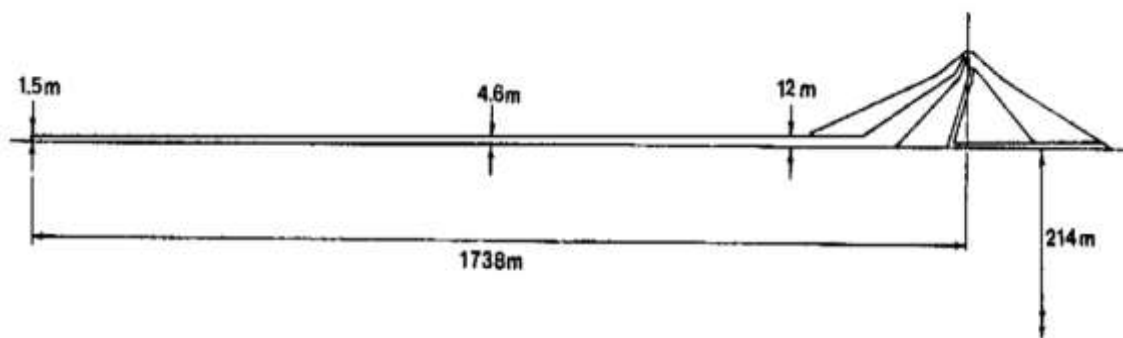
آب‌بندها و موانعی را که بر سر راه جریان آب ایجاد می‌شود، می‌توان به سه دسته آسترها و پوشش‌ها، دیوارها و تزریق تقسیم کرد (حبیبی، ۱۳۷۴).

۱-۱-۵-۲- آسترها و پوشش‌ها

آسترها و پوشش‌ها به صورت لایه‌ای نفوذ ناپذیر اجرا می‌شوند و دارای انواع زیرند:

- تعبیه ورقه‌ای از رس که در بستر دریاچه به سمت سراب ایجاد می‌شود و وظیفه آن افزایش مسیر افقی جریان آب در زیر زمین و در نتیجه کاهش فشار آب و میزان نشت آن در پنجه سد است.

- مطابق شکل ۲-۱۲ یک لایه (آستر) رسی یا پلاستیکی که برای جلوگیری از فرار آب از مخزن یا نشت سیالات اجرا می‌شود (وونگ، ۲۰۰۱).



۲-۹ - بتوی ناتراوا در بالادست

۲-۵-۱-۲- دیوار خاکی متراکم شده

این دیوارها می‌توانند به عنوان یک خاکریز همگن برای سد، به صورت یک هسته در داخل سد یا ترانشه‌ای در پی سد، که هسته آن با رس پر شده باشد، اجرا شوند (حیدری‌نژاد، ۱۳۷۶).

۲-۵-۱-۳- دیواره های بتنی

این نوع دیوار معمولاً در حفاری پی‌ها یا به عنوان پوشش داخل تونل‌ها، مخصوصاً در جاهایی که جلوگیری دائم از نفوذ آب لازم باشد، بکار می‌روند. در سدها برای جلوگیری از فرار آب از زیر سد، دیوار بتنی قائمی را از پایینترین قسمت سد تا لایه‌های نفوذ ناپذیر احداث می‌کنند.

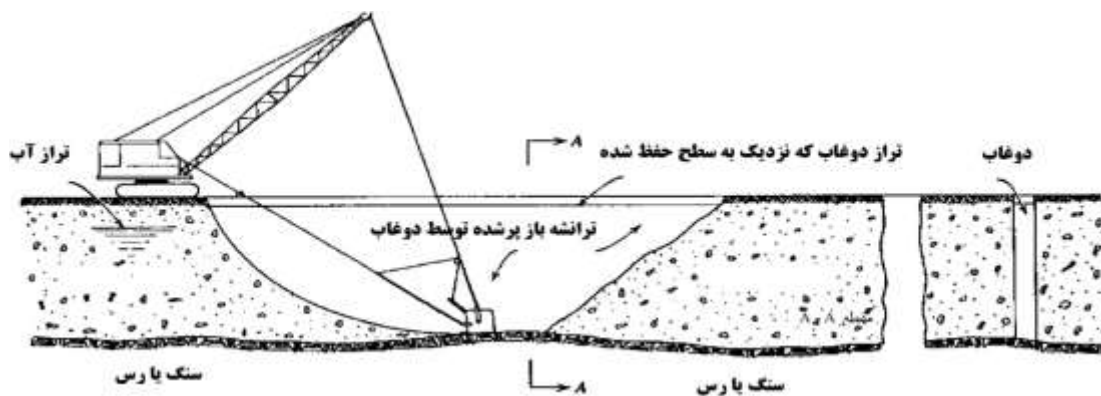
۲-۵-۱-۴- دیوار با شمع‌های صفحه‌ای

این نوع دیوار، که با راندن شمع‌های صفحه‌ای به داخل خاک ایجاد می‌شود، موقعی از کارایی خوبی برخوردار است که قفل و بست بین صفحات کامل باشد و این مسئله‌ای است که در زمینهای

دارای قلوه سنگ و قطعات درشت تر یا حاوی موانع دیگر به خوبی امکان پذیر نیست. با افزایش طول شمع‌ها، امکان خم شدن آنها در خلال راندن وجود دارد. این نوع دیوار تا حدی می‌تواند از نفوذ آب جلوگیری کند. این دیوار را معمولاً برای نگاهداری دیواره بخش‌های حفاری شده بکار می‌برند. در خاکهای با زهکشی آزاد، دیوار باید همراه با یک سیستم آبکشی باشد تا فشار جانبی وارده از زمین و آب به دیوار شمعی کاهش یابد (صدرکریمی و کیا، ۱۳۸۵).

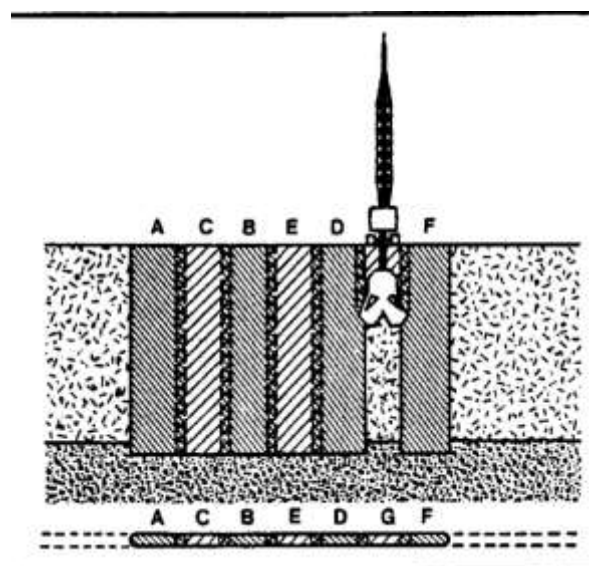
#### ۲-۵-۱-۵- دیوارهای گلی

دیوارهای گلی و ترانشه‌های پر شده از گل به عنوان عاملی کارآمد برای جلوگیری از نشت آب در پی سدها، حفاری‌های باز، حفاری تونل‌ها و سیستم‌های کنترل آلودگی، روز به روز مصرف بیشتری پیدا می‌کنند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود روش احداث این دیوارها به جز در تونلها، به این ترتیب است که ابتدا یک ترانشه حفر می‌شود و برای اینکه دیوارهای ترانشه در طول حفاری ریزش نکند، داخل آن را با گل روانی از بنتونیت پر می‌کنند. در پایان حفر ترانشه، این گل روان با موادی که بتواند یک دیوار دائمی و نسبتاً غیرقابل تراکم و نفوذناپذیر را بسازد، تعویض می‌شود (صدرکریمی و کیا، ۱۳۸۵).



۲-۱۰- اجرای دیوار آب‌بند بنتونیتی.

در شکل ۱۱-۲ روش اجرایی تزریق بصورت شماتیک ترسیم شده است. تزریق دوغاب به داخل خاکهای نفوذ پذیر و سنگ، روش رایج و دائمی برای جلوگیری از جریان آب زیرزمینی است. البته در اغلب موارد دیواری که به این ترتیب بوجود می‌آید کاملاً نفوذپذیر نیست. از تزریق همچنین برای افزایش مقاومت سنگ و خاک سود جسته می‌شود. دوغاب‌ها متنوع اند و می‌توانند ترکیبی از سیمان، سیمان و خاک یا مواد شیمیایی باشند. انتخاب نوع دوغاب به تخلخل سازندهای زمین شناسی، سرعت جریان آب و مقاومت فشاری نهایی بخش‌های تزریق شده بستگی دارد. بطور کلی دوغابهای ماسه - سیمان برای بستن حفره‌های بزرگ و شکستگی‌ها و دوغاب‌های رس و سیمان پرتلند برای بستن شکستگی‌های نسبتاً کوچک و خاک‌های دانه درشت بکار می‌روند. به منظور کنترل جریان آب زیرزمینی، حفر رشته منفردی از گمانه‌ها و تزریق در آنها اغلب کافی است. پرده تزریق را می‌توان با افزودن رشته‌های دیگری از گمانه‌های تزریق شده ضخیم تر نمود. در سنگ‌های شکافدار یا جاهایی که جریان زیاد است، موفقیت عملیات تزریق کمتر است (نشریه استانداردهای مهندسی آب کشور، راهنمای تزریق در سازه‌های آبی، ۱۳۷۸).



۱۱-۲ - اجرای دیوار آب بند با ملات دوغاب



در شکل ۲-۱۲ رابطه نوع خاک و نوع پرده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای پی‌های ماسه‌ای از تزریق سیمان - خاک و رس، برای پی‌های سیلتی از تزریق کروم یا پلیمرها استفاده می‌شود. نتایج آزمایشگاهی هار در سال ۱۹۶۲ برای تاثیر دیوار آب‌بند بر فاکتورهای نشت نشان داده شده است.



۲-۱۲- رابطه نوع خاک و نوع پرده آب‌بند تزریقی (طاحونی، ۱۳۷۶)

#### ۲-۵-۲- زهکش‌ها

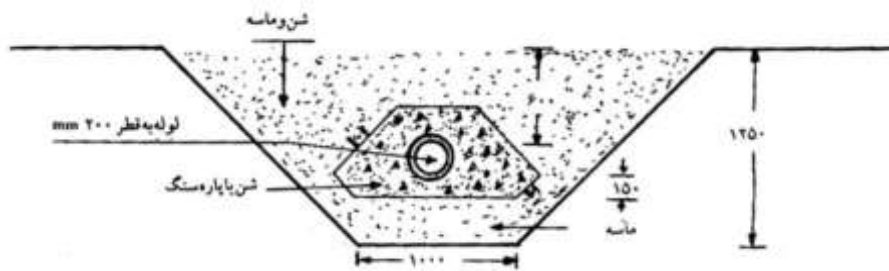
جهت خارج نمودن آب از رگاب‌های پی یا بدنه سد از زهکش‌ها استفاده می‌شود. معمولاً زهکش‌ها در پایین‌دست سد خاکی اجرا می‌شود تا زه درون بدنه و پی را خارج کند. مطابق شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ زهکش‌ها با چند طبقه فیلتر به خاک بدنه سد متصل می‌شود. طول و ضخامت زهکش باید بر اساس میزان تحمل زه و شرایط دیگر تعیین گردد. شکل‌های ۲-۱۵ و ۲-۱۶ روش اجرایی نصب زهکش‌ها نشان داده شده است. (نشریه استانداردهای مهندسی آب کشور، راهنمای تزریق در سازه‌های آبی، ۱۳۷۸).



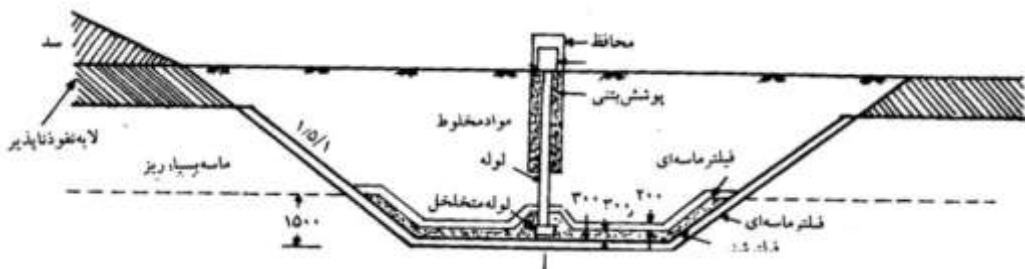
۱۳-۲ - زهکش افقی در پاشنه سد خاکی



۱۴-۲ - زهکش افقی و مایل در زیر سد خاکی



۱۵-۲ - نحوه استقرار زهکش لوله ای زیر سد



۲-۶ طول خزش

۲-۶-۱- تئوری بلای

بلای<sup>۴</sup> (۱۹۱۰) در نخستین گام تئوری طول خزش را ارائه کرد. طول خزش به مسیر تماس جریان با مصالح کف سازه اطلاق می‌گردد. وی اظهار داشت که شیب هیدرولیکی در طول مسیر خزش ثابت و در نتیجه در طول این مسیر افت انرژی به طور خطی با طول خزش تغییر می‌کند. در نتیجه توزیع فشار در زیر سد خطی است. مقدار زیرفشار  $h_x$  در هر نقطه دلخواه  $x$  از مسیر خزش در شرایط حضور دیواره سپری در بالادست به عنوان حالت نمونه، از تئوری بلای عبارت است از:

$$L_x = \begin{cases} X, & 0 \leq X \leq x \\ X + 2l, & X > x \end{cases} \quad (۸-۲)$$

$$h_x = H - \frac{L_x}{2l + b} \Delta h$$

که در آن،  $H$  ارتفاع آب در بالادست،  $l$  عمق پرده آب بند،  $b$  عرض کف بند،  $x$  موقعیت طولی هر نقطه از ابتدای کف بند و  $L_x$  فاصله خزشی هر نقطه در طول مسیر خزش و  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع سطح آب در طرفین می‌باشد.

۲-۶-۲ تئوری لین<sup>۵</sup>

لین (۱۹۳۵) اعتقاد به تفاوت تاثیر حرکت افقی و حرکت قائم آب در خاک داشت و لذا بر اساس تئوری خزشی وزنی خود با اختصاص ضریب  $0.33$  به مجموع طول‌های افقی و ضریب ۱ به مجموع طول‌های قائم، طول معادل را به صورت زیر تعریف کرد:

$$L_{eq} = \frac{1}{3} \sum L_H + \sum L_V \quad (۹-۲)$$

<sup>۴</sup> Bligh

<sup>۵</sup> Lane

که در آن  $\Sigma LH$ : طول مسیر خزش افقی (و دیواره‌های کم شیب‌تر از ۴۵ درجه) و  $\Sigma LV$ : طول مسیر خزش قائم (و دیواره‌های پر شیب‌تر از ۴۵ درجه) می باشد. در این روش نیز مشابه تئوری خزشی بلای، توزیع زیرفشار در زیر سد خطی فرض می‌شود.

## ۲-۷-مروری بر مطالعات انجام شده

- اولین بار بلای (۱۹۱۰) تئوری طول معادل خزش را معادل مسیر خط تماس بین کف سازه و خاک فونداسیون ارائه نمود و اظهار داشت که شیب هیدرولیکی در طول مسیر ثابت و افت انرژی به صورت خطی با طول خزش تغییر می کند.
- لین (۱۹۳۵) تئوری طول معادل را با اعمال ضریب  $0/3$  به طول‌های افقی ارائه نمود. در قوانین لین و بلای دیواره‌های با زاویه کمتر از ۴۵ درجه به عنوان طول‌های افقی و بالاتر از ۴۵ درجه به عنوان طول‌های قائم در نظر گرفته می شود.
- خلیلی شایان و تکلدانی (۱۳۹۱)، به بررسی نیروی زیرفشار، گرادیان خروجی، دبی نشت در شرایط حضور یک دیوار سپری و بلانکت در بندهای انحرافی پرداختند و معادلات بدون بعد برای تغییرات عمق پرده آب‌بند و فاصله از مبدا ارائه نمود همچنین قوانین لین، بلای، خوسلا را با روش عددی اجزای محدود مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که روش خوسلا مقادیر حقیقی‌تری را برای برآورد نیروی زیرفشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد.
- پاکباز و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل SEEP3D به ارزیابی ساخت دیوار آب بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سدخاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند . نتایج مطالعات آنها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

- پوراسکندری (۱۳۹۱)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آببند بر روی نشت از پی‌های مطابق در سدها پرداخت و نمودارهای تغییرات بدون بعد  $\frac{u-u_*}{u_*}$  در مقابل طول مسیر پی مطابق سد ارائه نمود.
- اپی رچال (۲۰۰۳)، نخستین بار روش منطق فازی را به منظور شناخت مسیر خط نشت درون سدها به کار برد، وی خطوط نشت جریان را برای لایه های مختلف خاک با گرادیان های خروجی متفاوت به دست آورد.
- قبادیان و خدایی (۱۳۸۸)، به بررسی تاثیرات دیوار آببند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک با روش حجم محدود پرداختند و دیاگرامهای زیرفشار- طول سد را در زیر بند انحرافی در حضور دیوار آببند منفرد، دو دیوار آببند، دو دیوار آببند و یک زهکش در خاکهای همسان و غیر همسان ارائه نمودند. بر اساس نتایج مطالعات ایشان با احداث دیواره سپری در هر موقعیت مکانی مقدار گرادیان خروجی نسبت به شرایط عدم وجود دیواره کاهش خواهد یافت. همچنین بیشترین میزان نیروی زیرفشار و کمترین مقدار گرادیان خروجی در شرایط حضور دیواره در انتهای پایین دست سازه حاصل می‌شود. همچنین در شرایط حضور یک دیواره سپری در ابتدا و یک دیواره سپری در انتهای سازه و وجود یک زهکش در حدفاصل آنها، هرچه زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود، کاهش در نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی بیشتر است.
- صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۴)، اثر موقعیت بهینه پرده آببند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند و موقعیت بهینه دو پرده آببند و زهکش را در زیر سد نشان داده و روابطی برای نسبت دبی نشت در حالت وجود دیوار آببند به عدم حضور آن ارائه نمودند. در این تحقیق به بررسی اثر موقعیت و زاویه تمایل دیواره‌های سپری بر تغییر نیروی زیرفشار، دبی نشت و شیب خروجی

پرداخته شده است. بررسی تاثیر طول بلانکت و موقعیت طولی و عمقی زهکش بر توابع هدف از جمله دیگر اهداف این تحقیق می باشد.

■ ابول پور (۱۳۷۳)، مدلی را پیشنهاد کرد که زیر فشار وارد بر سازه های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت محاسبه می کرد، مدل فوق در محاسبه زیر فشار و زیرشویی از روش های لین، بلای، خوسلا و شبکه جریان استفاده کرده و میزان خطای بدست آمده در مقایسه با داده های پیزومتریک سد درودزن حدود ۴ درصد بود.

■ صیادزاده (۱۳۸۶)، آنالیز نشت از پی خاک های لایه دار با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار داد و بوسیله منحنی های بدون بعد اپسیلن  $\varepsilon$  پولوبارینوا-کوچینا دیاگرام های  $\frac{kh}{q}$  را برای پی های سه لایه ترسیم نمود همچنین دبی نشت و گرادیان خروجی را در پی های دو لایه و سه لایه نشان داد.

■ صدقی اصل و همکاران (۲۰۱۱)، اثرات روش های مختلف کنترل نشت در زیر دایک های ساحلی را با بهره گیری از یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن ها طول بهینه بلانکت و عمق بهینه دیواره های سپری را به گونه ای ارائه کردند که مقدار نیروی زیر فشار وارد بر دایک حداقل گردد. ایشان نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تئوری های بلای و لین در شرایط متناظر قیاس نموده و نتیجه گرفتند روش لین مقدار نیروی زیر فشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش بلای برآورد می کند.

■ جای (۲۰۰۴)، با استفاده از روش تفاضل محدود مبتنی بر روش انتقال مختصات برآزش مرزی به بررسی نشت از زیر سدها و فرازبندها به کمک معادله پواسون پرداختند. او به نتایج قابل قبولی با خطای کمتر از ۱۰٪ رسید.

# فصل سوم

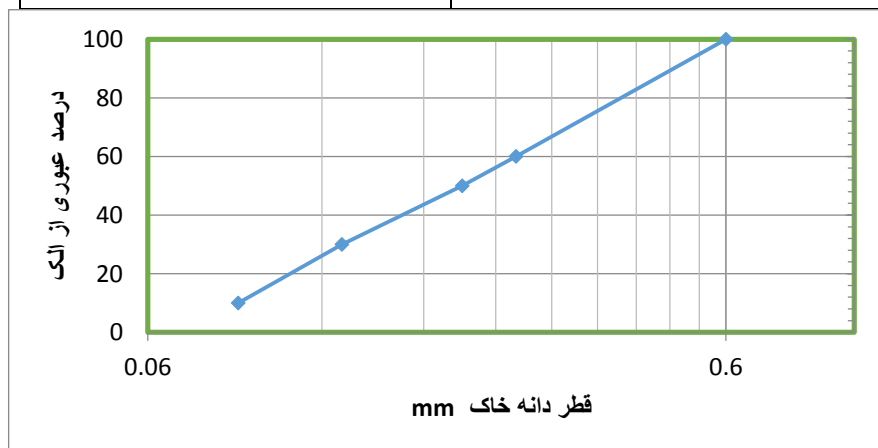
## مواد و روش‌ها

### ۱-۳ مدل آزمایشگاهی

آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. مدل آزمایشگاهی مخزن نشت و نفوذ به طول ۲۰۰ سانتی متر و عرض ۵۰ سانتی متر و با ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر از جنس پلکسی به ضخامت ۱ سانتی متر می باشد. بر روی دستگاه سوراخ هایی به فواصل ۱۱ سانتی متر در ۵ ردیف ۱۵ تایی موجود است که در مجموع تعداد ۷۵ پیژومتر روی این دستگاه تعبیه شده بود (شکل ۳-۲). نمونه خاک از جنس ماسه بادی به عمق ۳۸ سانتی متر است که دانه بندی خاک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد و همچنین به منظور به دست آوردن ضریب هدایت هیدرولیکی آزمایش بار ثابت در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی انجام گردید و نتایج آن در جدول ۳-۱ و همچنین منحنی دانه بندی خاک را در شکل ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱ مشخصات خاک مورد آزمایش

K	۰/۰۰۰۰۷۵۸ m/s
Cc	۱/۲۹۲
Cu	۳/۰۲۳



شکل ۳-۱ نمودار دانه بندی خاک





شکل ۳-۲- نمایشی از مدل آزمایشگاهی

### ۳-۱-۱- نحوه انجام آزمایش

در ابتدا دستگاه در محل خود قرار داده شد و تراز گردید سپس مخزن آن را پر از آب کرده و دستگاه را شست و شو داده و آب بندی انجام شد.

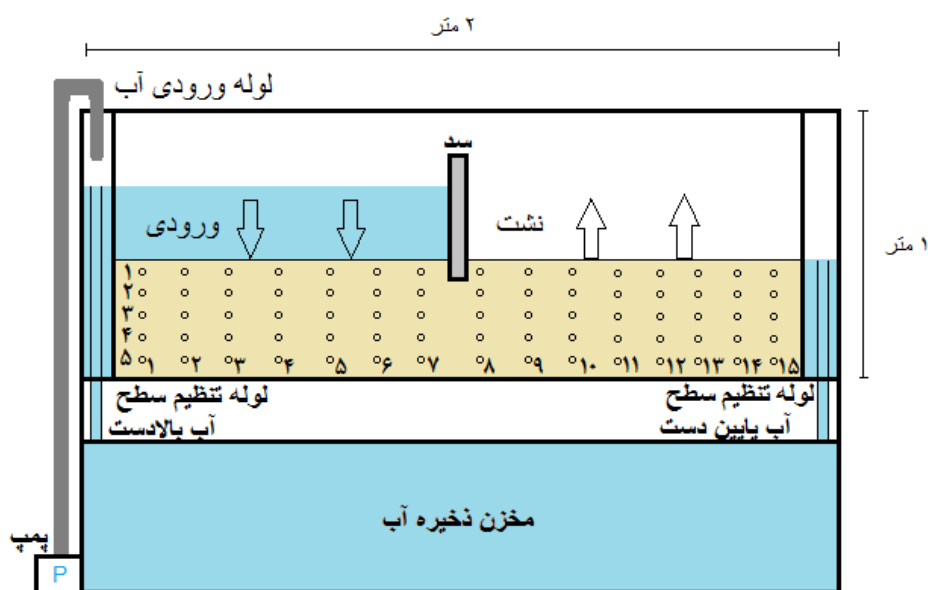
ماسه ها را شسته و رس را از آن جدا کردیم سپس ماسه را در معرض آفتاب خشک کرده. بعد از اینکه ماسه ها خشک شد آن را به ارتفاع ۳۸ سانتی متر داخل مدل آزمایشگاهی ریخته سپس خاک را کوبیده و بعد پمپ را روشن کرده تا این که ۳۰ سانتی متر آب روی سطح خاک قرار بگیرد، به منظور اشباع شدن خاک بعد از ۳ روز آب را از روی آن خالی کرده و مجدداً خاک را کوبیده و سطح آن را به وسیله یک کاردک تراز و صاف کرده و دستگاه را آماده ی انجام آزمایش کردیم.

برای ساخت بدنه سد از پلکسی با قطر ۳ سانتی متر ارتفاع ۴۰ سانتی متر و عرض ۵۰ سانتی متر استفاده شد و بدنه سد به منظور داشتن پی ۳ سانتی متر پایین تر از سطح خاک قرار گرفت. برای ساخت کف بند و پرده آب بند نیز از پلکسی به قطر ۰/۳ سانتی متر استفاده شد.

برای نصب بدنه سد، کف بند و پرده آب بند از چسب آکواریوم استفاده شد و برای هر مدل به طور کامل آب بندی صورت گرفت. برای قرائت عمق آب بالادست و پایین دست از خط کش های مندرج روی دستگاه استفاده شد و برای قرائت نیروی زیر فشار از تابلوی مدرج که ضمیمه ی دستگاه بود استفاده گردید. قرائت دبی نیز با استفاده از استوانه مدرج و کرنومتر انجام شد و کلیه دبی ها به صورت حجمی بر حسب میلیمتر بر دقیقه بدست آمد.

در ابتدا مدل شاهد بدون حضور کف بند و پرده آب بند مورد بررسی قرار گرفت و میزان دبی و نیروی فشار در ۷۵ پیزومتر قرائت شد. لازم به ذکر است که عمق پایین دست به میزان ۳۸ سانتی متر ثابت در نظر گرفته شد و عمق بالادست برای هدهای ۴۲، ۴۷، ۵۲، ۵۷، ۶۲، ۶۷، ۷۲ و ۷۵ قرائت شد. میزان عمق آب را با فاصله زمانی هر ۳ دقیقه به اندازه ۱ سانتی متر بالا برده تا زمانی که به هد مد نظر برای قرائت برسد، در این بازه زمانی فرصت این بود که پیزومتر های بحرانی که در زیر سد قرار دارند مشاهده و قرائت شود و احتمال وقوع پدیده پایپینگ بررسی گردد. هد آب را تا زمانی بالا بردیم که لحظه ی وقوع پایپینگ مشاهده شود و پس از مشاهده ی آن میزان سطح آبی که در آن پایپینگ اتفاق افتاد و همچنین پیزومترهای بحرانی نیز به داده ها اضافه شد و مورد بررسی قرار گرفت. کلیه عملیات بالا برای هر مدل اجرا شد. تمامی قرائت های عمق آب بالادست و پایین دست و همچنین قرائت پیزومترها از سطح مبنای کف دستگاه تانک نشت صورت گرفت.

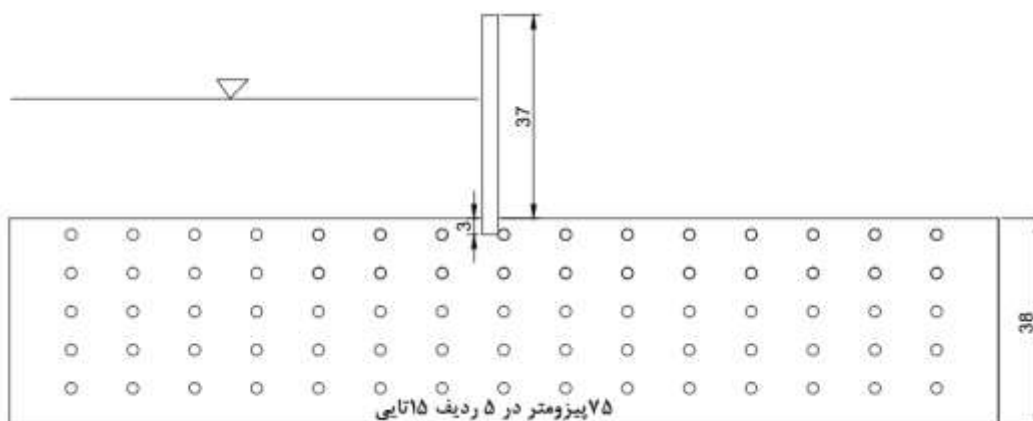
برای سهولت در قرائت پیزومترها از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم استفاده گردید.



شکل ۳-۳ ابعاد مدل آزمایشگاهی و محل قرار گیری پیزومترها و سایر اجزای دستگاه

۳-۱-۲- مدل آزمایشگاهی شاهد

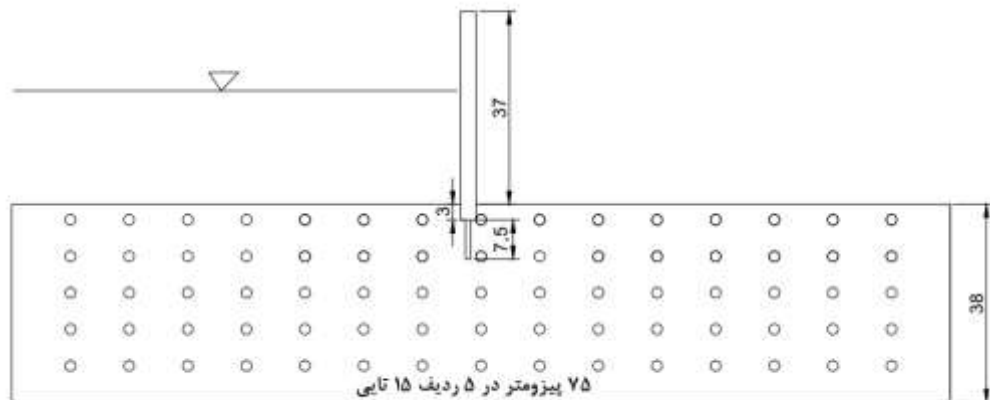
در این حالت جریان بدون حضور کف بند و پرده آب بند می باشد که این مدل را به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته ایم، سد تقریباً در وسط مدل آزمایشگاهی تعبیه شده است، و برای شبیه سازی مدل واقعی سد، پی سد به میزان ۳ سانتی متر در داخل خاک جایگذاری گردید (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ نمای مدل آزمایشگاهی سد بدون حضور کف بند و پرده آب بند

۳-۱-۳- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد

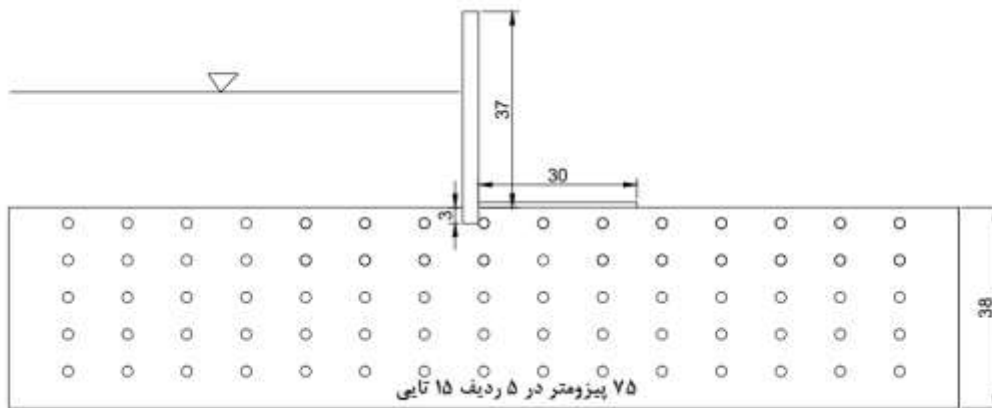
در این حالت پرده آب بند به عمق  $7/5$  سانتی متر در قسمت پی سد نصب شد (شکل ۳-۵) که این میزان ۵ برابر گرادیان بحرانی در مدل شاهد می باشد، تمامی کف بند ها و پرده های آب بند ضریبی از گرادیان هیدرولیکی بحرانی می باشند. میزان هد آب پایین دست را ۳۸ سانتی متر در نظر گرفتیم و هد بالادست را طبق روندی که داشتیم از ۴۲ سانتی متر شروع تا بیشترین مقدار هد سد (۷۵ سانتی متر) بالا بردیم و در هدهای مختلف مقدار فشار پیزومترها و دبی نشت برای این مدل به دست آمد (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد

۳-۱-۴- مدل آزمایشگاهی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد

در این حالت کف بند به طول ۳۰ سانتی متر در قسمت پایین دست سد بر روی سطح خاک نصب شد (شکل ۳-۶)، هد پایین دست را در ۳۸ سانتی متر تنظیم کرده و میزان فشار پیزومتری و دبی نشت را در هدهای بالادست را در ۴۲، ۴۷، ۵۲، ۵۷، ۶۲ و ۶۷ سانتی متر قرائت کردیم (شکل ۳-۶).

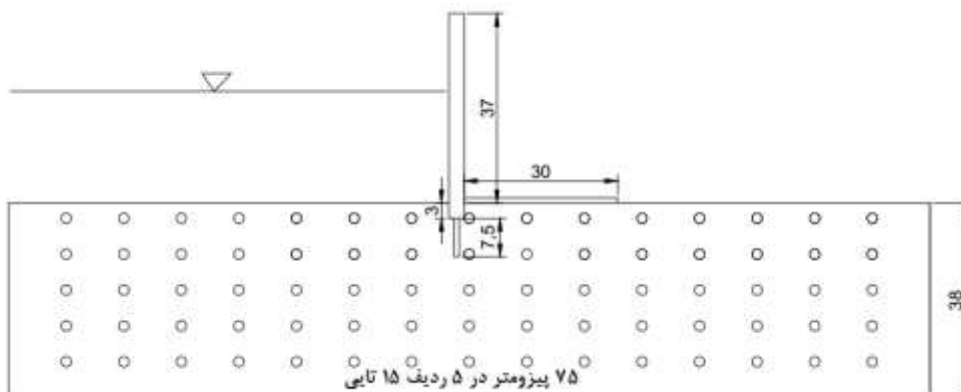


شکل ۳-۶ نمای مدل آزمایشگاهی سد بدون حضور کف بند و پرده آب بند

برای این مدل که کف بند در آن حضور دارد، به منظور بدست آوردن مقدار نیروی زیر فشار پیزومترهای ۸، ۹ و ۱۰ از ردیف اول که در زیر کف بند قرار دارند مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار فشار در ۰/۸۹ متر از ابتدای مدل یعنی ابتدای کف بند و ۱/۱۹ متر از ابتدای مدل یعنی انتهای کف بند در هدهای مختلف آب در بالادست اندازه گیری شده است. همچنین با استفاده از مدل عددی مقدار فشار زیر کف بند به دست آمد.

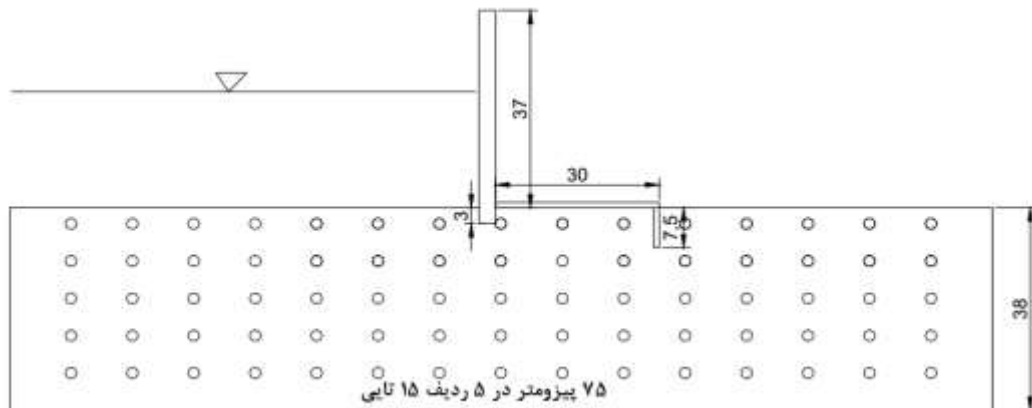
شکل ۳-۵-۱-۵ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد

در این حالت کف بند به طول ۳۰ سانتی متر در قسمت پایین دست سد بر روی سطح خاک و همچنین پرده آب بند به عمق ۷/۵ سانتی متر در قسمت پی سد نصب شد (شکل ۳-۷).



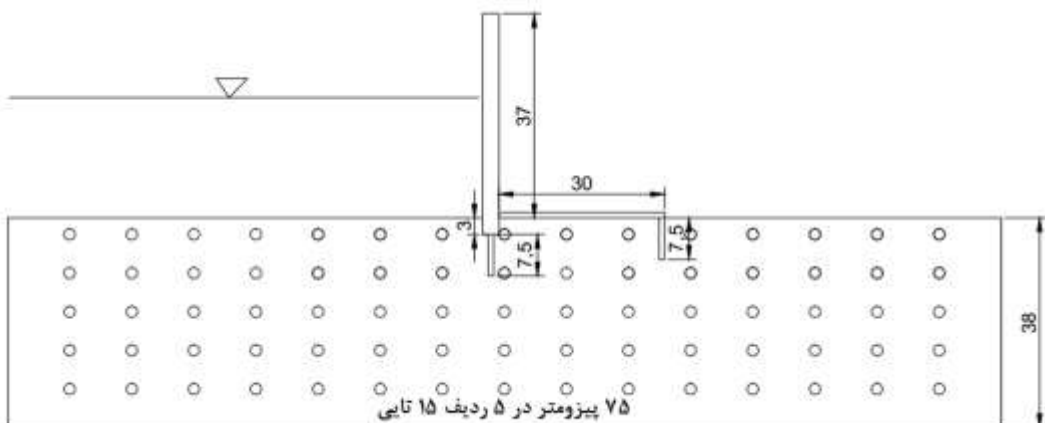
شکل ۳-۷ نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد

۳-۱-۶- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست در این حالت کف بند به طول ۳۰ سانتی متر در قسمت پایین دست سد بر روی سطح خاک و همچنین پرده آب بند به عمق ۷/۵ سانتی متر در قسمت پایین دست نصب شد (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست

۳-۱-۷- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد در این حالت کف بند به طول ۳۰ سانتی متر در قسمت پایین دست سد بر روی سطح خاک و همچنین پرده آب بند به عمق ۷/۵ سانتی متر در قسمت پایین دست و پی سد نصب شد (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۹- نمای مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد

۳-۲- کالیبراسیون

برای کالیبراسیون مدل عددی مقدار  $K$  را مورد بررسی قرار داریم. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی را توسط آزمایش بار ثابت به دست آوردیم که مقدار آن  $۰/۰۰۰۰۷۵۸$  متر بر ثانیه بدست آمد (شکل ۳-۳).

۱۰). این مقدار و چند K دیگر را به طور فرضی در مدل قرار دادیم، K آزمایشگاهی داده های قابل قبولی از دبی نسبت به ضرایب دیگر به ما نشان داد. پس ادامه ی مدل سازی با ضریب هدایت هیدرولیکی به دست آمده انجام گردید و داده های آزمایشگاهی و عددی تطابق قابل قبولی با هم داشتند.



شکل ۱۰-۳ نمایی از مدل آزمایشگاهی بار ثابت





فصل چہارم

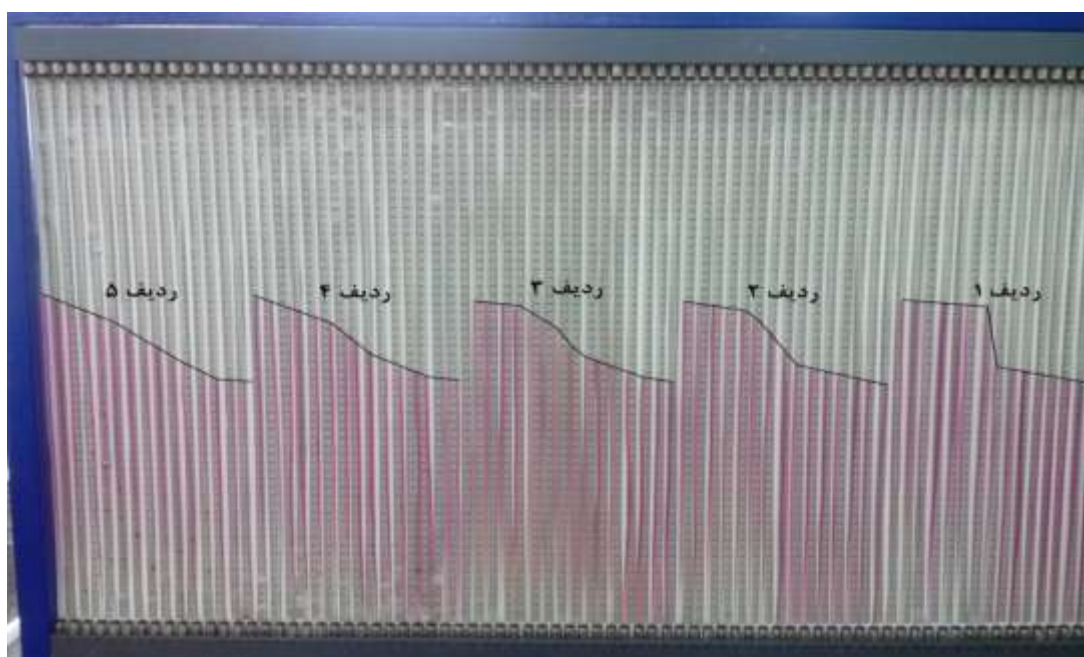
نتایج و بحث

در این فصل نتایج این تحقیق که شامل دو بخش آزمایشگاهی و عددی می‌شود، ارائه شده است که شامل گردیان خروجی، خطوط نشت، نیروی زیر فشار و دبی نشت است.

#### ۱-۴- نتایج مربوط به خطوط نشت و گردیان خروجی

۱-۴-۱ مدل آزمایشگاهی شاهد

همانطور که در شکل ۱-۴ مشخص است مقدار پتانسیل از سمت بالادست به پایین دست روندی کاهشی دارد که این روند برای پیژومترهای پایین‌تر (ردیف ۵) تقریباً خطی است و برای ردیف‌های بالاتر روند تقریباً خطی آن تغییر می‌کند، به طوریکه برای دو ردیف نزدیک به سطح کاهش پتانسیل به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد که دلیل آن انحنای بیشتر خطوط جریان در نزدیک سطح می‌باشد و افت انرژی بیشتر را به دنبال دارد. به طوریکه با حرکت به سمت عمق از این انحناء کاسته می‌شود.



شکل ۱-۴ نمای روبروی پیژومتر های آزمایشگاهی

در مدل آزمایشگاهی، اندک اندک عمق جریان افزایش داده شد و به ازای برخی عمق های بالادست، مقادیر فشار برداشت شد که نهایتاً به ازای عمق بالادست ۵۴/۵ سانتی متر تخریب در زیر پی سد اتفاق افتاد(شکل ۲-۴).

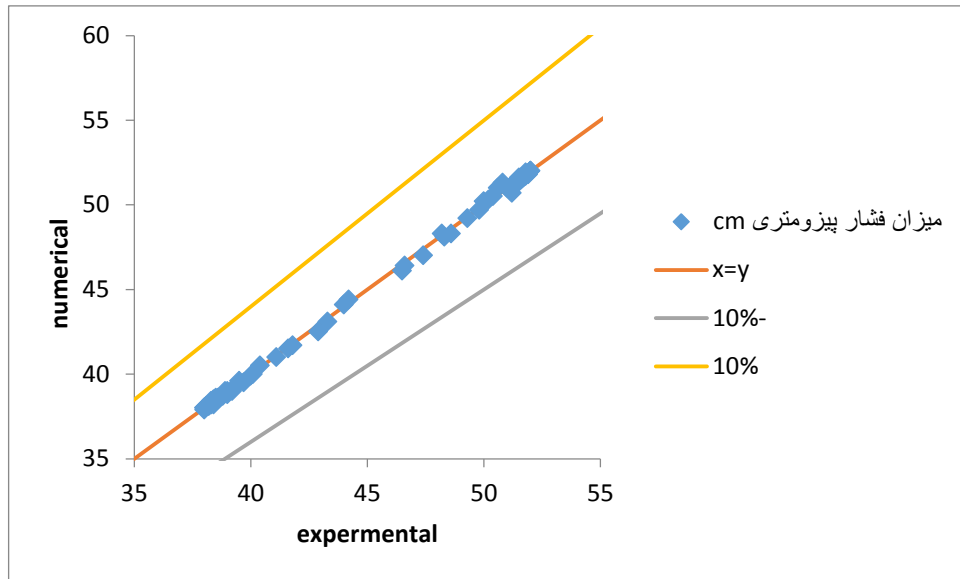


شکل ۲-۴ نمای بالا از تخریب پی بر اثر پدیده جوشش

۲-۱-۴ مدل عددی شاهد

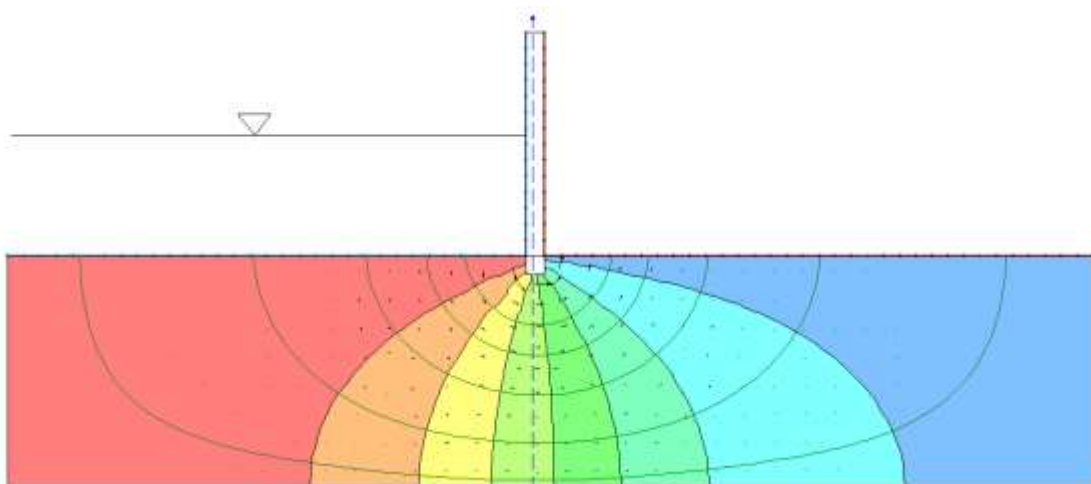
همچنین مدل شاهد به کمک مدل Seep/w شبیه سازی شد و مقادیر فشار پیژومتری برای پیژومترهای مختلف به ازای هدهای مختلف بالادست برداشت شد، به منظور ارزیابی دقت مدل این نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد که مدل عددی با دقت قابل قبولی، مقادیر فشار پیژومتری را شبیه سازی می کند به طوری که حداکثر خطای مدل سازی  $\pm 10\%$  می

باشد(شکل ۳-۴).



شکل ۴-۳ مقایسه فشار پیزومترى آزمایشگاهی و عددی

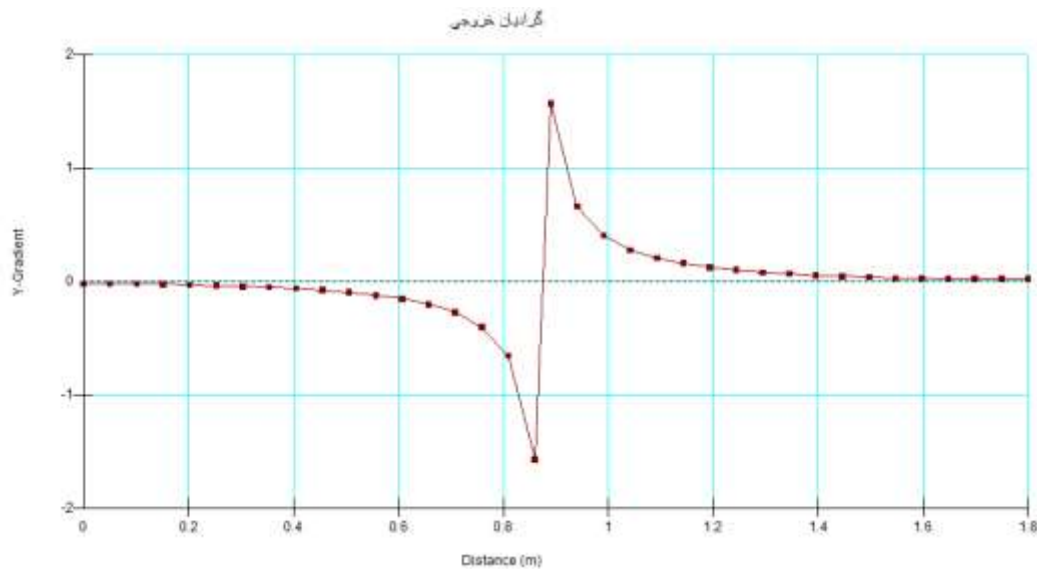
با توجه به شبیه سازی قابل قبولی، مدل عددی، با استفاده از مدل عددی اقدام به استخراج خطوط جریان و هم پتانسیل در زیر سد شد (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بدون حضور کف بند و پرده آب بند

همچنین گرادیان خروجی مدل عددی شاهد در شرایط بدون حضور کف بند و پرده آب بند مطابق شکل ۴-۵ از مدل عددی استخراج شد. همانطور که در شکل مشخص است به ازای هد بالادست

۵۴/۵ سانتی متر یعنی دقیقاً لحظه ی وقوع جوشش مقدار گرادیان خروجی تقریباً برابر ۱/۵ می باشد که در واقع، وقوع پدیده جوشش را تأیید می کند.



شکل ۴-۵ گرادیان خروجی عدم حضور کف بند پرده آب بند

همچنین میزان گرادیان بحرانی توسط تئوری لین برای داده های آزمایشگاهی محاسبه شد که برابر با ۲/۳۵۷ می باشد. در این شرایط، میزان خطای مدل عددی، حدود ۳۲٪ بود که دلیل آن، فرضیات مربوط به محاسبه ی  $\dot{I}$  در تئوری لین می باشد.

$$E_r = \left| \frac{1.6 - 2.357}{2.357} \right| * 100 = 32 \% \quad (1-4)$$

۳-۱-۴ مدل آزمایشگاهی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد

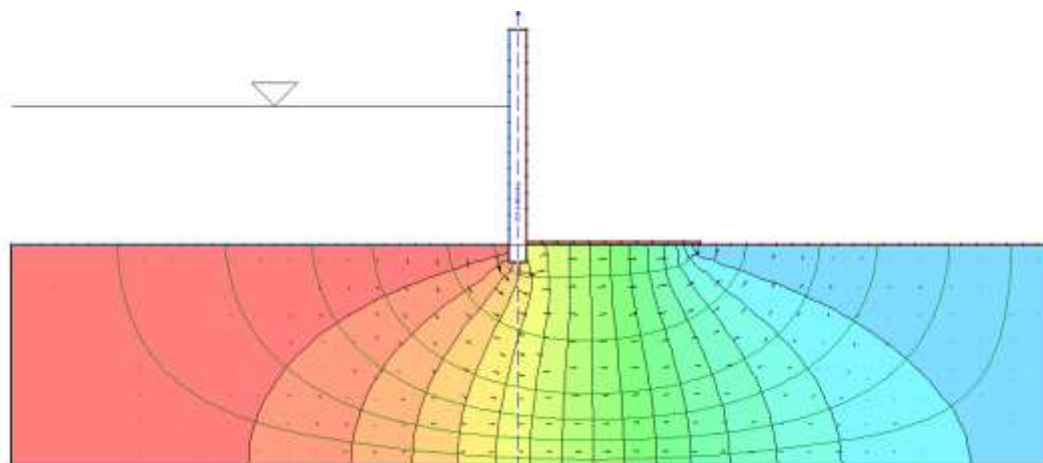
در نتیجه ی گرادیان خروجی، در این حالت با کاربرد کف بند در پایین دست سد، طول خط جریان افزایش می یابد و پدیده ی جوشش در هد ۷۰ سانتی متر برای بالادست اتفاق افتاد. (شکل ۴-۶)



شکل ۴-۶ نمای روبروی پیزومترهای ردیف اول در مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست جریان پیزومتر های نزدیک سطح (ردیف اول) را که در پی سد و زیر کف بند قرار دارند نشان می دهد. همان گونه که مشخص است، در قسمت بالادست سد مقدار پتانسیل با توجه به عمق جریان در قسمت بالادست بالا می باشد و با ورود جریان به داخل پی و حرکت آب در خاک، مقدار پتانسیل با توجه به افت جریان کاهش پیدا می کند.

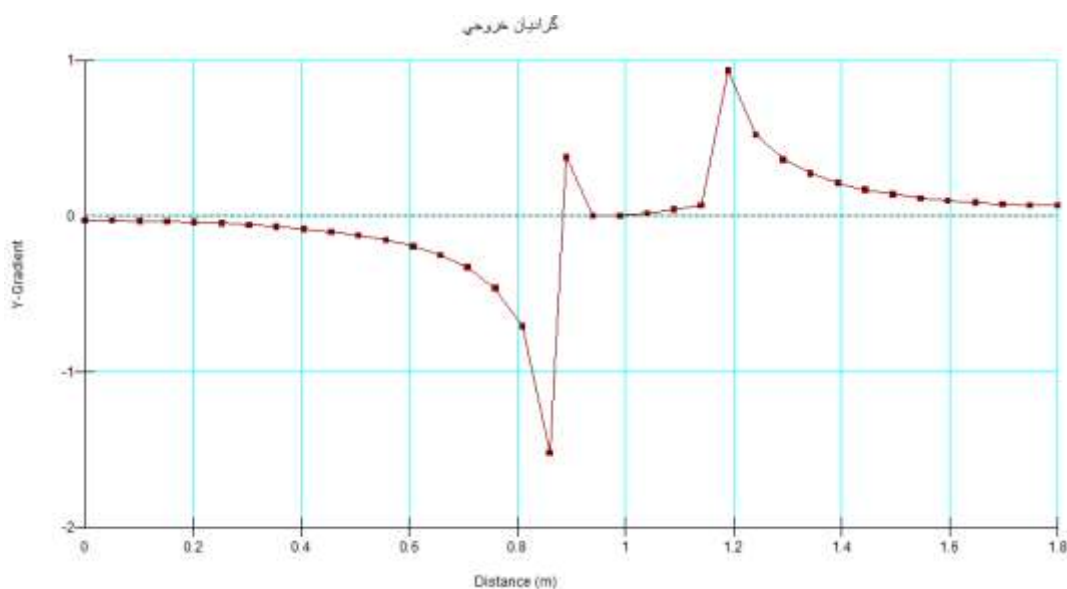
۴-۱-۴ مدل عددی حضور کف بند در پایین دست جریان با سد

در این حالت نیز، مدل آزمایشگاهی با مدل عددی شبیه سازی شد که با استفاده از نتایج شبیه سازی، خطوط جریان و پتانسیل در پی و زیر سد ترسیم شد که در روی شکل نیز، افزایش خط جریان مشهود است (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست

همچنین در شکل ۴-۸، تغییرات در داخل پی و در محل کف بند نشان می دهد که کاهش گرادیان در زیر کف بند و انتهای کف بند در قسمت خروجی نسبت به مدل شاهد مشخص است، به طوری که مقدار گرادیان خروجی در انتهای کف بند، حدود  $0/95$  بود.



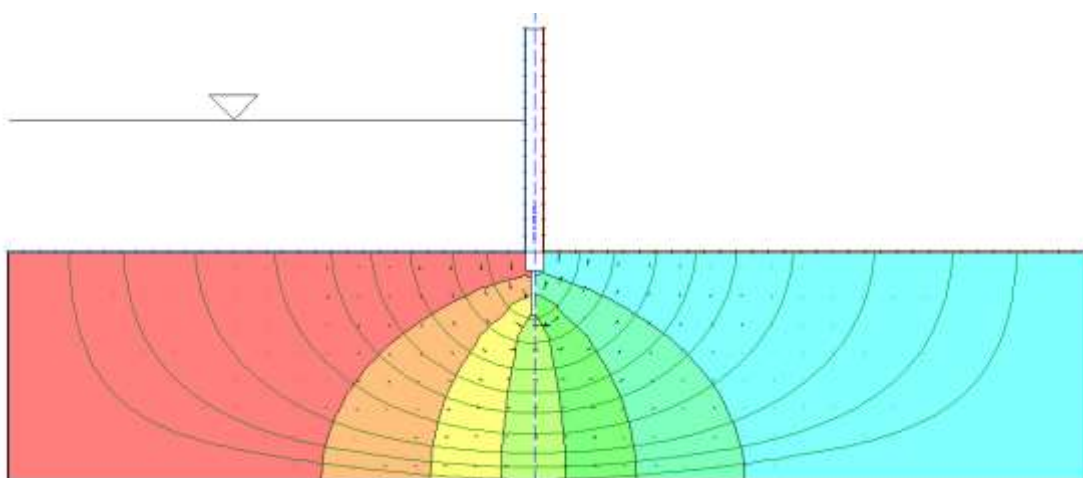
شکل ۴-۸ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست

در این حالت، میزان گرادیان خروجی در هد  $70$  برای بالادست برابر با  $0/850$  بود که این مقدار، با استفاده از تئوری لین برای داده های آزمایشگاهی برابر با  $1/882$  محاسبه شد.

$$E_r = \left| \frac{0.85 - 1.88}{1.88} \right| * 100 = 54 \%$$

۴-۱-۵ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور پرده آب بند در پی سد در این حالت پرده آب بند به عمق ۷/۵ سانتی متر در قسمت پی سد نصب شد، در این حالت نیز، با کاربرد پرده آب بند در این قسمت، طول خط نشت افزایش یافته و در نتیجه گرادیان هیدرولیکی را در قسمت پایین دست سد کاهش می دهد و بدین ترتیب از پدیده‌ی جوشش در عمق بالادست ۵۴/۵ سانتی متر (شاهد) جلوگیری می کند و در این حالت به ازای هد ماکزیمم بالادست ۷۵ سانتی متر جوشش مشاهده نشد.

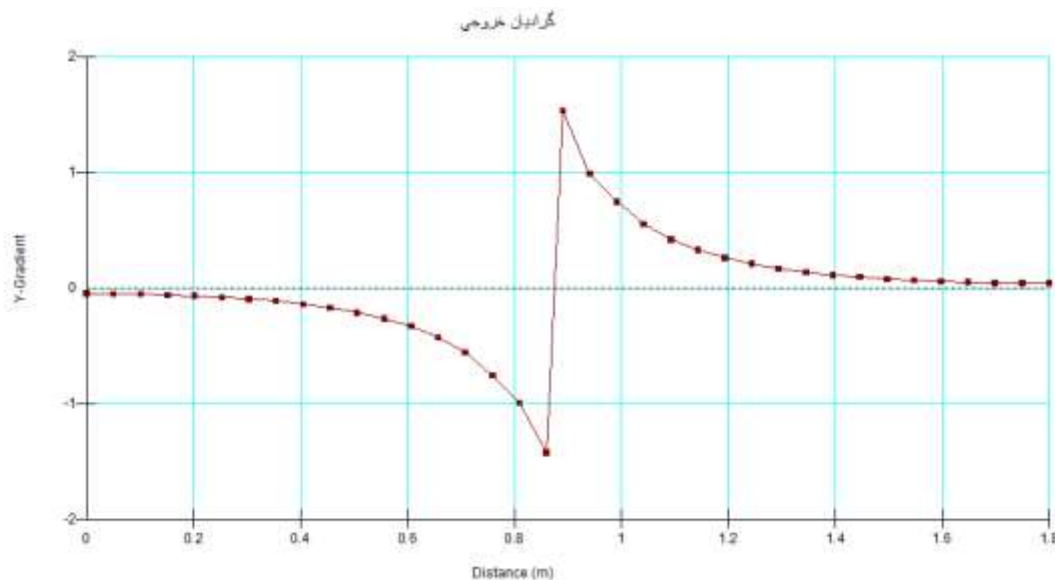
در این حالت نیز، با استفاده از مدل های عددی خطوط جریان و پتانسیل در زیر سد و اطراف پرده ی آب بند ترسیم شد. (شکل ۴-۱۰) که انحنای خطوط جریان در آن مشخص است. همان طور که در قسمت فوق مشاهده شد، نتایج این مدل نسبت به کف بند تنها بهتر بود که دلیل آن را، می توان انحنای بیشتر و شدیدتر خطوط جریان در مقایسه با کف بند تنها دانست (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور پرده آب بند



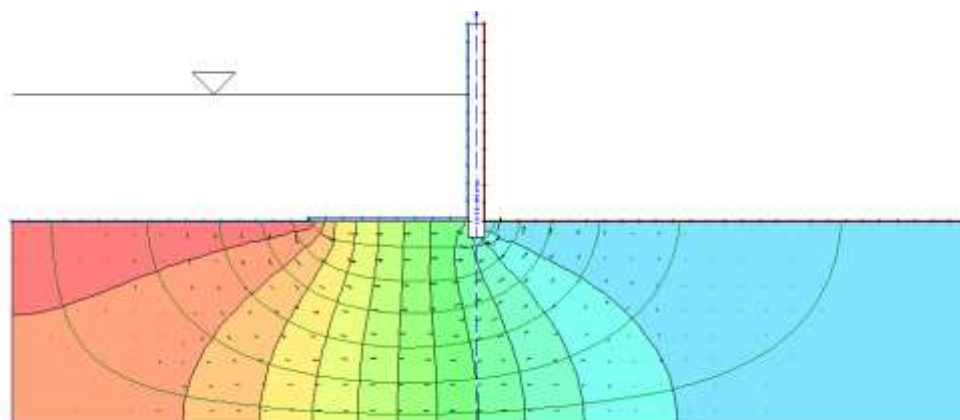
شکل ۴-۱۰ نیز تغییرات گرادیان خروجی این مدل را در هد ۷۵ سانتی متر نشان می دهد ، با مقدار گرادیان خروجی در هد ۵۴/۵ سانتی متر، برای مدل شاهد برابر است (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰ گرادیان خروجی با حضور پرده آب بند

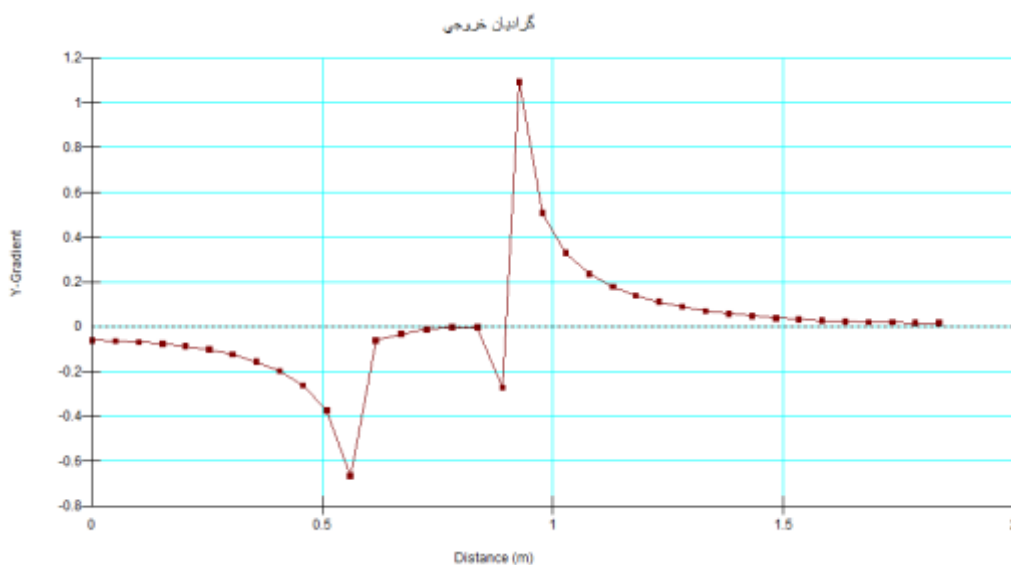
۴-۱-۶ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در بالا دست سد در این قسمت، هدف بررسی موقعیت کف بند در کنترل گرادیان خروجی و خط نشت می باشد. کاربرد کف بند در قسمت بالا دست سد، طول خط نشت را افزایش داد . نتیجه ی آن کاهش گرادیان هیدرولیکی در قسمت پایین دست سد است. به طوری که در این حالت، به ازای هد بالادست ۶۱ سانتی متر جوشش و تخریب اتفاق افتاد.

شکل(۴-۱۱) نیز، شبیه سازی خطوط جریان و پتانسیل راه، با حضور کف بند در بالادست نشان می دهد که طولانی شدن خط نشت در آن مشخص است.



شکل ۴-۱۱ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در بالا دست

تغییرات گرادیان خروجی در پی سد نیز، مطابق شکل ۴-۱۲ بود. در ابتدای کف بند گرادیان خروجی به دلیل حرکت آب به سمت پایین منفی است سپس در طول مسیر کف بند گرادیان خروجی صفر می‌شود و هنگامی که به پی سد می‌رسد میزان گرادیان خروجی دوباره منفی می‌شود و بعد از پی سد گرادیان خروجی یکباره زیاد می‌شود در حد ۶۱ سانتی متر به حدود ۱/۱ می‌رسد و همین امر سبب جوشش و تخریب در این هد می‌شود.



شکل ۴-۱۲ گرادیان خروجی با حضور کف بند در بالا دست

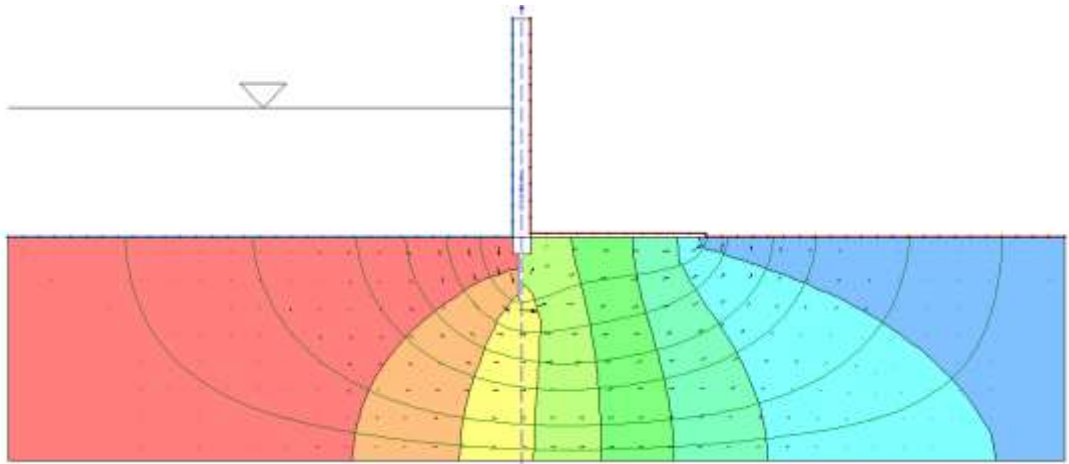
در این حالت، میزان گرادیان بحرانی در هد ۶۱ سانتی متر برای بالادست برابر با ۰/۹۵۳ می باشد که این مقدار، توسط تئوری لین برای داده های آزمایشگاهی برابر با ۱/۳۵۳ محاسبه شد. مقدار خطا در این حالت، ۲۹/۵۶ بود.

$$E_r = \left| \frac{.953-1.353}{1.353} \right| * 100 = 29.56\% \quad (2-4)$$

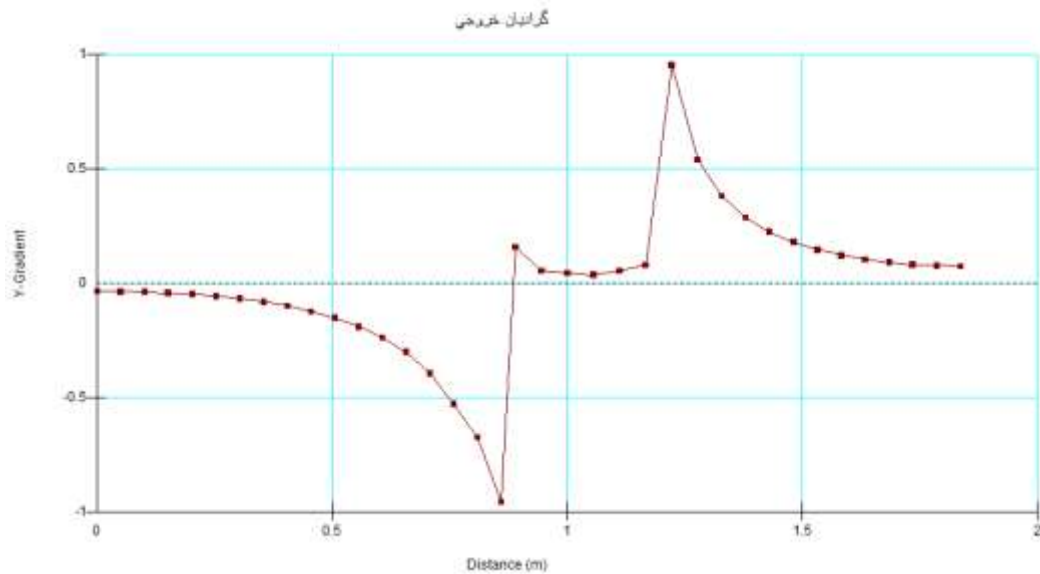
#### ۴-۱-۶-۱- مقایسه کف بند بالادست و پایین دست

مقایسه ی نتایج مربوط به کف بالادست و کف پایین دست نشان می دهد که کاربرد کف بند در پایین دست، تأثیر بیشتری در کنترل خط نشت دارد. به طوری که برای مدل کف بند در بالادست میزان گرادیان بحرانی در هد ۶۱ سانتی متر (لحظه وقوع جوشش) برابر با ۰/۹۵۳ بود و برای مدل کف بند در پایین دست میزان گرادیان بحرانی در هد ۷۰ سانتی متر (لحظه وقوع جوشش) برابر با ۰/۸۵۰ بود. به همین دلیل، در ادامه ی آزمایشات، کف بند را در پایین دست در نظر گرفته و موقعیت پرده آب بند را در قسمت های مختلف مورد بررسی قرار دادیم.

۴-۱-۷ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد در این حالت، طول کف بند مورد استفاده، ۳۰ سانتی متر و عمق پرده ی آب بند ۷/۵ سانتی متر بود. در این شرایط، با توجه به افزایش خط نشت، گرادیان خروجی کاهش یافت به طوریکه به ازای هد ماکزیمم بالادست ۷۵ سانتی متر جوشش مشاهده نشد. برای این مدل نیز، نتایج مدل عددی، صحت نتایج فوق را تأیید می کند. ( شکل ۴-۱۳) همان طور که در شکل ۴-۱۴ مشخص است، افزایش خط نشت در انتهای کف بند، مقدار آن به ازای عمق ۷۵ سانتی متر به حدود ۰/۹ رسید.



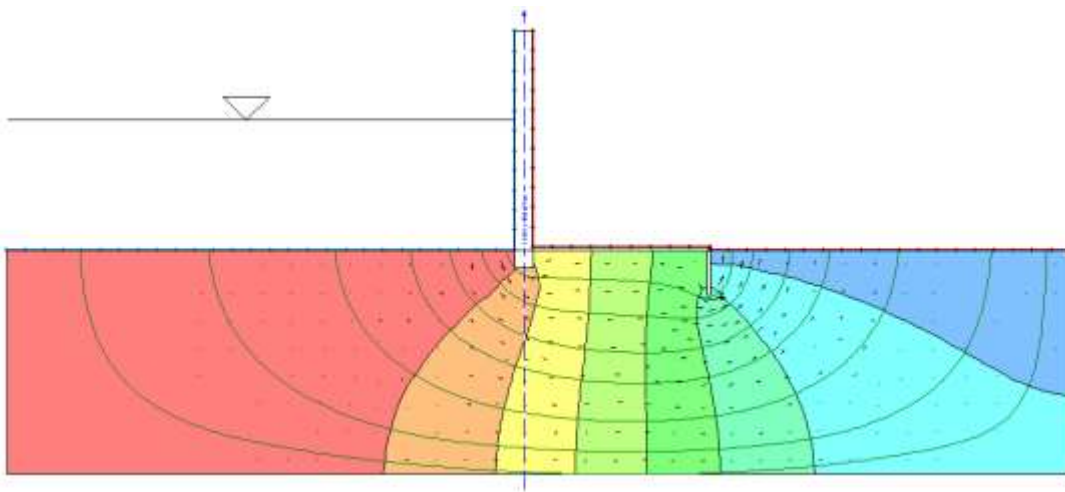
شکل ۴-۱۳ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست مطابق شکل ۴-۱۴ می باشد. با رسیدن جریان آب به پی سد و پرده آب بند مقدار گرادیان خروجی با توجه به مسیر حرکت آب منفی می شود و در انتهای کف بند مقدار آن در عمق ۷۵ سانتی متر به حدود ۰/۹ می رسد.



شکل ۴-۱۴ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست

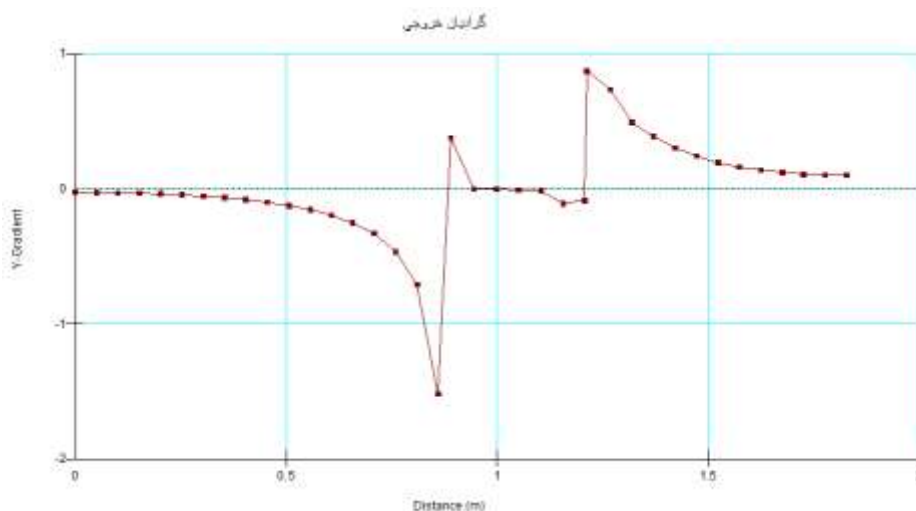
میزان گرادیان بحرانی در هد ۷۵ سانتی متر برای بالادست برابر با ۰/۸۶۶ می باشد. به طوری که مقدار آن، با تئوری لین برای داده های آزمایشگاهی برابر با ۱/۱۵۶ شد.

۸-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پایین دست در این حالت نیز می توان در واقع، تأیید موقعیت پرده ی آب بند را در کنترل خط نشت، مورد بررسی قرار داد و کاربرد پرده ی آب بند را در قسمت پایین و راست طول خط جریان افزایش داد که کاهش گرادیان خروجی نیز، نتیجه ی آن است. ( شکل ۴-۱۵) مشابه حالت استفاده از کف، در بالا دست پدیده ی جوشش به ازای هد ۷۵ سانتی متر مشاهده نشد. گرادیان خروجی در انتهای سد به حدود ۰/۹ رسید. ( شکل ۴-۱۵)



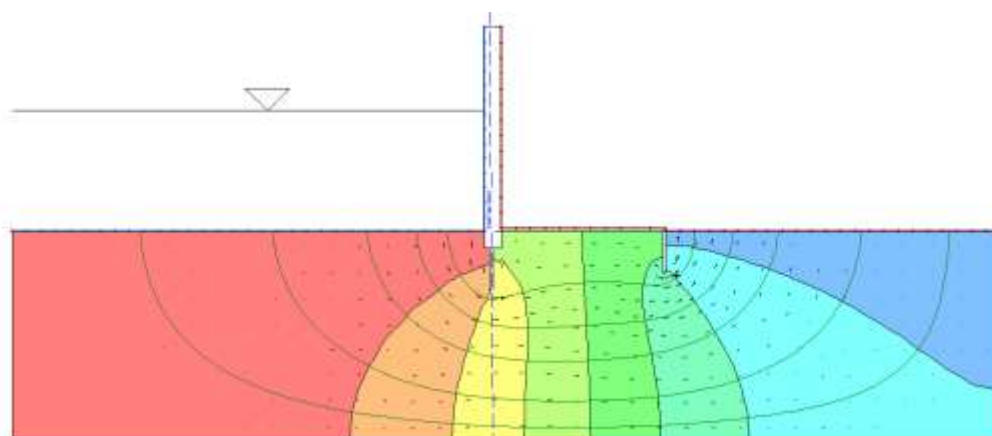
شکل ۴-۱۵ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پایین دست

در این مدل، در مقایسه با مدل قبلی که به ازای هد ۷۵ سانتی متر، میزان گرادیان بحرانی ۰/۸۶۶ بود، گرادیان هیدرولیکی بحرانی به ۰/۹۴۱ رسید. برای همین، می توان کاربرد کف بند در بالا دست را مؤثر دانست.



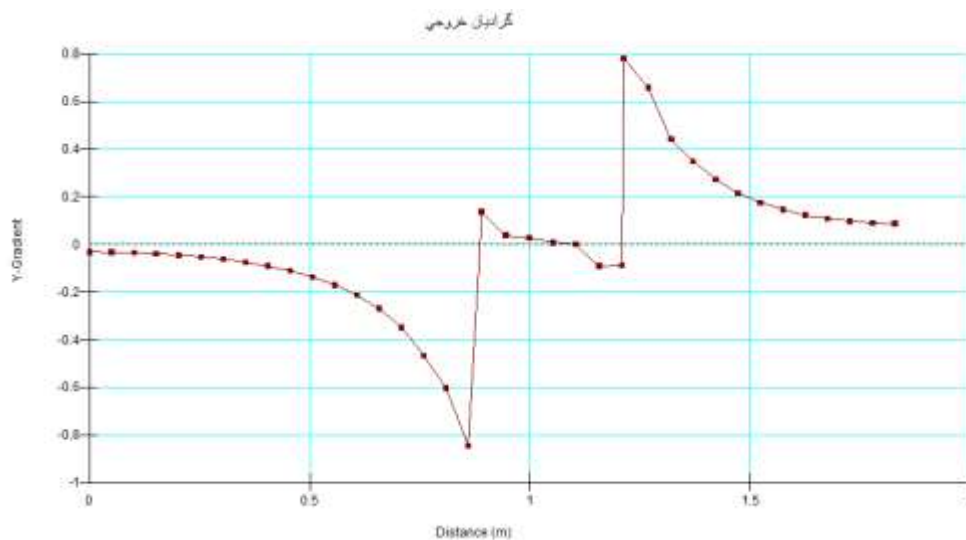
شکل ۴-۱۶ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در پایین دست  
 ۹-۱-۴ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در  
 پایین دست و پی سد

بررسی نتایج این مدل و مقایسه ی آن با سایر مدل ها، نشان می دهد که مدل حاضر، بهترین مدل جهت کنترل خط نشت و گرادیان جدولی می باشد که عامل اصلی آن، افزایش طول خط جریان می باشد. ( شکل ۴-۱۷)



شکل ۴-۱۷ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست و پایین دست

بررسی تغییرات گرادیان خروجی در مدل حاضر نیز نشان می دهد که به ازای هد ۷۵ سانتی متر گرادیان خروجی ۰/۷۶۳ بود. تئوری لین نیز، مقدار گرادیان بحرانی را برای داده های آزمایشگاهی برابر ۰/۷۸۷ محاسبه کرد (شکل ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸ گرادیان خروجی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آببند در بالادست و پایین دست

#### ۲-۴- گرادیان خروجی

گرادیان خروجی در مدل های مختلف در هد ۵۲ سانتی متر مورد بررسی قرار گرفت و این نتایج در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۱-۴ مقادیر گرادیان خروجی برای مدل های مختلف در هد ۵۲ سانتی متر برای بالادست  
مشخصات

گرادیان خروجی	پرده آب بند پایین دست	پرده آب بند بالادست	کف بند پایین دست	کف بند بالادست
	cm	cm	cm	Cm
۱/۱۴	-	-	-	-
۰/۵۸۸	-	-	-	۳۰
۰/۳۷۱	-	-	۳۰	-
۰/۴۷۲	-	۷/۵	-	-
۰/۳۲۷	-	۷/۵	۳۰	-
۰/۳۵۳	۷/۵	-	۳۰	-
۰/۳۰۷	۷/۵	۷/۵	۳۰	-

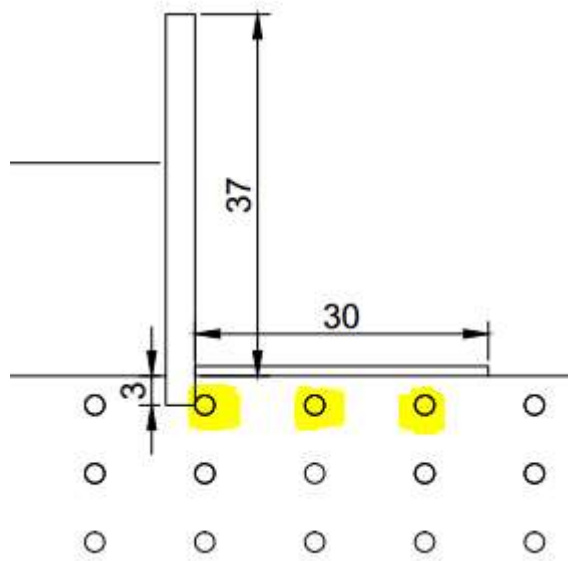
#### ۳-۴- بررسی نیروی زیر فشار

در بخش نیروی زیر فشار برای مدل های مختلف به ازای هدهای بالادست متفاوت تا قبل از وقوع پدیده جوشش محاسبه شد.

#### ۳-۴-۱ مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد

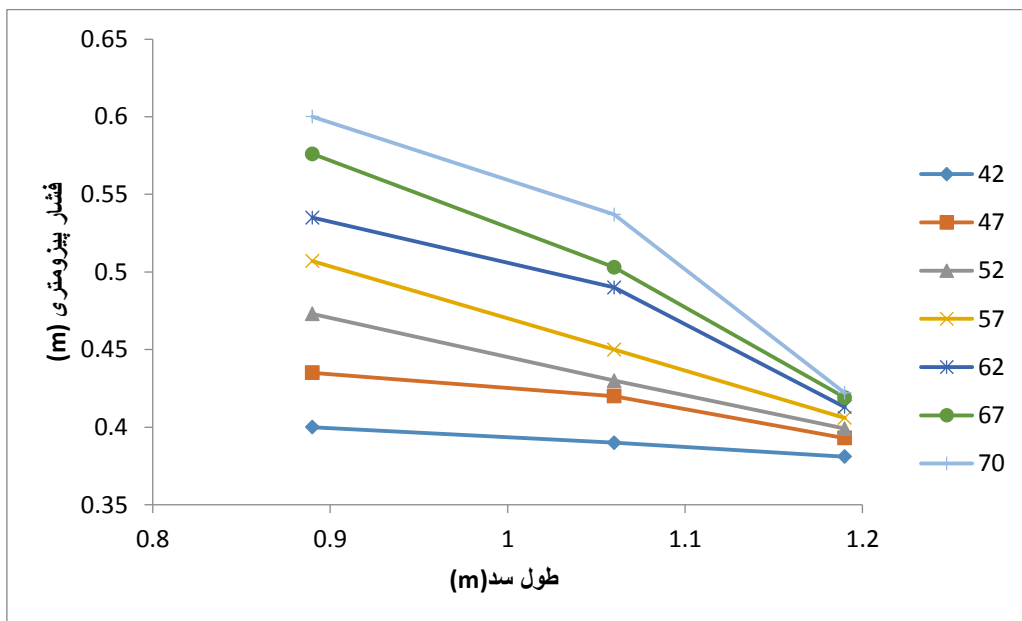
در این قسمت ۳ پیزومتر بحرانی یعنی پیزومترهای ۸، ۹ و ۱۰ در ردیف اول که در زیر کف بند قرار دارند جهت محاسبه ی میزان نیروی زیر فشار قرائت شد و میزان فشار پیزومتری در هر هد برای هر ۳ پیزومتر بدست آمد (شکل ۴-۱۹).





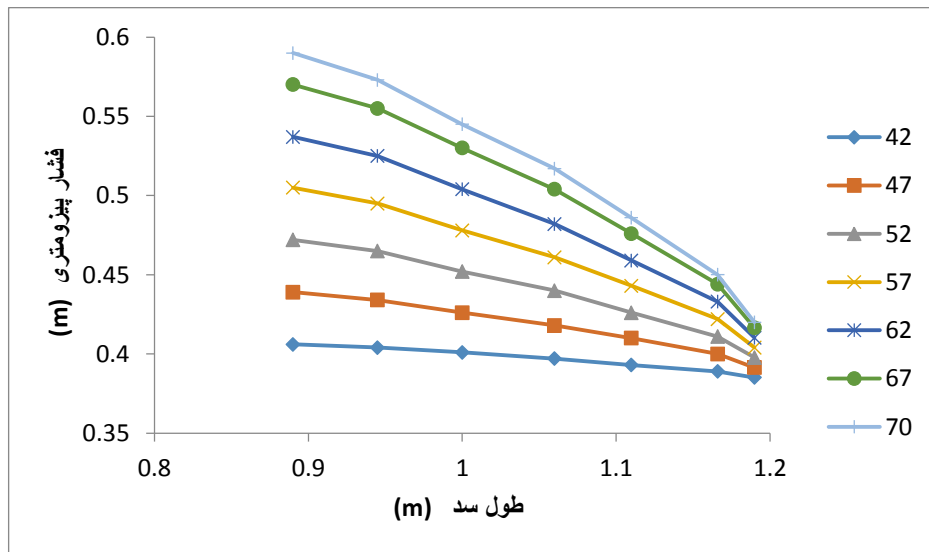
شکل ۴-۱۹ نمای مدل آزمایشگاهی بدون حضور کف بند و پرده آب بند

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش هد در بالادست مقدار فشار پیزومتری زیاد شده در نتیجه مقدار نیروی زیر فشار هم زیاد می شود (شکل ۴-۲۰).

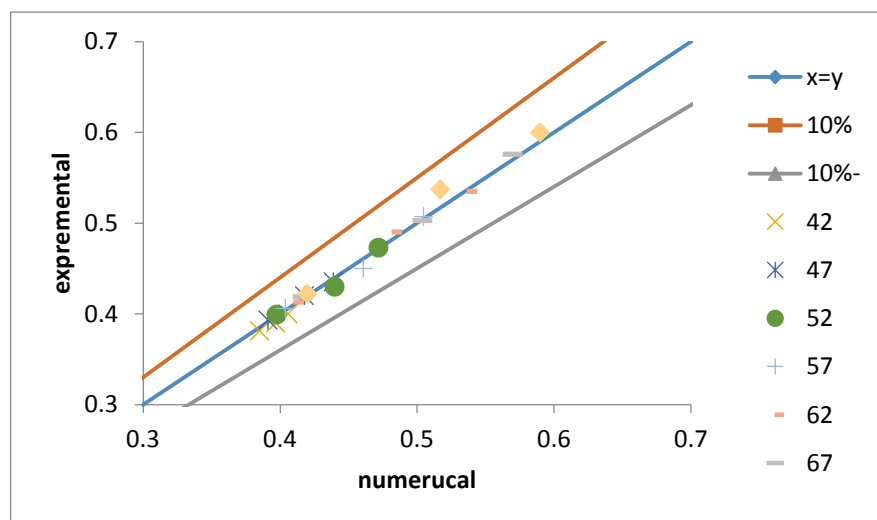


شکل ۴-۲۰ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف در مدل آزمایشگاهی

مقادیر فشار در پیژومترهای ۸، ۹ و ۱۰ با استفاده از مدل های عددی استخراج شد که مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد با محاسبه مساحت زیر منحنی مربوط به هد ۷۰ سانتی- مترمقدار نیروی زیر فشار ۰/۱۵۶ به دست آمد. (شکل ۴-۲۱). به طوری که خطای مدل آزمایشگاهی و مدل های عددی خطایی کوچکتر از  $\pm 10\%$  را نشان داد (شکل ۴-۲۲).

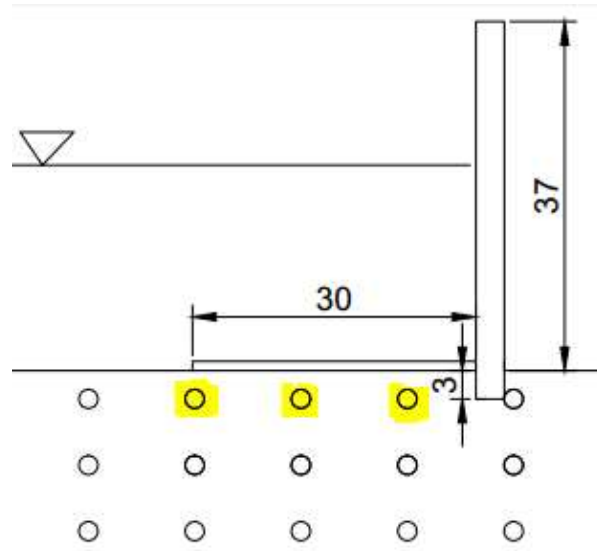


شکل ۴-۲۲ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف در مدل عددی

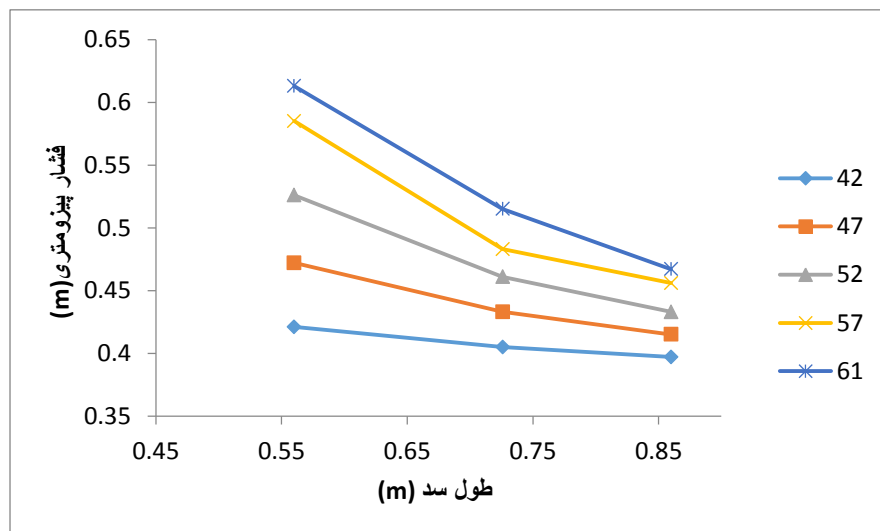


شکل ۴-۲۳ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی

۲-۳-۴- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در بالا دست سد  
 در این مدل نیز، مقادیر فشار پیزومترها در زیر کف بند بالادست، به ازای هدهای مختلف بررسی شد (شکل ۴-۲۴).

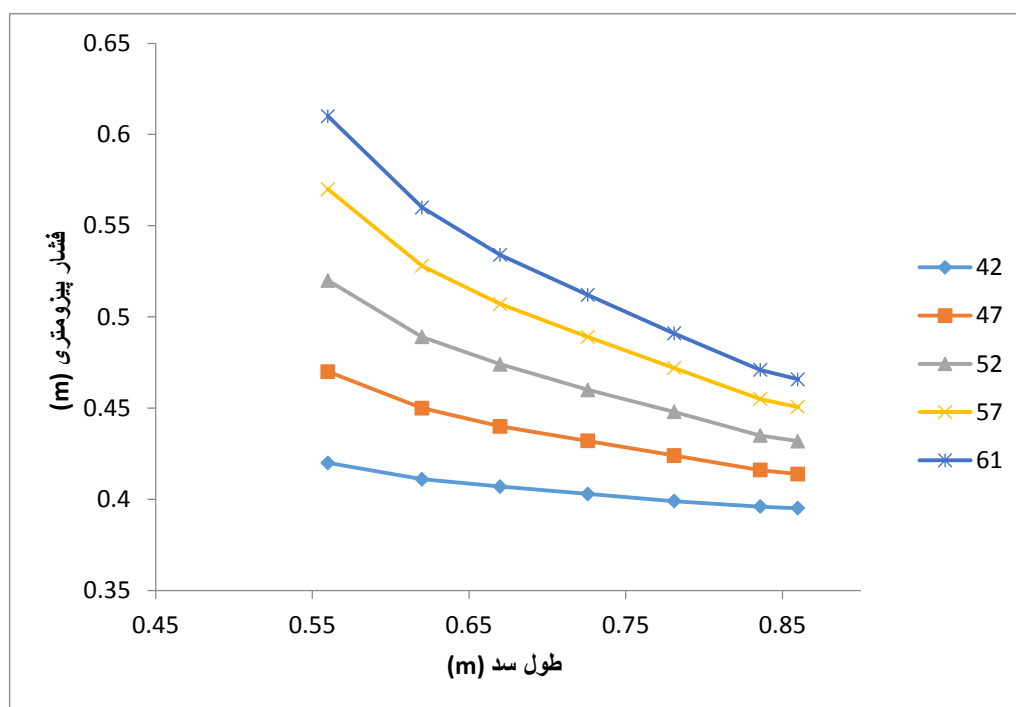


شکل ۴-۲۴ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در بالادست  
 بررسی نشان داد که با افزایش هد بالادست، مقدار فشار پیزومترهای زیر کف افزایش یافت (شکل ۴-۲۵).



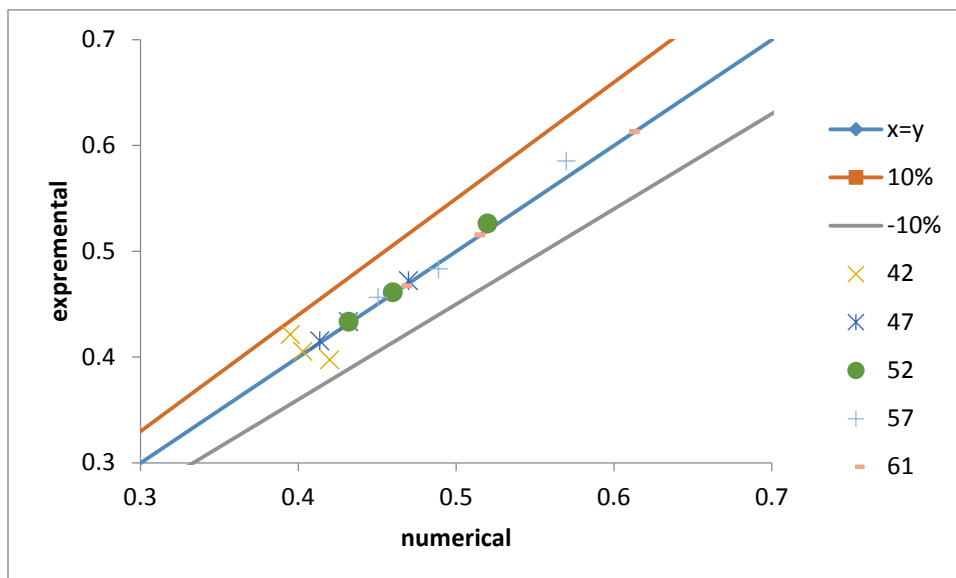
شکل ۴-۲۵ میزان نیروی زیر فشار آزمایشگاهی در هد های مختلف

همچنین مقادیر فشار پیژومترها با استفاده از مدل عددی به ازای هدهای مختلف بالادست شبیه سازی شد که به ازای هد بالادست ۶۱ سانتی متر، مقدار نیروی زیر فشار (مساحت زیر نمودار) ۰/۸۵۷ به دست آمد که با مقدار نیروی زیر فشار برای مدل با کف بند پایین دست به ازای ۷۰ سانتی-متر برابر بود که این امر، عملکرد بهتر مدل با کف بند پایین دست را نشان می دهد (شکل ۴-۲۶).



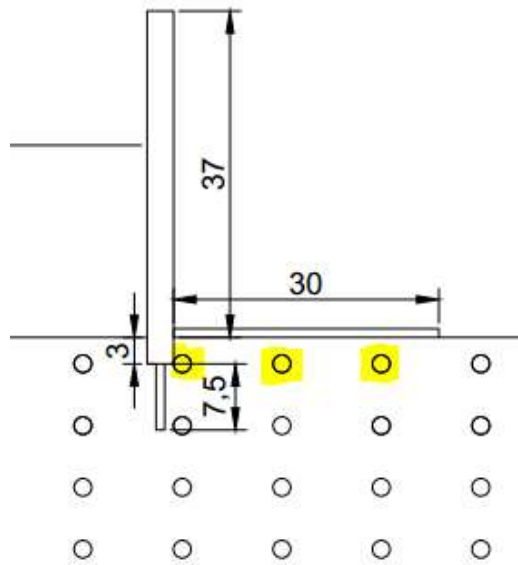
شکل ۴-۲۶ میزان نیروی زیر فشار عددی در هد های مختلف

با توجه به مطالب فوق در سایر آزمایشات، از کف بند در پایین دست استفاده شد. در این حالت نیز، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، تطابق خوبی را نشان داد (شکل ۴-۲۷).

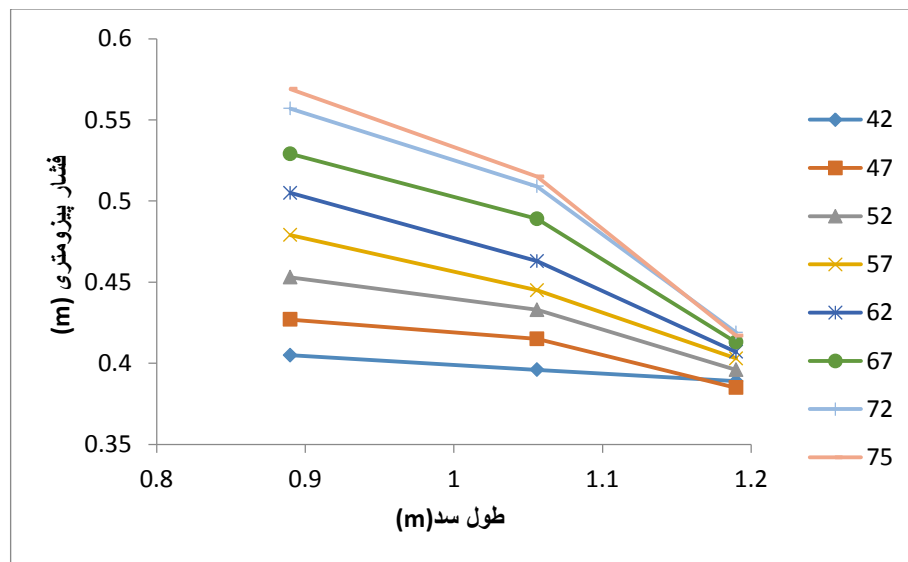


شکل ۴-۲۱ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی

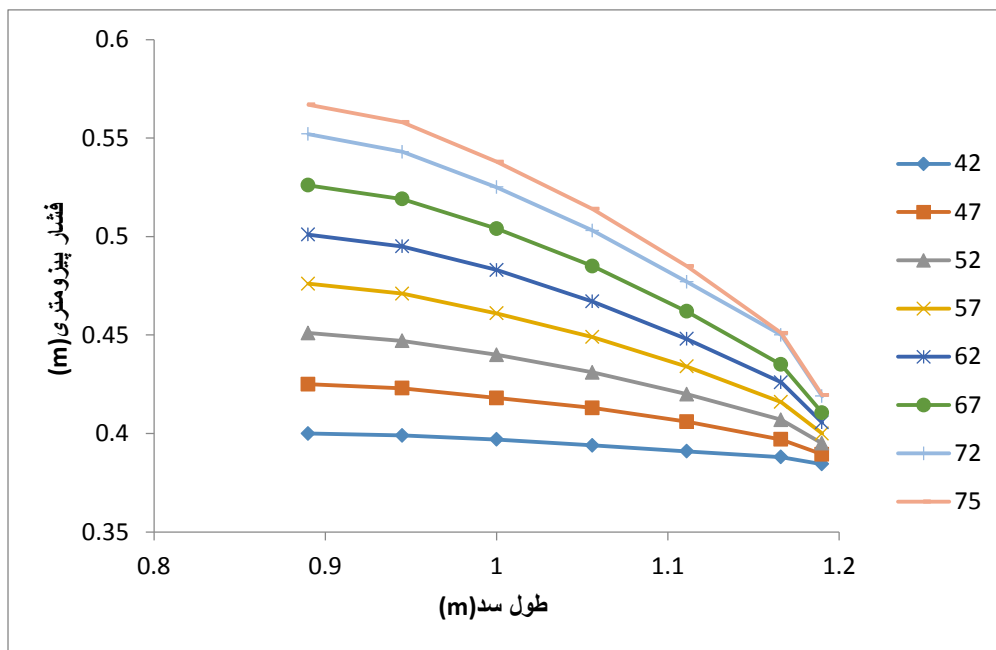
۳-۳-۴- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پی سد بررسی فشار پیزومترهای ۸، ۹ و ۱۰ مشخص شده در شکل ۴-۲۸ برای مدل حاضر نیز، صورت گرفت افزایش فشار پیزومترها با افزایش هد بالادست اتفاق افتاد.



شکل ۴-۲۸ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پی سد مقادیر فشار پیزومتری در این مدل نیز، با استفاده از مدل عددی شبیه سازی شد که از بین هد بالادست ۷۵ سانتی متر نیروی زیر فشار ۰/۱۵۴ محاسبه شد. که بین مقدار نسبت نیروی زیر فشار به ازای هد بالادست ۴۲ سانتی متر به میزان ۰/۷۶/۶ افزایش نشان داد (شکل ۴-۲۹).



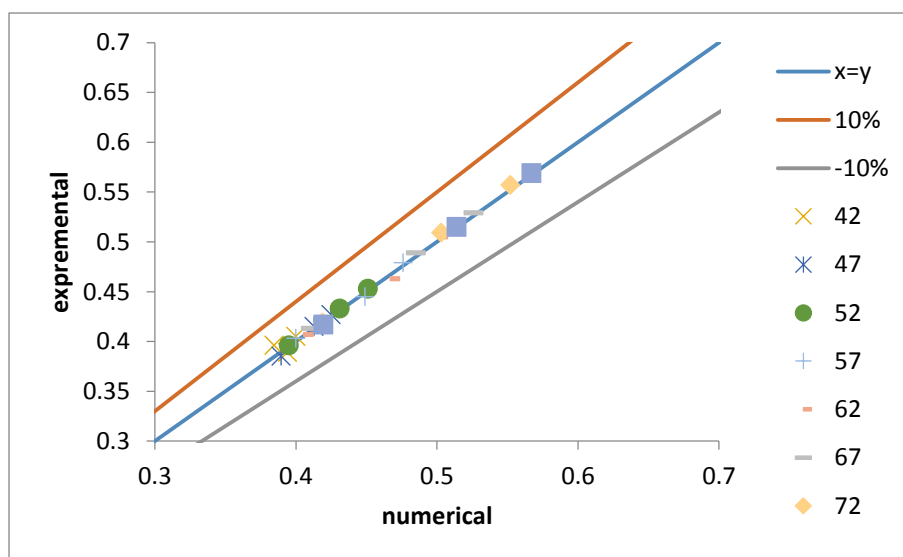
شکل ۴-۲۹ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف آزمایشگاهی



شکل ۳۰-۴ تغییرات فشار در مدل عددی به ازای هد های مختلف

دقت مدل های عددی در این مدل بسیار بالا بود. به طوری که میزان خطای آن، کوچکتر از  $\pm 0.5\%$  بود

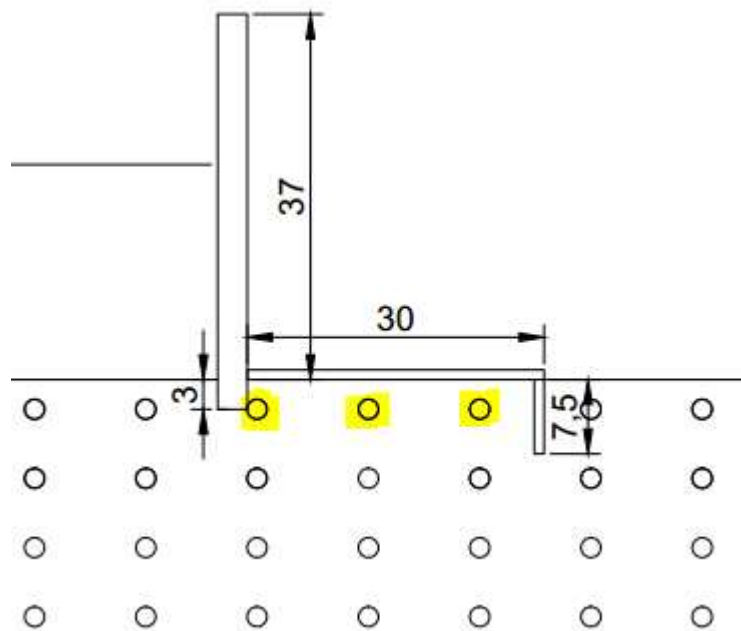
(شکل ۳۱-۴).



شکل ۳۱-۴ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی

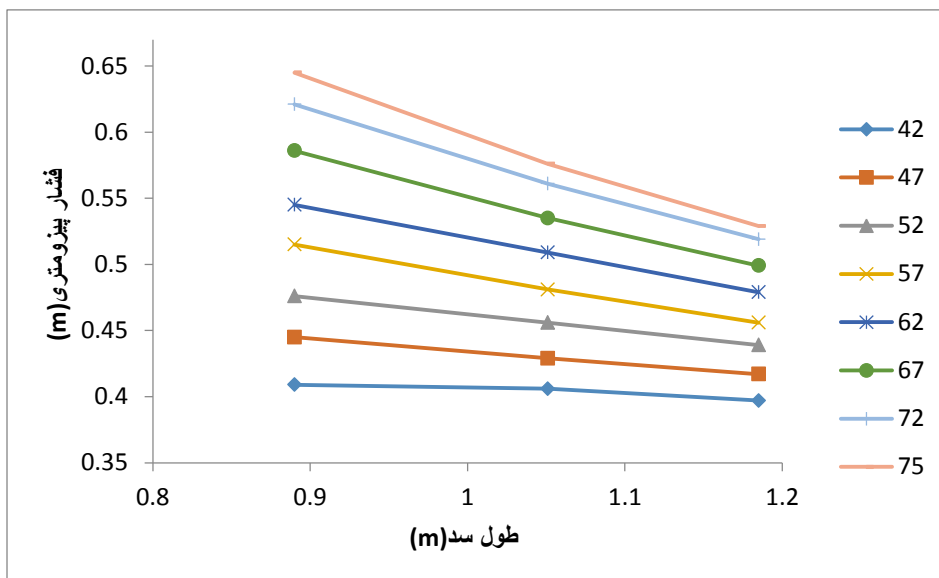
همچنین، مقایسهٔ این مدل با مدل کف بند تنها، عملکرد مناسب و قابل قبول پرده ی آب بند در پی سد را در کاهش نیروی زیر فشار نشان می دهد.

۴-۳-۴- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست در این بخش، نتایج مربوط به مدل کف بندها به همراه پرده ی آب بند در انتها (شکل ۴-۳۲) ارائه می شود. تغییرات فشار پیزومترهای ۸، ۹ و ۱۰ به ازای هدهای مختلف بالادست بررسی شد که نتایج آن در شکل ۴-۳۳ ارائه شده است. همان طور که از شکل پیداست، افزایش هد آب بالادست، افزایش فشار پیزومتری را به دنبال دارد که از مقدار آن، به ازای یک هد بالادست ثابت به سمت پایین دست کاسته می شود.



شکل ۴-۳۱ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند و پرده آب بند در پایین دست

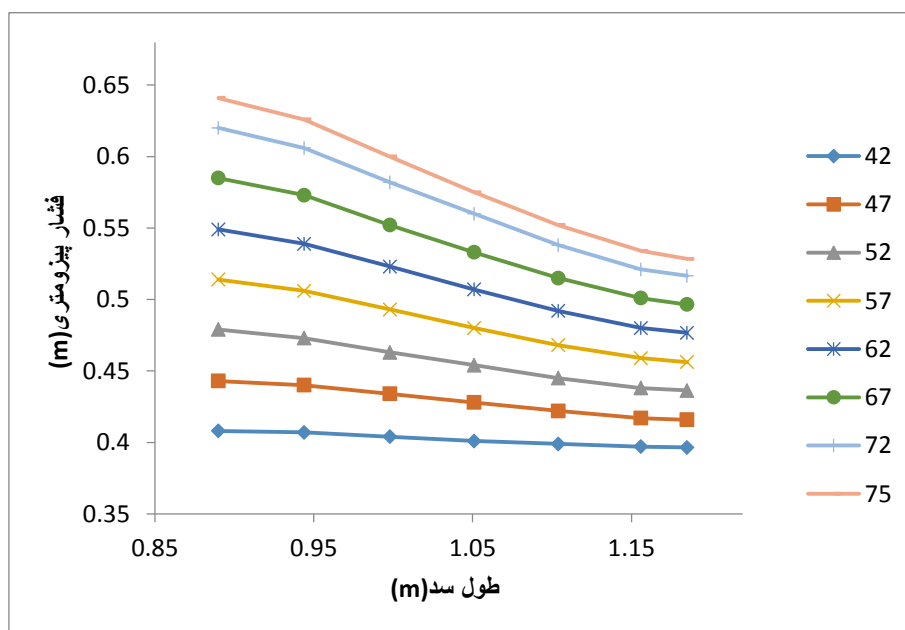




شکل ۴-۳۲ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف

شبه سازی به کمک مدل عددی، صحت نتایج فوق را تصدیق کرد که نتایج آن در شکل ۴-۳۳ نشان داده شده است.

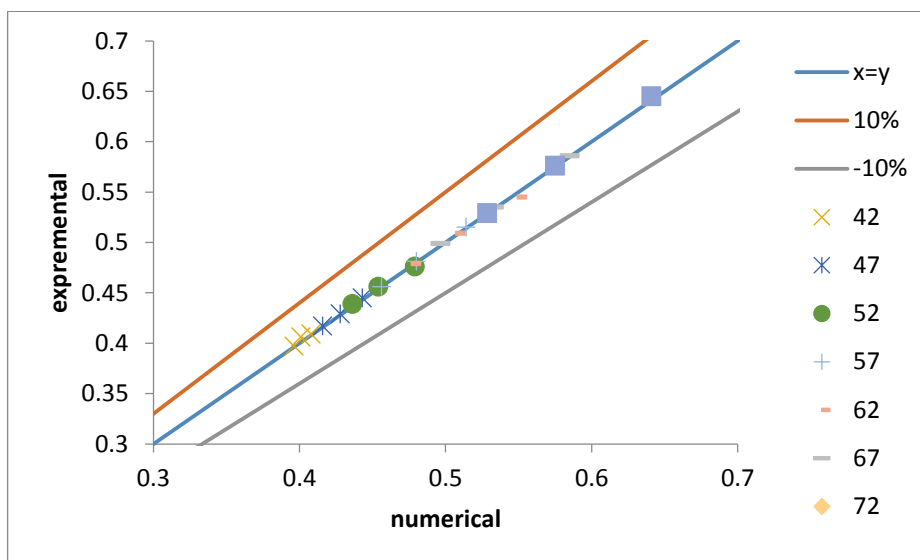
از داده های شکل می توان استنباط کرد نیروی زیرفشار برای هد ۷۵ سانتی متر برابر ۰/۱۷۲ می باشد که نسبت به هد ۴۲ سانتی متر به میزان ۶۸/۶٪ افزایش فشار داشت.



شکل ۴-۳۳ تغییرات فشار به ازای هد های مختلف

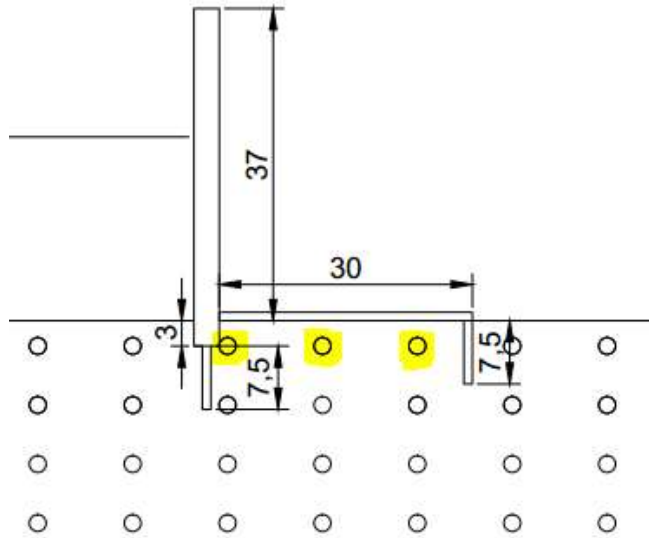
مقایسه‌این مدل با مدل پرده ی آب بند در انتها نشان می دهد که میزان افت نیروی زیر فشار در این مدل، نسبت به مدل پرده ی آب بند انتها کمتر است که علت آن، طول کمتر مسیر جریان تا رسیدن به زیر کف بند در این مدل نسبت به مدل با پرده ی آب بند انتها می باشد.

دقت مدل عددی در این حالت نیز، بسیار بالا بود به طوری که اکثر داده های حاصل از مدل عددی با داده های آزمایشگاهی مطابقت داشتند (شکل ۴-۳۴).

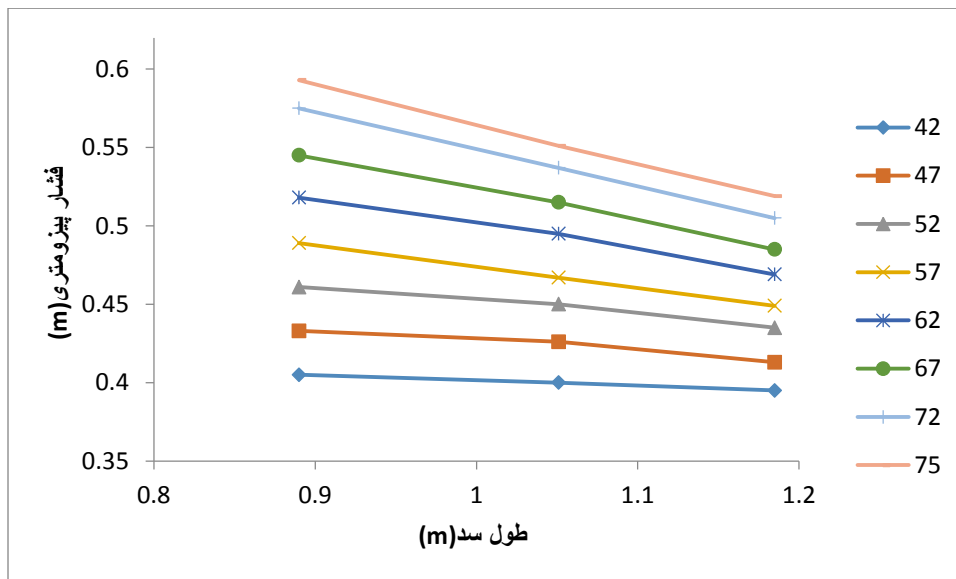


شکل ۴-۳۴ مقایسه داده های آزمایشگاهی و عددی

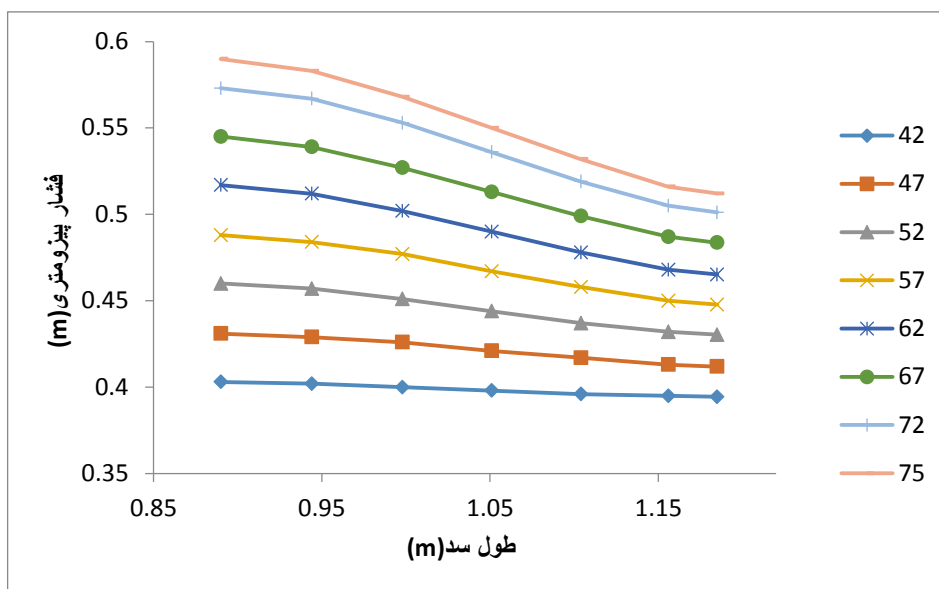
۴-۳-۵- مدل آزمایشگاهی جریان با حضور کف بند در پایین دست سد و پرده آب بند در پایین دست و پی سد در این بخش، نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به مدل کف بند با پرده ی آب بند پایین دست پی (شکل ۴-۳۵) ارائه می شود.



شکل ۴-۳۵ نمای مدل آزمایشگاهی با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در بالادست و پایین دست تغییرات فشار پیزومتری به ازای هدهای مختلف در شکل ۴-۳۶ ارائه شده است که افزایش هد، افزایش فشار را به دنبال داشت.

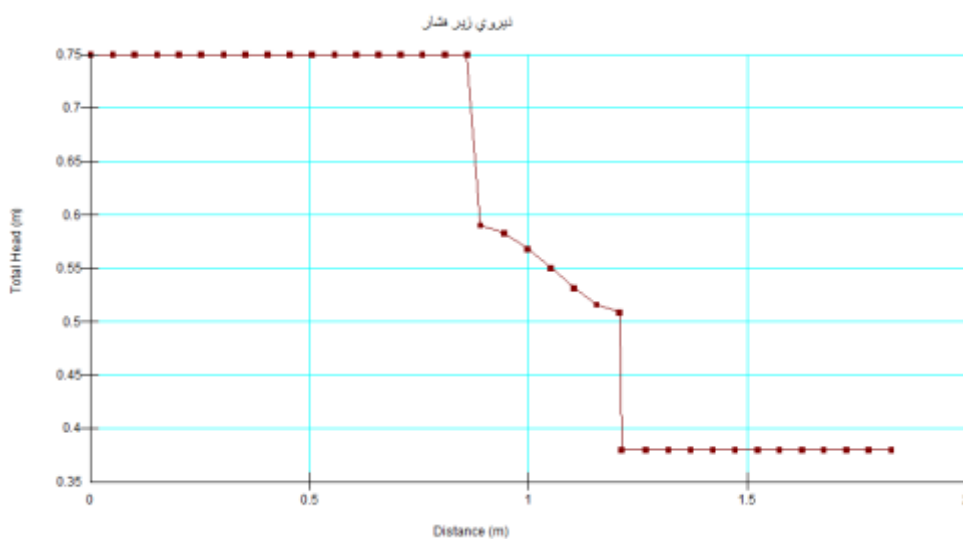


شکل ۴-۳۶ تغییرات فشار پیزومتری به ازای هدهای مختلف در مدل عددی نیز، همین روند برای تغییرات فشار پیزومتری به ازای هدهای مختلف نشان داده شده است (شکل ۴-۳۷).



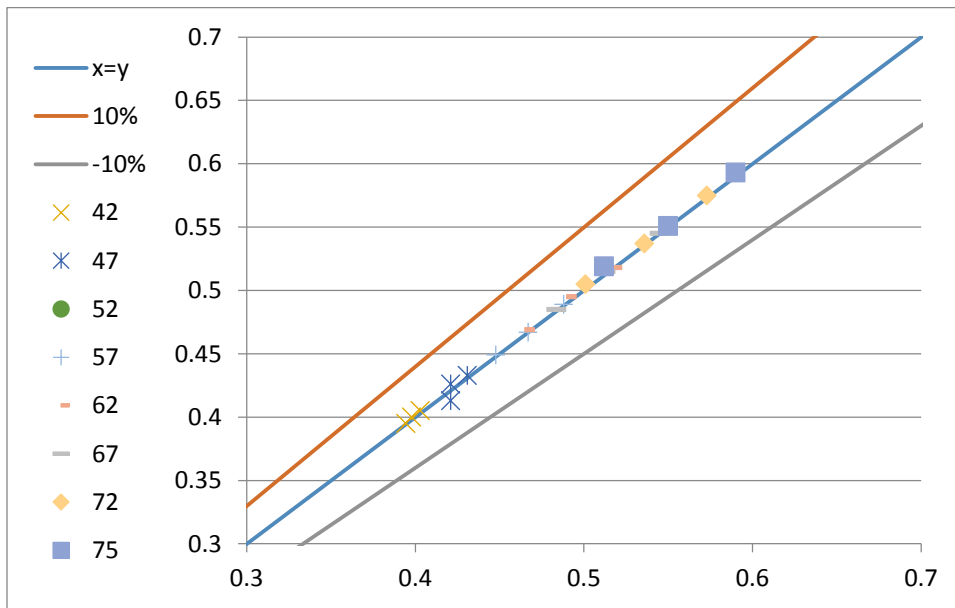
شکل ۴-۳۷ میزان نیروی زیر فشار در هد های مختلف

تغییرات فشار در طول پی به ازای هد بالادست ۷۵ سانتی متر در شکل ۴-۳۸ ارائه شده است. در پی سد یعنی دقیقاً همانجایی که پرده آب بند وجود دارد افت فشار افزایش یافته، در طول کف بند نیز این افت به میزان کمی ادامه دارد تا جایی که جریان به پرده آب بند دوم در انتهای سد می‌رسد به طوری که افت زیاد فشار در این نقطه اتفاق افتاد. همان طور که در شکل مشخص است روند تغییرات نیروی زیر فشار در زیر کف بند، غیر خطی می باشد.



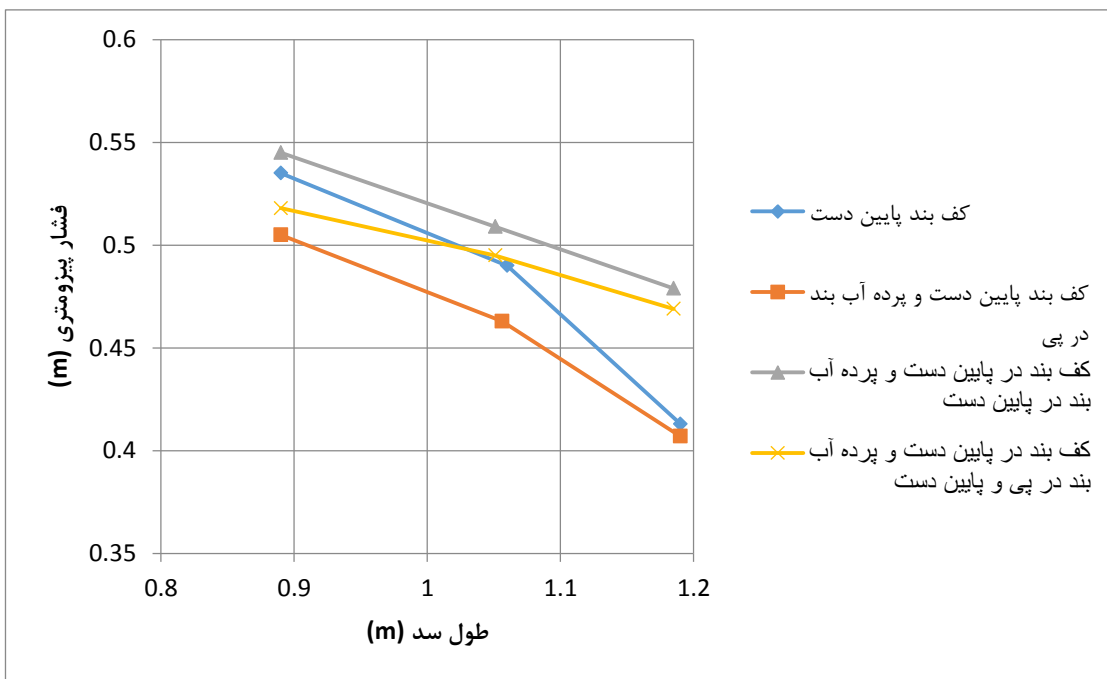
شکل ۴-۳۸ زیر فشار با حضور کف بند در پایین دست و پرده آب بند در بالادست و پایین دست

شکل ۴-۳۹ نیز، دقت بالای مدل درونی و نتایج آن را در شبیه سازی نشان می دهد.

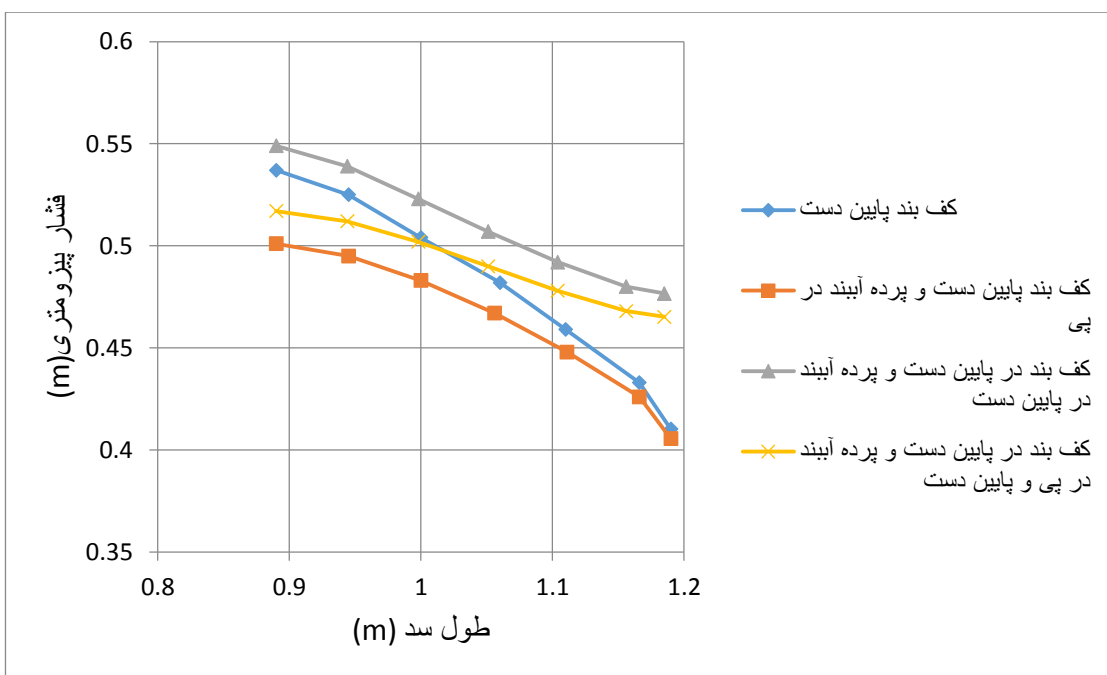


شکل ۴-۳۹ بررسی داده های آزمایشگاهی و عددی

شکل ۴-۴۰ تا ۴-۴۱ نتایج مربوط به تغییرات فشار را برای پیژومترهای ۸، ۹ و ۱۰ به ازای یک هد ثابت برای مدل های مختلف نشان می دهد که در واقع، بیانگر عملکرد مدل های عددی و آزمایشگاهی می باشد. که همان طور که قبلاً اشاره شد در شکل مشخص است مدل کف بند به همراه دو پرده ی آب بند، بهترین عملکرد را داشت.



شکل ۴-۴۰ میزان نیروی زیر فشار آزمایشگاهی ۴ مدل در هد یکسان



شکل ۴-۴۱ میزان نیروی زیر فشار عددی ۴ مدل در هد یکسان

شکل های ۴-۴۰ و ۴-۴۱ نشان می‌دهد برای مدلی که پرده آب بند در پایین دست قرار دارد وجود پرده آب بند مانع از این می‌شود که افت پتانسیل به مقدار قابل توجهی اتفاق بیفتد چرا که در این شرایط انحنای خط جریان عبوری از نزدیک کف بند و پرده آب بند زیاد نیست بدین ترتیب مقدار پتانسیل کاهش نداشته ولی نسبت به حالتی که تنها کف بند موجود می‌باشد مقدار نیروی زیرفشار بیشتر خواهد بود.

در شرایطی که پرده آب بند در پی سد قرار دارد وجود پرده آب بند به شدت طول خط جریان را افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش نیروی زیرفشار در زیر کف بند خواهد بود.

در حالتی که پرده آب بند هم در پی و هم در پایین دست قرار دارد نیز اگر چه وجود پرده آب بند در زیر پی سد طول خط نشت را اندکی افزایش می‌دهد اما وجود پرده آب بند در قسمت انتهایی کف بند مانع از انحنای زیاد خط جریان در زیر کف بند می‌شود که نتیجه آن افزایش خط جریان می‌باشد اما نسبت به حالتی که پرده آب بند در پی سد قرار دارد کمتر خواهد بود، به همین دلیل نیروی زیرفشار بیشتر است.

همانطور که در شکل های فوق مشخص است تا فاصله حدود ۱ متری از ابتدای مدل حالتی که پرده آب بند در پی و پایین دست وجود دارد نتیجه بهتری نسبت به حالتی که پرده آب بند وجود ندارد دارد که دلیل آن وجود پرده آب بند در قسمت زیر پی سد در مدلی که دارای ۲ پرده آب بند وجود دارد می‌باشد که افزایش خط جریان را به دنبال دارد. از محل تلاقی دو نمودار به بعد حالتی که پرده آب بند در آن وجود نداشت نتیجه بهتری داشت که دلیل آن این است که در حالتی که دو پرده آب بند وجود دارد وجود پرده آب بند در قسمت انتهایی کف بند مانع از انحنای زیاد خط جریان در زیر کف بند و در نهایت افزایش طول خط جریان خواهد شد که نتیجه آن افزایش نیروی زیرفشار است.

#### ۴-۴- دبی نشت

در این قسمت نتایج مربوط به دبی نشت برای مدل های مختلف در شرایط آزمایشگاهی و عددی ارائه می شود.

بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که با افزایش طول خط نشت که نتیجه آن کاهش گرادیان هیدرولیکی در قسمت خروجی می باشد میزان دبی نشت خروجی نیز کاهش یافت. نتیجه فوق را می توان از مقادیر ارائه شده در جدول ۲-۴ استنباط کرد.

جدول ۲-۴- مقدار دبی آزمایشگاهی در مدل های مختلف

مدل	کف بند در	پایین دست و پرده آب بند در	کف بند در	پایین دست و پرده آب بند در	کف بند در	پایین دست و پرده آب بند در	عمق
شاهد	۳	۲	۴	۵	۶	۱	
۴۲	۴۷	۶۵	۴۹	۴۵	۳۶	۸۳	
۴۷	۱۱۶	۱۵۳	۱۰۵	۱۰۲	۷۵	۱۹۰	
۵۲	۱۸۶	۲۰۹	۱۴۳	۱۵۰	۱۴۸	۲۹۰	
۵۷	۲۴۹	۲۸۴	۲۰۱	۲۱۲	۱۹۸	*	
۶۲	۳۰۳	۳۶۹	۲۵۳	۲۷۰	۲۴۳		
۶۷۳۶	۳۷۰	۴۴۱	۳۳۷	۳۲۰	۲۷۷		
۷۲	*	۵۴۷	۳۶۴	۳۶۵	۳۴۸		
۷۵		۵۷۳	۴۳۸	۴۰۹	۳۵۹		

\*به ازای هد مشخص شده در مدل مربوط پدیده جوشش اتفاق افتاد

در شکل ۴-۴۱ تغییرات دبی جریان به ازای هدهای بالادست مختلف برای تمام مدل ها، ارائه شده است. همان طور که در شکل مشخص در تمام مدل روند افزایش دبی در برابر تغییرات هد بالادست، تقریباً خطی است که استنباط را می توان نسبت رابطه داری داشت.



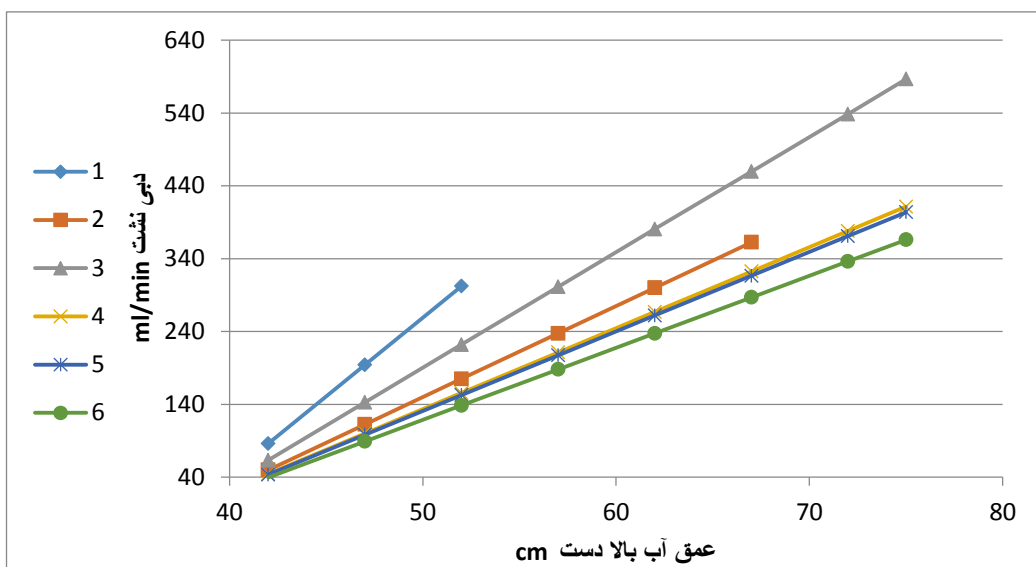
همچنین در مدل آزمایشگاهی دارای یک کف بند در پایین دست و دو پرده ی آب بند کمترین میزان نشت به دست آمد که قابل قبول بود.

نتایج مربوط به دبی نشست حاصل از مدل عددی نیز، در جدول ارائه شده است.

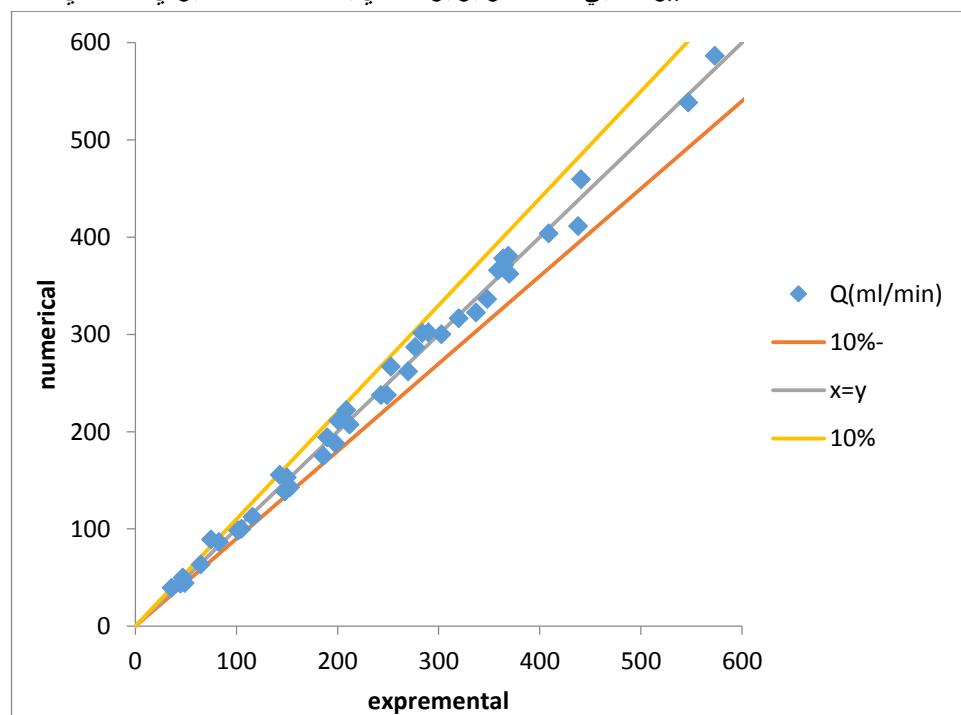
در صورت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مشخص می شود که مدل درونی کوچکتر مساوی  $\pm 10\%$  است.

جدول ۳-۴- مقدار دبی عددی در مدل های مختلف

مدل	شاهد	کف بند در پایین دست	پرده آب بند در پی سد	کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پی	کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پایین دست	کف بند در پایین دست و پرده آب بند در پایین دست
عمق	۱	۳	۲	۴	۵	۶
۴۲	۸۶.۳۲۵	۴۹.۸۹۸	۶۳.۴۳۸	۴۴.۴۸۴	۴۳.۶۵۹	۳۹.۵۷۰
۴۷	۱۹۴.۲۲۹	۱۱۲.۴۷۶	۱۴۲.۷۳۷	۱۰۰.۰۸۶	۹۸.۲۳۲	۸۹.۰۳۴
۵۲	۳۰۲.۱۳	۱۷۴.۹۶۶	۲۲۲.۰۳۳	۱۵۵.۶۹۱	۱۵۲.۸۰۵	۱۳۸.۴۹۸
۵۷	*	۲۳۷.۴۵۳	۳۰۱.۳۲۰	۲۱۱.۳۰۲	۲۰۷.۳۷۸	۱۸۷.۹۶۲
۶۲		۲۹۹.۹۴۰	۳۸۰.۶۴۰	۲۶۶.۸۹۸	۲۶۱.۹۵۱	۲۳۷.۴۲۶
۶۷		۳۶۲.۴۳۰	۴۵۹.۵۳۰	۳۲۲.۵۰۰	۳۱۶.۵۳۰	۲۸۶.۸۹۰
۷۲	*		۵۳۸.۴۱۰	۳۷۸.۰۹۰	۳۷۱.۱۰۰	۳۳۶.۳۶۰
۷۵			۵۸۶.۶۰۰	۴۱۱.۴۸۰	۴۰۳.۸۳۰	۳۶۶.۰۳۰



شکل ۴-۲۲ تغییرات دبی نشست در برابر هدهای بالادست مختلف برای مدل های مختلف



شکل ۴-۲۳ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی دبی نشست

نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائه شده در قسمت های قبل ، در واقع مربوط به بهینه ترین مدل ها شرایط بود که در این قسمت و در قالب دو جدول ۴-۴ و ۴-۵ نتایج آزمایشگاهی و عددی کلیه آزمایشات و مدل ها، به ازای هد بالادست ۵۲ سانتی متر ارائه شده است. مقایسه مقادیر ارائه شده در این جدول ها، در واقع بیانگر دقت بالای مدل های نتایج می باشد.

جدول ۴-۴ مقدار دبی نشت آزمایشگاهی برای تمامی مدل ها در یک هد مشخصات

$Q$	پرده آب بند	پرده آب بند	کف بند	کف بند
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست
	cm	cm	cm	cm
۲۹۰	-	-	-	-
۲۶۵	-	-	-	۷.۵
۲۲۲	-	-	-	۱۵
۱۷۰	-	-	-	۳۰
۱۳۷	-	-	-	۴۵
۲۶۱	-	-	۷.۵	-
۲۲۰	-	-	۱۵	-
۱۸۶	-	-	۳۰	-
۱۳۷	-	-	۴۵	-
۲۶۰	-	۳.۵	-	-
۲۰۹	-	۷.۵	-	-
۱۶۸	-	۱۵	-	-
۱۵۹	-	۳.۵	۳۰	-
۱۴۳	-	۷.۵	۳۰	-
۱۳۲	-	۱۵	۳۰	-
۱۶۳	۳.۵	-	۳۰	-
۱۵۰	۷.۵	-	۳۰	-
۱۳۰	۱۵	-	۳۰	-
۱۵۱	۳.۵	۳.۵	۳۰	-
۱۴۸	۷.۵	۷.۵	۳۰	-
۱۱۰	۱۵	۱۵	۳۰	-

جدول ۴-۵ مقدار دبی نشست عددی برای تمامی مدل ها در یک هد  
مشخصات

Q	پرده آب بند	پرده آب بند	کف بند	کف بند
	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست
ML/min	cm	cm	cm	cm
۳۰۲.۱۳	-	-	-	-
۲۷۰.۶۶۹	-	-	-	۷.۵
۲۲۶.۵۹۶	-	-	-	۱۵
۱۷۴.۸۶۴	-	-	-	۳۰
۱۴۲.۴۷۳	-	-	-	۴۵
۲۷۰.۶۳	-	-	۷.۵	-
۲۲۶.۶۸	-	-	۱۵	-
۱۷۴.۹۶۶	-	-	۳۰	-
۱۴۲.۴۷۳	-	-	۴۵	-
۲۶۲.۵۳	-	۳.۵	-	-
۲۲۲.۰۳۳	-	۷.۵	-	-
۱۶۳.۶۲	-	۱۵	-	-
۱۶۷.۰۹۴	-	۳.۵	۳۰	-
۱۵۵.۶۹۱	-	۷.۵	۳۰	-
۱۳۰.۲۵۷	-	۱۵	۳۰	-
۱۶۴.۱۱۸	۳.۵	-	۳۰	-
۱۵۲.۸۰۵	۷.۵	-	۳۰	-
۱۳۱.۹۳۴	۱۵	-	۳۰	-
۱۵۷.۲۵۷	۳.۵	۳.۵	۳۰	-
۱۳۸.۴۹۸	۷.۵	۷.۵	۳۰	-
۱۰۶.۸۸۱	۱۵	۱۵	۳۰	-

## فصل پنجم

### نتیجه گیری و پیشنهادات

این تحقیق با یک مدل آزمایشگاهی تانک نشت که دارای ۷۵ پیزومتر فعال داشت صورت گرفت و مقادیر داده های آزمایشگاهی با مدل seep/w شبیه سازی گردید.

اهم نتایج حاصل از این تحقیق به صورت ذیل می باشد:

۱. در مدل شاهد مقدار پتانسیل از سمت بالادست به پایین دست روندی کاهشی دارد که این روند برای پیزومترهای پایین تر (ردیف ۵) تقریباً خطی است و برای ردیف های بالاتر مقدار کاهش پتانسیل تقریباً خطی پتانسیل کاسته می شود به طوریکه برای دو ردیف نزدیک به سطح مقدار کاهش پتانسیل به طور ناگهانی اتفاق می افتد

۲. بررسی نتایج مدل عددی بر روی گرادیان خروجی مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. به طوریکه میزان خطای محاسباتی در مدل عددی حدود ۲۰٪ بود

۳. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با کاربرد کف بند در قسمت پایین دست سد، طول خط نشت افزایش یافته و در نتیجه گرادیان هیدرولیکی را در قسمت پایین دست سد حدود ۴۰٪ کاهش می دهد.

۴. در حالتی که پرده آب بند در زیر پی سد باشد نیز نتایج مدل عددی مطابقت خوبی با مدل آزمایشگاهی از خود نشان داد. استفاده از پرده آب بند در زیر سد نتایج بهتری را در کنترل پدیده پاپینگ نسبت به وجود کف بند تنها در پایین دست از خود نشان داد به طوریکه پدیده جوشش در هدهای بررسی شده اتفاق نیفتاد.

۵. استفاده از کف بند در بالادست اگرچه کاهش گرادیان خروجی و افزایش خط نشت را به دنبال داشت اما در مقایسه با حضور کف بند در پایین دست سد نتایج ضعیف تری از خود نشان داد، نتایج عددی نیز این مطلب را تأیید می کند.

۶. استفاده از پرده آب بند توأم با کف بند در قسمت پایین دست سبب بهبود نتایج مربوط به گرادیان خروجی و خط نشت شد به طوریکه در این حالت نیز به ازای تمام هدهای بررسی شده تا عمق ۷۵ سانتی متر جوشش اتفاق نیفتاد. در این حالت مقدار گرادیان خروجی نیز نسبت به مدل کف بند و پرده آب بند تنها کمتر بود. به طوریکه به ازای هد ۷۵ سانتی متر مقدار آن حدود ۰/۸۵ بود که نسبت به مدل های دیگر کمتر بود

۷. در حالت وجود کف بند و پرده آب بند در انتها نیز به ازای تمام هدهای بررسی شده پدیده جوشش در قسمت پایین دست مشاهده نشد، نتایج این مدل نسبت به وجود کف بند یا پرده آب بند تنها بهتر بود اما نسبت به حالتی که کف بند و پرده آب بند در ابتدا استفاده شد مقدار گرادیان خروجی محاسبه شده بیشتر بود. دلیل آن را می توان انحنای کمتر خط جریان در زیر سد که نتایج آن کوتاه تر شدن طول خط جریان و نهایتاً افزایش گرادیان خروجی می باشد دانست.

۸. مدل مربوط به کف بند همراه با حضور دو پرده آب بند در ابتدا و انتها بهترین نتیجه را در مورد گرادیان خروجی و نیروی زیرفشار به دنبال داشت به طوریکه در تمام شرایط بررسی شده نتایج بهتری را از خود نشان داد. به عنوان مثال برای هد ۷۵ سانتی متر مقدار گرادیان خروجی کمتر از ۰/۸ بود.

۹. در بررسی نیروی زیرفشار وجود کف بند و پرده آب بند در پی سد بهترین نتیجه را در کاهش نیروی زیرفشار داشت به طوریکه میزان کاهش آن نسبت به مدلی که تنها کف بند در آن حضور داشت حدود ۰/۵٪ بود. شبیه سازی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که خطای مدل عددی در محاسبه نیروی زیر کمتر از ۰/۵٪ بود.

۱۰. مقایسه نتایج مربوط به دبی نشت نشان داد که مدل کف بند به همراه دو پرده آب بند در ابتدا و انتها کمترین دبی نشت را در بر داشت. نتایج مدل عددی نیز صحت مطلب فوق را تأیید کرد که خطای شبیه سازی کمتر از ۱۰٪ بود.



## پیوست و ضمائم

۱-۶- مدل عددی

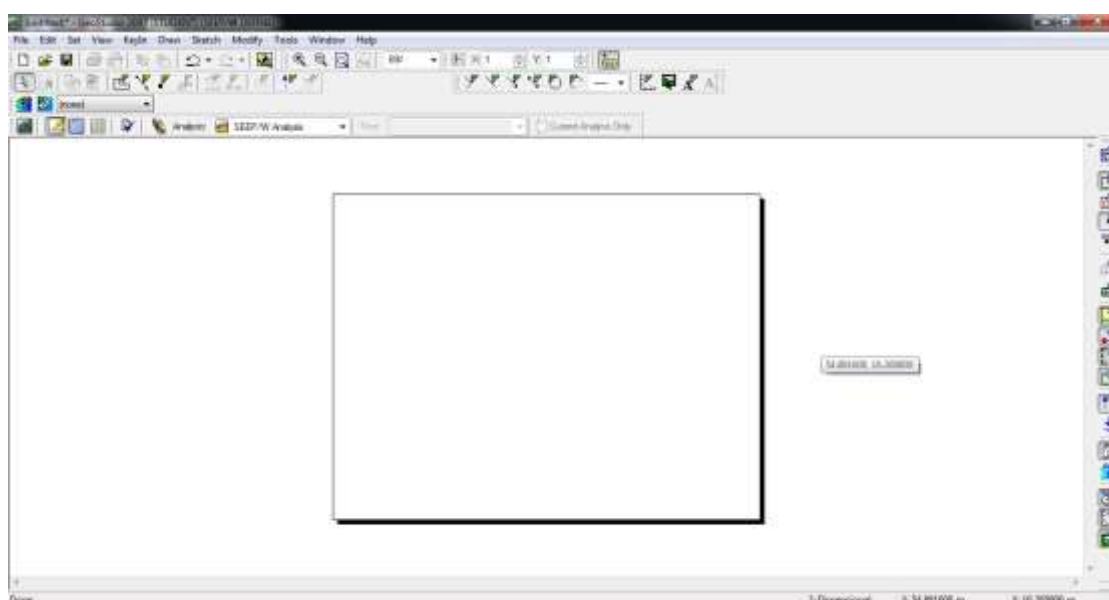
معرفی نرم افزار seep/w

جهت حل عددی معادله لاپلاس در پی و برآورد دبی نشت، گرادیان خروجی و زیرفشار از

نرم افزار seep/w از بسته geostudio2007 استفاده گردید.

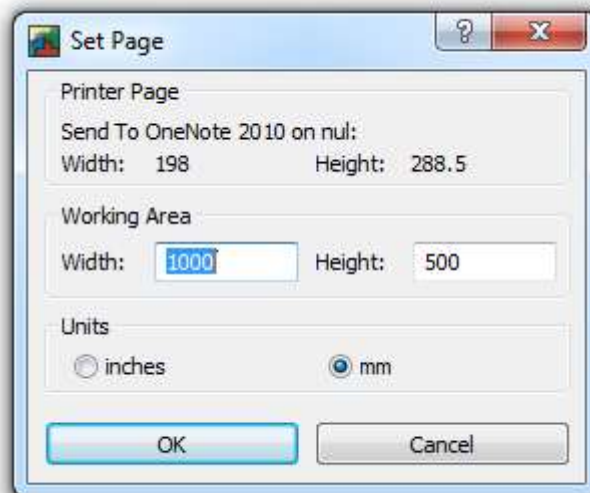
تنظیمات اولیه صفحه نمایش

شکل ۱-۶ صفحه نمایش محیط نرم افزار Seep/w را نشان می دهد.



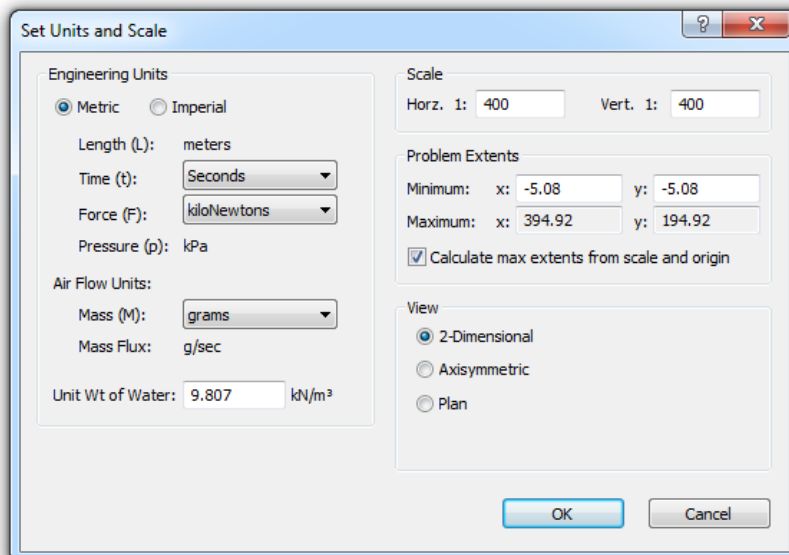
شکل ۱-۶ صفحه اولیه نرم افزار Seep/w

برای شروع کار با این نرم افزار لازم است تنظیمات اولیه شامل صفحه، مقیاسهای افقی و قائم، وجود نقاط راهنما و محورهای افقی و قائم تعیین مختصات را انجام داد. با انتخاب منوی Set و گزینه Page می توان طول و عرض صفحه نمایش را بر حسب میلیمتر یا اینچ مشخص کرد (شکل ۱-۶-۲). تعیین ابعاد صفحه بهتر است با توجه به محدوده توسعه مختصات افقی و قائم مدل به گونه ای باشد که تمام فضای موجود در صفحه توسط نقاط هندسه اشغال شود. بدین ترتیب فضای خالی در سطح صفحه نمایش وجود نداشته باشد.



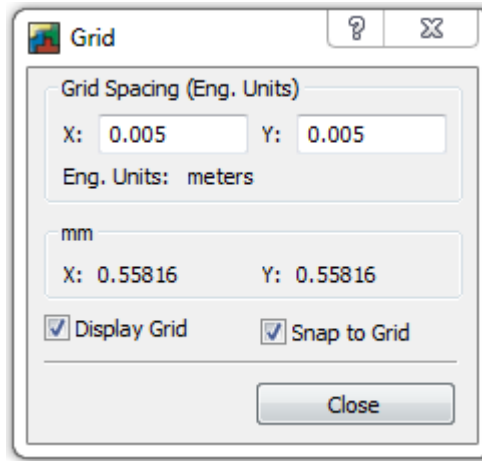
شکل ۲-۶ تعیین اندازه صفحه کار جهت مدل سازی

با انتخاب پنجره **Units and Scale** از منوی **Set** پنجره‌ای مطابق شکل ۳-۶ ظاهر خواهد شد. در این پنجره با انتخاب یکای فوت یا متر می‌توان نوع سیستم واحدی حاکم بر تحلیل را مشخص کرد. مقیاس افقی و قائم صفحه در بخش **Scale** و محدوده حداقل و حداکثر **X** و **y** در بخش **Problem Extents** وارد خواهد شد و در این پنجره می‌توان وزن مخصوص آب را به دلخواه تغییر داد.



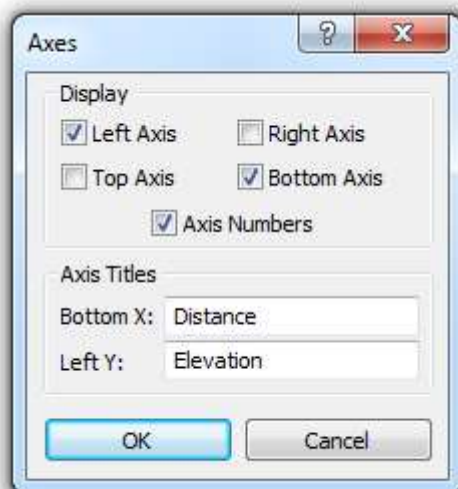
شکل ۳-۶ انتخاب سیستم واحدی، محدوده ابعاد افقی و قائم صفحه و وزن مخصوص آب

جهت نمایش نقاط کمکی با فواصل معین از گزینه Grid مطابق شکل ۴-۶ استفاده می شود. به طور پیش فرض می توان عدد یک را به عنوان فاصله گره ها در جهات افقی و قائم انتخاب کرد. با فعال کردن گزینه های Display Grid و SnapGrid نقاط کمکی در صفحه نمایش ظاهر می شود.

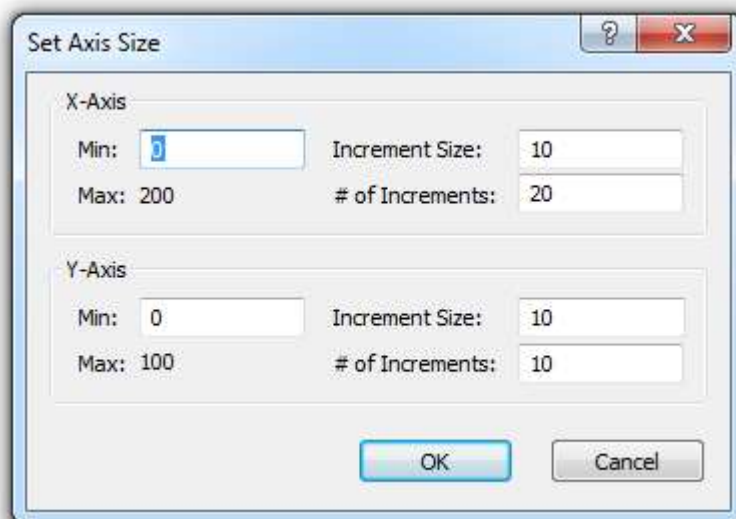


شکل ۴-۶ نمایش نقاط کمکی جهت شبکه بندی

در پنجره Axes از منوی Set مطابق شکل ۵-۶ می توان نمایش محورهای مختصات را ویرایش نمود. در این پنجره موقعیت نمایش محورهای مختصات و نام انتخابی برای محورها وارد می گردد. در ادامه پنجره Axes مطابق شکل ۶-۶ پنجره دیگری باز خواهد شد که در این صفحه می توان حداقل، طول بازه و تعداد بازه های محور افقی و قائم را مشخص کرد.



شکل ۵-۶ ویرایش فرم و نام محور های افقی و قائم جهت ترسیم

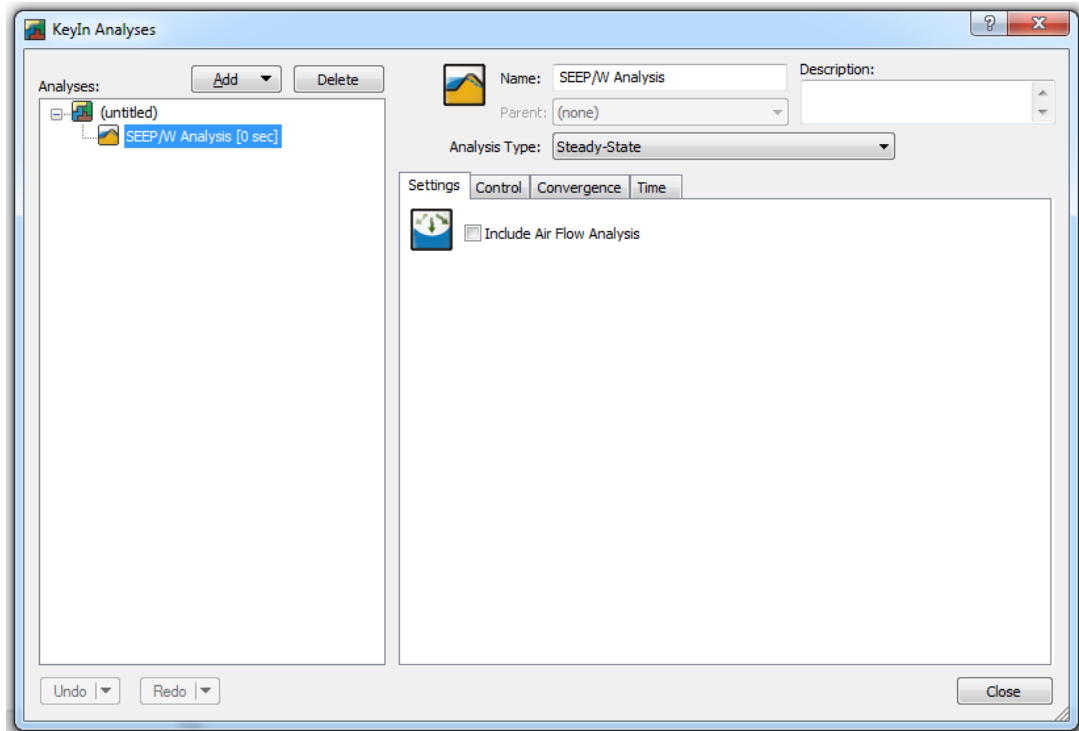


شکل ۶-۶ تعیین طول و تعداد بازه های محور های افقی و قائم

انتخاب نوع تحلیل و معیار های همگرایی

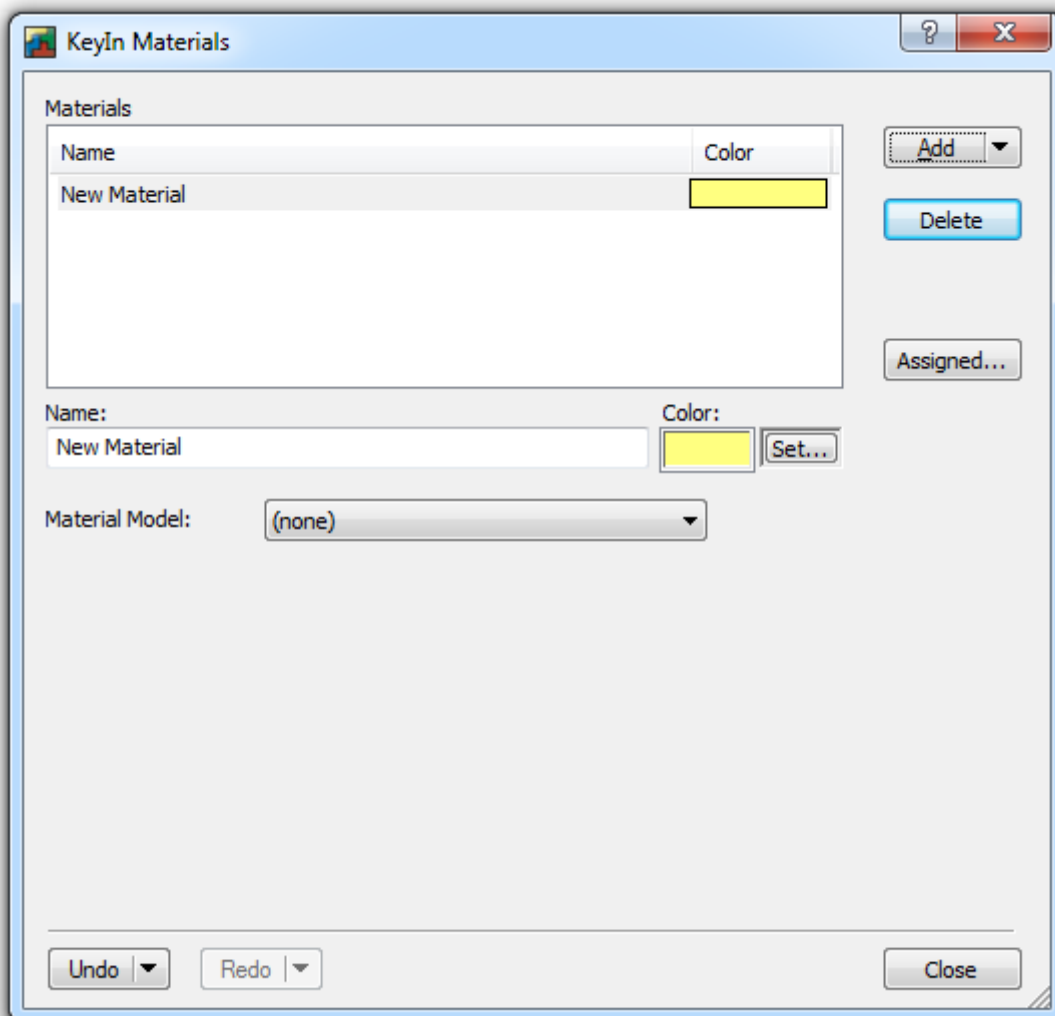
جهت تعریف مشخصات مدل از قبیل نوع تحلیل اعم از تحلیل ماندگار و تحلیل غیر ماندگار، تعداد گام های سعی و خطا، خطای انتخابی، طول گام های زمانی جهت اجرای پروژه مطابق شکل ۶-۷ از پنجره Analysis Setting واقع در منوی KeyIn استفاده می شود. در این پنجره از گزینه Type جهت تعیین نوع تحلیل اعم از ماندگار Steady و غیر ماندگار Transient و اعمال شرایط اولیه در

تحلیل غیرماندگار استفاده می شود. از پنجره **Convergence** جهت تعیین حداکثر تعداد سعی و خطا و حداقل و حداکثر میزان تغییرات در هر گام زمانی می توان بهره برد.



شکل ۶-۷ تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره **Type** و انتخاب اعداد سعی و خطا و مقدار خطای انتخابی در هر گام

تعیین خصوصیات فیزیکی مدل جهت تعریف حالات مختلف مصالح و خصوصیات فیزیکی آنها اعم از نفوذپذیری، زاویه حرکت آب در خاک و نسبت سرعت افقی و قائم، فشار آب حفره‌ای، ضریب ذخیره ویژه باید مطابق شکل ۶-۸ از منوی **KeyIn** گزینه **Materials** فعال شود.



شکل ۱-۶-۱ تعریف خاک جدید

در شرایط وجود خاک غیر اشباع حباب‌های هوا موجود در توده فضاهای خالی خاک سبب ممانعت در مقابل حرکت آب در خاک می‌گردد؛ در نتیجه حرکت آب در خاک در شرایط غیراشباع مشکل‌تر از شرایط اشباع می‌باشد. لذا در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری غیراشباع خاک برای خاک غیراشباع به نتایج غیر واقعی منجر می‌شود. از جمله قابلیت‌های این نرم افزار تعریف ضریب نفوذپذیری غیراشباع خاک به واسطه تعریف ضریب نفوذپذیری خاک با فشار آب حفره‌ای است. چنانچه تغییرات ضریب نفوذپذیری غیر اشباع خاک با فشار حفره‌ای در دسترس نباشد، بر اساس یک

تعریف مقدار ضریب نفوذپذیری خاک غیر اشباع در فشار صفر برابر ضریب نفوذپذیری اشباع و مقدار ضریب نفوذپذیری در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال برابر  $\frac{K_{sat}}{100}$  فرض می‌گردد.

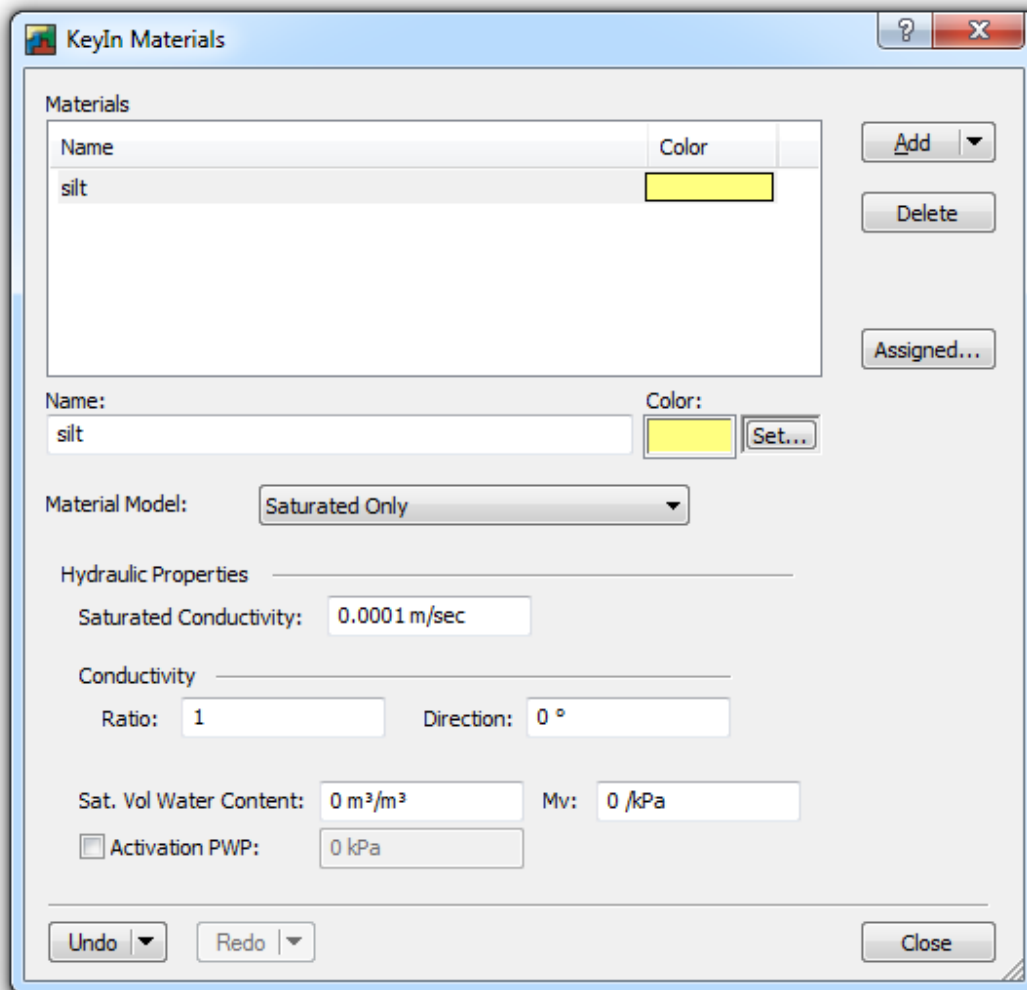
برای تعریف حالات مختلف خاک در پنجره Materials پس از تعریف یک خاک جدید سه حالت زیر برای تعریف و حالات خاک ممکن است:

### ۳- خاک اشباع (Saturated Only)

مطابق شکل ۶-۹ در حالت اشباع باید عبوردهی هیدرولیکی Saturated Conductivity، زاویه حرکت آب در خاک (چرخش محورهای مختصات) Direction، نسبت عبوردهی هیدرولیکی در راستای محورهای مختصات Ratio، ضریب ذخیره ویژه اشباع Sat. Vol Water Content، فشار آب حفره‌ای تعیین و تعریف کرد.

باید توجه کرد عبوردهی تعریف شده در راستای X است و عبوردهی در راستای Y به وسیله عوامل Ratio و Direction به دست می‌آید. در این تحقیق تماما از این نوع خاک استفاده شده است و مقدار ضریب عبوردهی هیدرولیکی K در همه جا مقدار کم ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



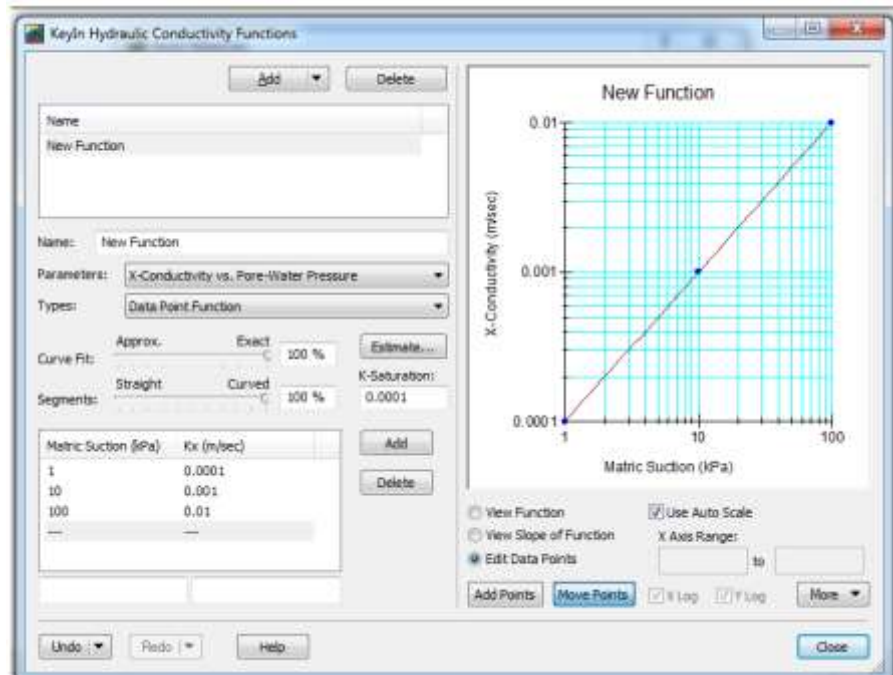


شکل ۹-۶ تعریف خاک در شرایط اشباع

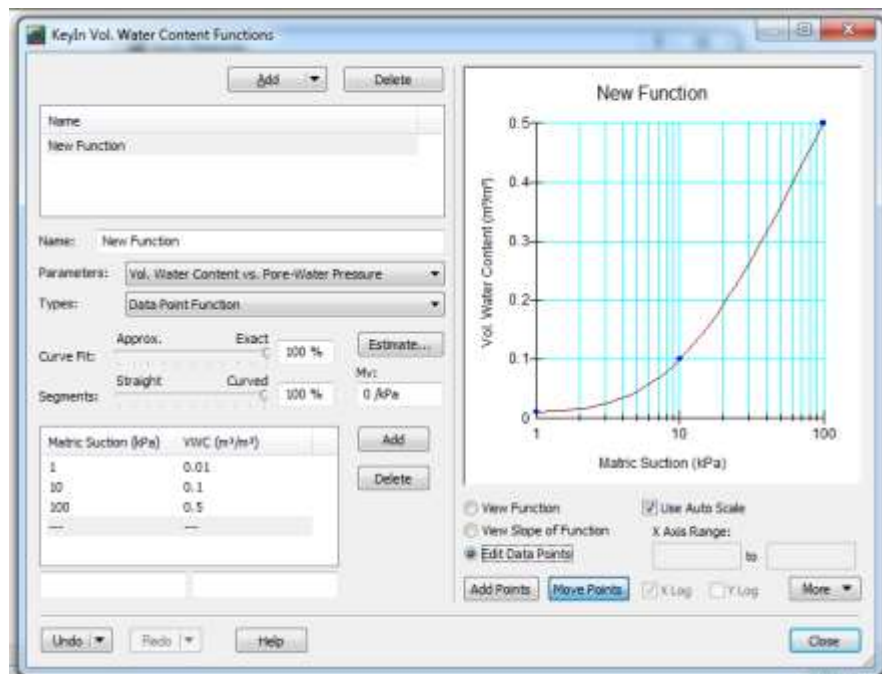
خاک اشباع / غیر اشباع (Saturated / Unsaturated)

در این حالت اشباع و غیر اشباع بودن خاک مورد نظر بسته به بقیه شرایط مدل دارد.

همانطور که گفته شد مقدار عبوردهی هیدرولیکی در راستای X بسته به پارامتر فشار آب حفره‌ای دارد و می‌توان مطابق شکل ۶-۱۰ آن را تعریف کرد. ضریب عبور دهی مانند قسمت قبل بدست می‌آید.

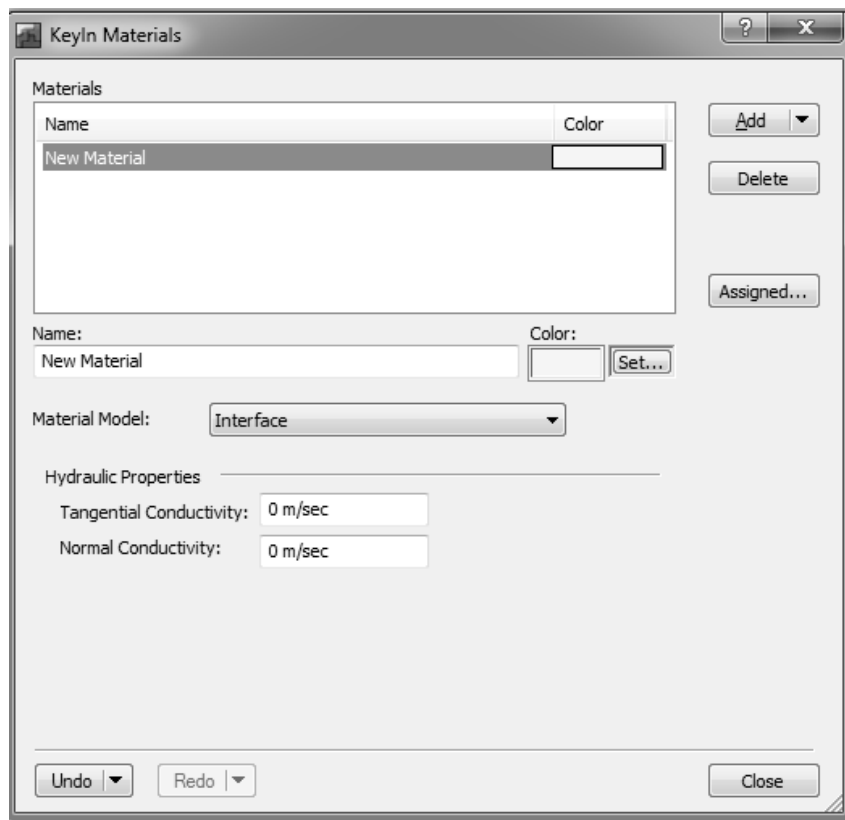


شکل ۱۰-۶ تعریف رابطه بین عبور دهی هیدرولیکی با فشار آب حفره ای در خاک های نیمه اشباع  
 رابطه بین فشار آب حفره ای و ضریب ذخیره ویژه نیز از طریق نمودار شکل ۶-۱۱ و به صورت عدد  
 دهی مانند قسم قبل قابل تعریف است.



شکل ۱۱-۶ تعریف رابطه بین ضریب ذخیره ویژه با فشار آب حفره ای  
 خاک غیر قابل نفوذ (Interface)

همانطور که می‌دانیم خاک غیر قابل نفوذ می‌تواند جریان بسیار بسیار کمی را از خود عبور دهد. چون این جریان نسبت به بقیه مناطق بسیار ناچیز و غیر قابل توجه است می‌توان ضریب عبوردهی هیدرولیکی آن را برابر صفر در نظر گرفت. اما برای دقت بیشتر می‌توان ضریب عبوردهی مماسی و عادی را مانند شکل ۶-۱۲ در نظر گرفت.

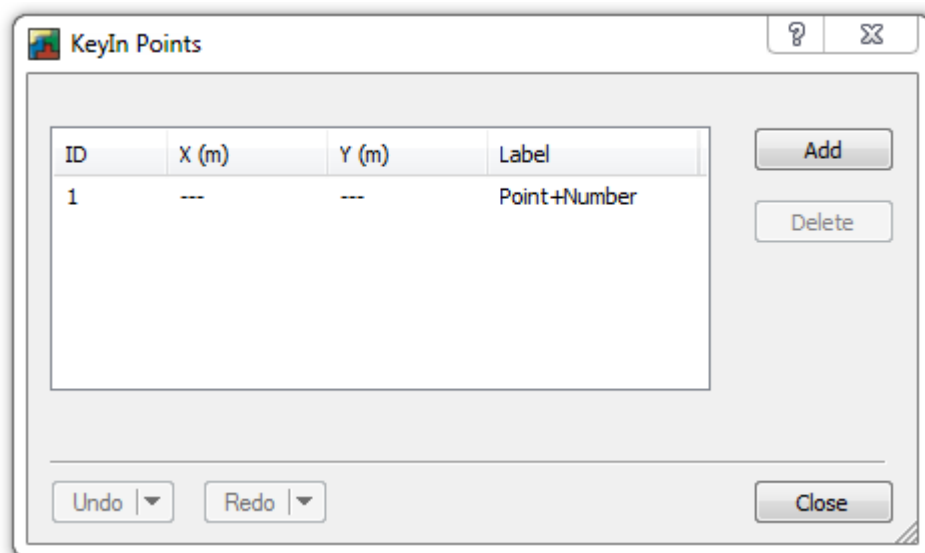


شکل ۶-۱۲ تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ

### ترسیم هندسه مدل

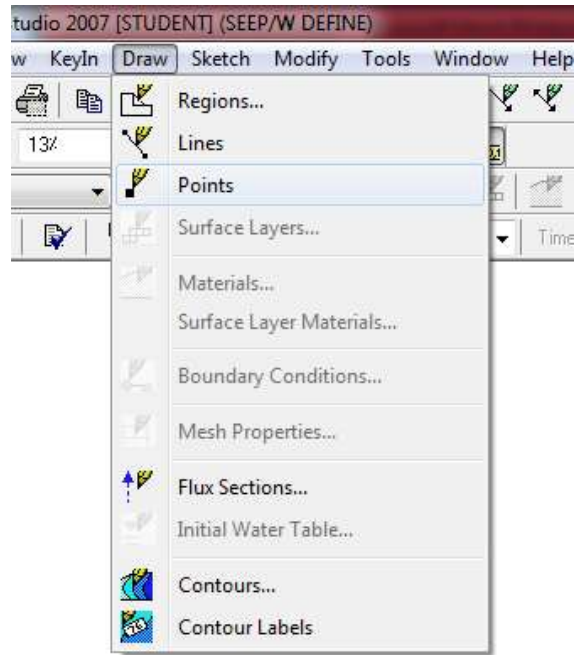
جهت ترسیم هندسه مدل لازم است مختصات نقاط مختلف مرزهای مدل وارد شوند. برای این منظور از منوی KeyIn پنجره KeyIn Points استفاده می‌شود. در پنجره ظاهر شده مطابق شکل ۶-۱۳ می‌توان مختصات نقاط را به طور یک به یک وارد کرد. پس از کلیک بر روی گزینه Add نقطه در صفحه ظاهر می‌شود. در صورت تعدد نقاط میتوان این نقاط را از نرم افزار صفحه گسترده (مثل

Excel) کپی و در صفحه KeyIn Points راست کلیک و با انتخاب گزینه Paste نقاط در صفحه ظاهر می‌شوند.



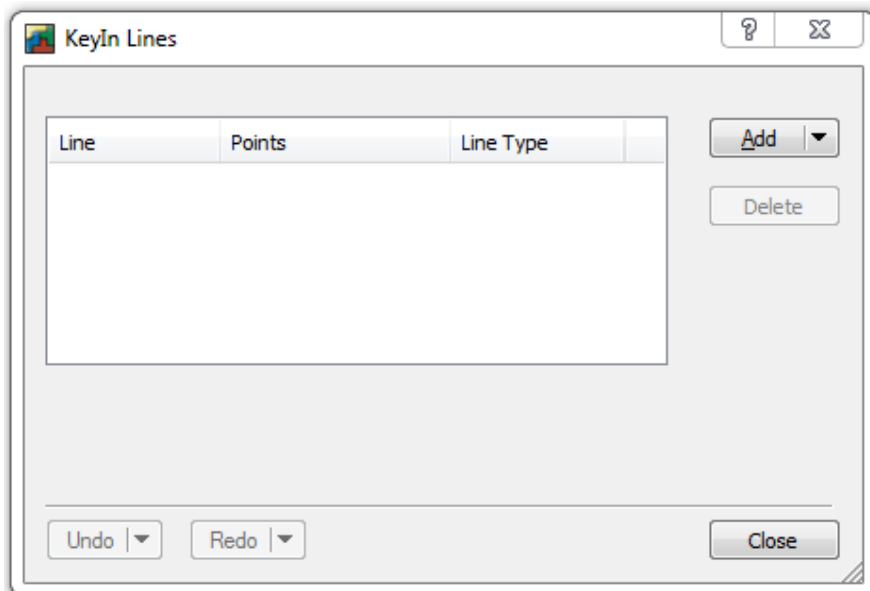
شکل ۶-۱۳ تعریف مختصات نقاط

البته برای تعریف و مشخص‌سازی نقاط می‌توان مطابق شکل ۶-۱۴ از منوی Draw و گزینه Points استفاده کرد و به صورت دستی نقاط را روی صفحه مشخص کرد.

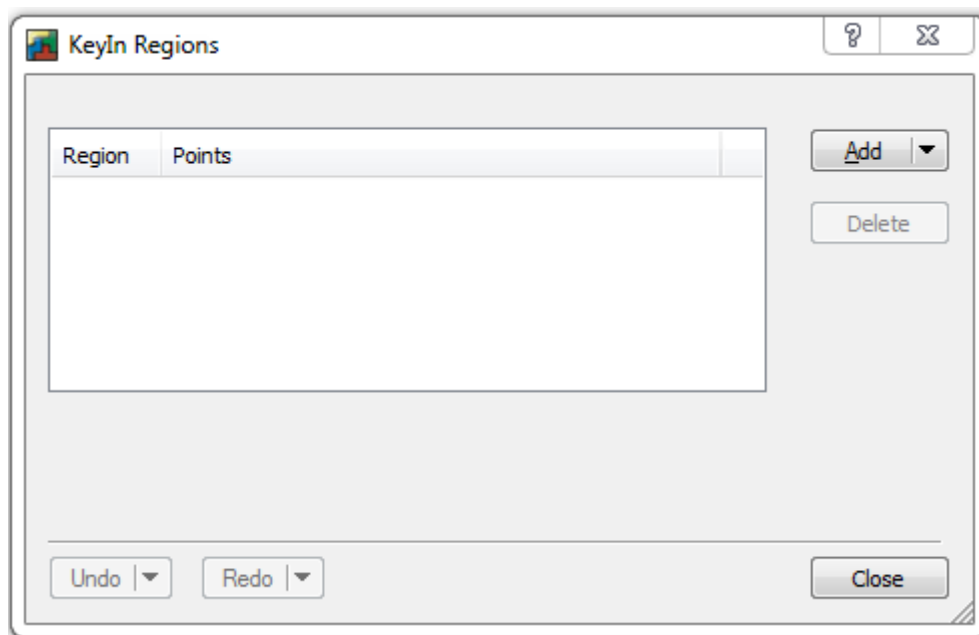


شکل ۶-۱۴ Draw و انتخاب Points برای جانمایی دستی نقاط

پس از مشخص کردن نقاط در صفحه با داشتن شماره هر نقطه می توان مطابق شکل ۶-۱۵ از نوار KeyIn و منوهای (Line) و (Region) بین آنها خط یا یک منطقه مشخص کرد(شکل ۶-۱۶).

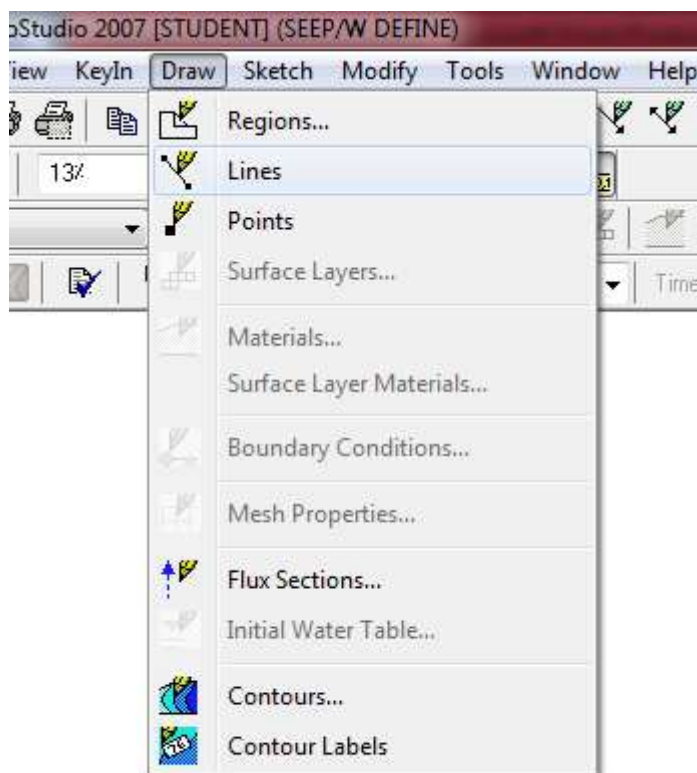


شکل ۶-۱۵ منوی Lines برای مشخص کردن خط بین نقاط با داشتن شماره نقاط



شکل ۶-۱۶ منوی Regions برای مشخص کردن منطقه بین نقاط با داشتن شماره نقاط

البته برای مشخص کردن منطقه یا خط بین نقاط راه دیگری وجود دارد. با مشخص بودن نقاط روی صفحه می توان مطابق شکل ۶-۱۷ از نوار Draw و گزینه های Points و Regions استفاده کرد. در این حالت نشانه مثبت در صفحه ظاهر می گردد. این نشانگر از یک نقطه تا ایجاد خط (Line) یا یک ناحیه بسته (Region) ادامه می باید. در این تحقیق خاک ما تک ناحیه ای بود و از خطوط برای جانمایی دیواره های آب بند استفاده شده است. موقعیت و فیزیک ناحیه بسته ثابت است اما خطوط مورد استفاده دیواره ها بسته به صورت مسأله و قسمت مورد بررسی متفاوت است.



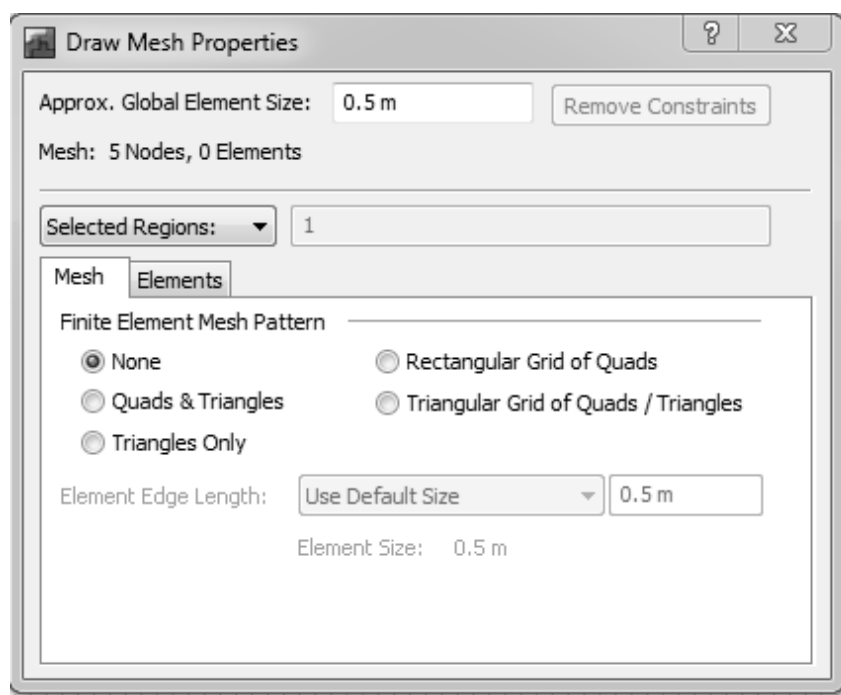
شکل ۶-۱۷ نوار Draw و انتخاب Regions و Lines برای مشخص کردن منطقه و خط بین نقاط

## اختصاص دادن Material به منطقه یا خط و مش بندی

پس از مشخص شدن منطقه و خط در صفحه برای اختصاص دادن نوع ماده‌ای که قبلاً تعریف کردیم مطابق شکل ۶-۱۸ از نوار Draw گزینه Material را انتخاب می‌کنیم و با توجه به نوع منطقه مورد بررسی ابتدا نوع ماده را از بین ماده‌های که قبلاً تعریف کردیم انتخاب کرده و با مشخص کردن خط یا منطقه قسمت مورد بررسی به وسیله نشانگر که بسته به انتخاب خط یا منطقه به شکل یک خط یا مربع می‌باشد، به اختصاص دادن ماده مورد نظر به قسمت‌های مختلف صفحه کار می‌پردازیم.

انتخاب نوع خط بیشتر برای تعریف دیوارهای آب‌بند با عرض کم است و معمولاً به طور غیرقابل نفوذ (Interface) تعریف می‌شود.

پس از کشیدن و بستن مناطق نوبت به مش‌بندی می‌رسد و برای این کار از نوار Draw گزینه Mesh Properties را انتخاب می‌کنیم و ابتدا در بالای پنجره اندازه مش‌ها را تعیین می‌کنیم. هر چه ابعاد ریزتری داشته باشیم دقت کار بالا می‌رود، اما در عوض زمان رسیدن به جواب قابل قبول بیشتر طول می‌کشد. سپس نوع مش‌بندی را با توجه به دقت کار و طرح انتخاب می‌کنیم. در این تحقیق با توجه به شکل ساده مسأله شکل مش‌ها مستطیلی (Rectangular Grid of Quads) انتخاب شده است.



شکل ۶-۱۸ پنجره Mesh Properties از نوار Draw برای مش‌بندی



## اختصاص شرایط مرزی

به منظور نمایش شرایط مرزی می‌توان از گزینه Boundary Conditions موجود در منوی Draw استفاده کرد. با انتخاب این گزینه پنجره‌ای مطابق شکل ۶-۱۹ ظاهر خواهد شد. برای تعریف انواع مختلف شرایط مرزی ابتدا گزینه KeyIn را زده تا پنجره KeyIn Boundary Conditions ظاهر شود.

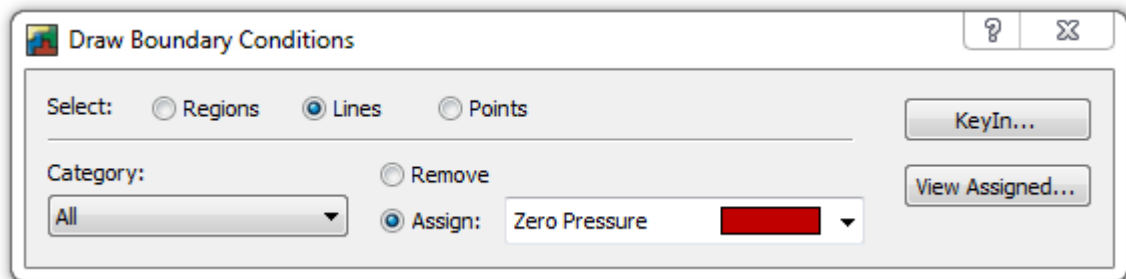
ابتدا باید از نوار Type نوع شرایط مرزی را با توجه به قسمت مورد نظر انتخاب شود.

شرایط مرزی Pressure Head برای حالت وجود یک سطح با بار آبی ثابت برای تمام نقاط این سطح به کار می‌رود. به عنوان مثال چنانچه اطمینان از ظهور سطح آب در بخش پایین دست سد وجود داشته باشد. برای این شرایط مرزی از نوع Pressure Head تعریف می‌شود. در حالی که از محل خروج سطح آب در بخش شیب‌دار پایین دست اطمینان وجود نداشته باشد از شرایط Total Flux (Q) یا Unit Flux (q) همراه با روشن کردن گزینه Potential Seepage Face Review استفاده می‌شود.

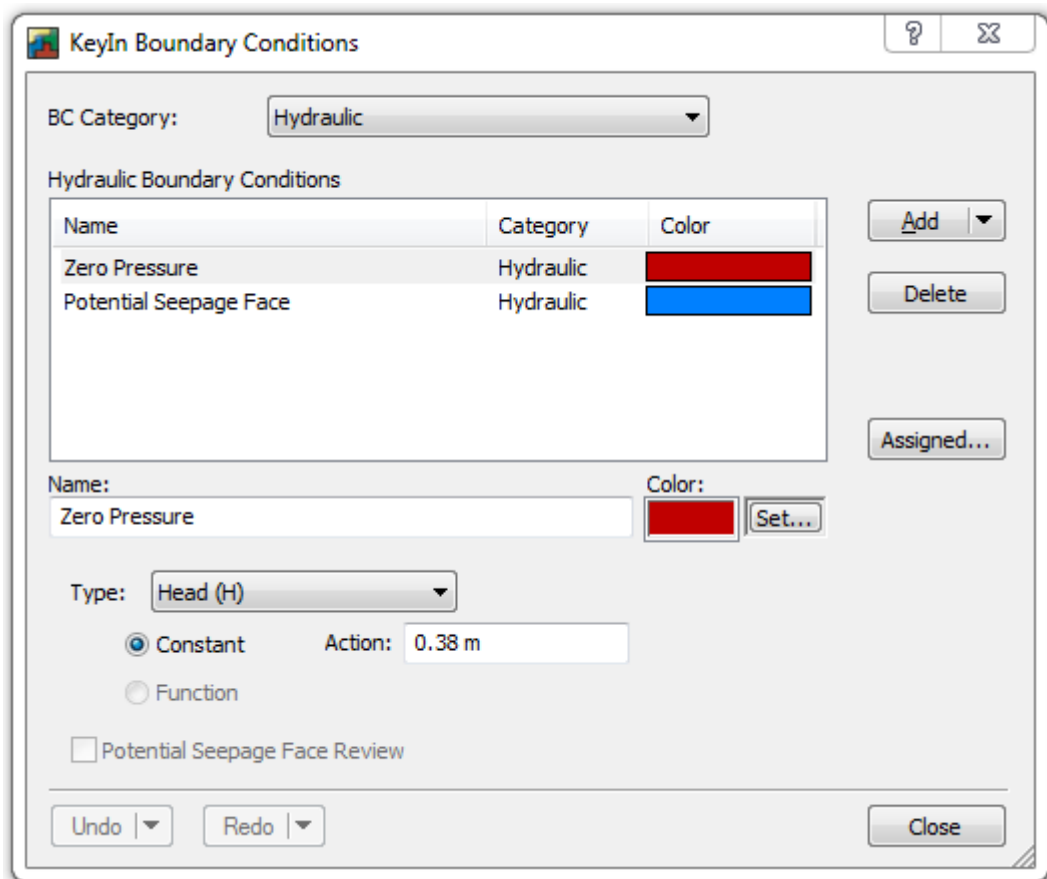
باید توجه داشت دو شرط مرزی Head و Pressure Head هر دو دارای مفاهیم یکسانی هستند، با این تفاوت که شرط مرزی Head رقوم از کف را نیز علاوه بر Pressure Head در نظر می‌گیرد.

البته تمام حالات گفته شده فقط در حالات ماندگار تعریف می‌شوند و مقادیر ثابت (Constant) را در هر دو حالت بالادست و پایین دست به ما می‌دهد. برای تعریف حالت غیر ماندگار باید گزینه Function را فعال کنیم و نمودار آن را بر اساس داده‌های موجود رسم می‌کنیم تا نرم افزار از آن استفاده کند. (شکل ۶-۲۰)

در این تحقیق نوع حدود مرزی Pressure Head و هد پایین ۳۸ سانتی متر و هد بالادست ۴۲، ۴۷، ۵۲، ۵۷، ۶۲، ۶۷، ۷۲ و ۷۵ متر انتخاب شده است.



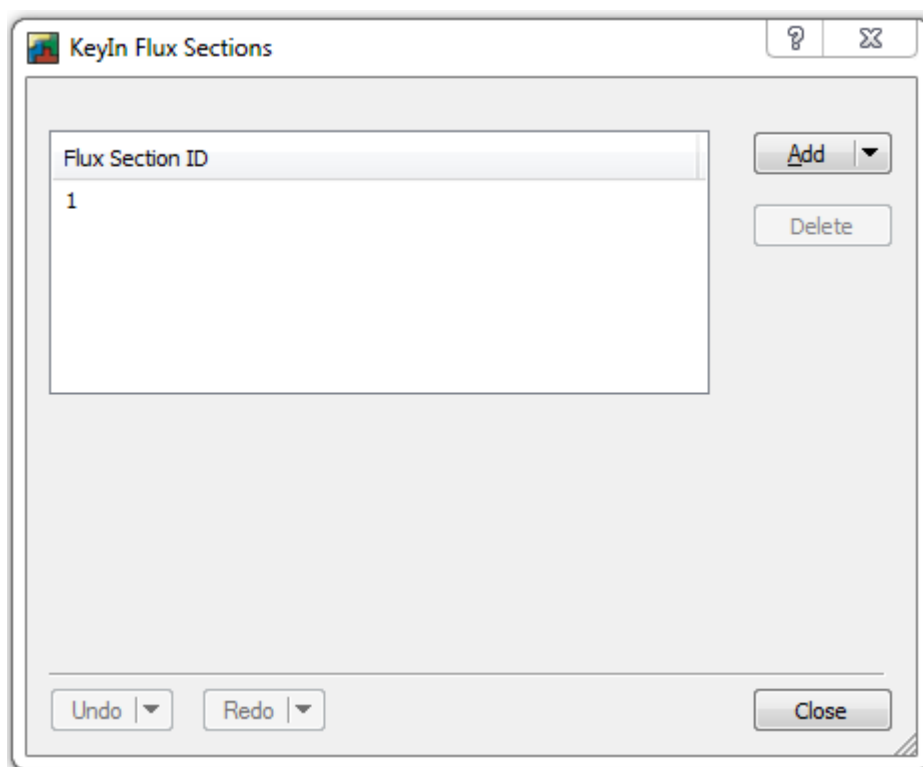
شکل ۶-۱۹ اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی



شکل ۶-۲۰ تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی

## قرائت و اندازه گیری دبی

در این نرم افزار می توان مقطعی به دلخواه را در واحد عرض با تعریف مختصات ابتدا یا انتهای مقطع انتخاب و یا به طور دستی رسم کرد و مقدار دبی را محاسبه کرد. برای این منظور پنجره KeyIn Flux Sections از منوی KeyIn انتخاب می شود. پس از این مرحله پنجره ای مطابق شکل ۶-۲۱ باز می شود که می توان در آن مختصات ابتدا و انتهای مقطع مذکور را وارد کرد. اگر در زیر یک اسم به دادن نقاط ادامه بدهیم تعدادی پاره خط پشت سر هم رسم می شوند که هر کدام دبی عبوری را نشان می دهند.

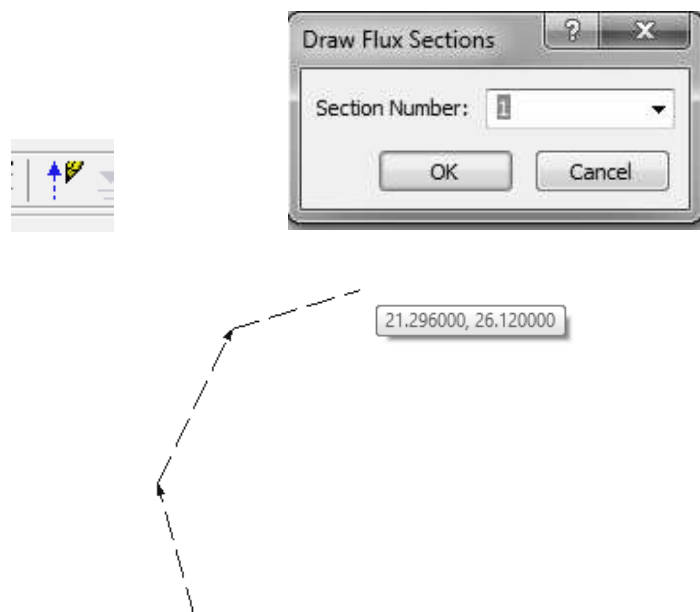


شکل ۶-۲۱ رسم Flux Sections با استفاده از مختصات نقاط

این مقطع ها را به طور دستی نیز می توان زد. برای این کار باید مطابق شکل ۶-۲۲ از نوار Draw گزینه Flux section را انتخاب کرد و با انتخاب کد نشانگر به علامت مثبت تبدیل می شود

که با هر بار چپ کلیک (غیر از مرتبه اول) یک پاره خط به عنوان مقطع اندازه‌گیری دبی رسم می‌کند. برای خروج می‌توان از راست کلیک استفاده کرد.

در این تحقیق از سه مقطع برای محاسبه دبی نشت استفاده شده است که یکی در مرز خاک بالادست، یکی در مرز خاک پایین‌دست و دیگری در نقطه دلخواهی در زیر بدنه سد و به صورت عمود بر جریان انتخاب شده است. علت این انتخاب‌های متفاوت کنترل محاسبات نرم افزار است. در صورتی که بالادست و پایین‌دست سد را ۵ متر بالا برده نمی‌شد مقدار مقطع میانی با مقاطع کناری متفاوت می‌شد که با بالا بردن حدود خاک این نقیصه برطرف شد و پی بیشتر شبیه به مدل‌های واقعی شد، زیرا در واقعیت مقداری از بدنه اصلی سد را زیر زمین می‌سازند.





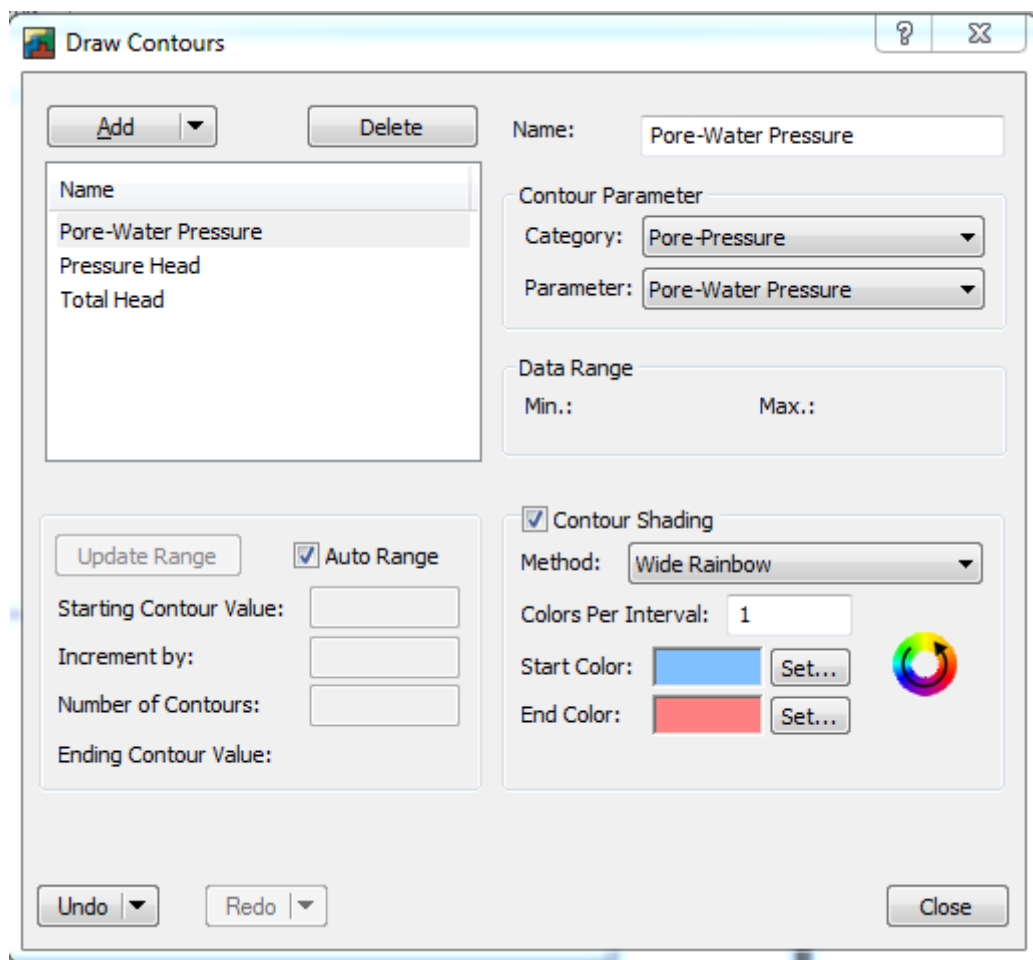
شکل ۶-۲۲ رسم Flux Sections با استفاده از نشانگر موس

## - اجرای مدل

پس از انجام مراحل فوق، مدل ایجاد شده را ذخیره کرده و از منوی Tools دستور Verify را انتخاب می‌کنیم. در این حالت مجموعه هشدارها، خطاها و نوع المان‌بندی‌ها مشخص خواهد شد. در صورت نبودن اشکال در ورود داده‌ها، می‌توان اقدام به حل پروژه با انتخاب دستور Solve از پنجره Tools و اجرای دستور Start نمود.

## - مشاهده نتایج


پس از اجرای نرم‌افزار، می‌توان اقدام به مشاهده نتایج در قالب کنتورها با استفاده از گزینه  استفاده نمود. برای مشاهده کنتور، تغییرات پارامترهای مختلف و شخصی‌سازی تعداد و رنگ آنها مطابق شکل ۶-۲۳ از نوار Draw گزینه Contours  استفاده کرد.



شکل ۶-۲۳ منوی Draw Contours برای شخصی سازی و انتخاب کنتور ها

 Contour Labels همچنین برای نمایش مقدار هر کنتور از گزینه

Flux Labels استفاده می گردد. برای مشاهده مقدار دبی نشت شده از هر مقطع نیز کافسیت منوی

Flux Labels  را انتخاب کرده و بر روی مقطع Flux section رسم شده کلیک می کنیم تا عدد

مربوط به مقدار نشت در واحد عرض مقطع انتخابی نمایان شود.

جهت نمایش خطوط جریان ابتدا منوی  Flow Paths از نوار Draw را

انتخاب می کنیم. سپس بر روی هر نقطه از محیط که کلیک کنیم در صورت وجود خط مسیر جریان

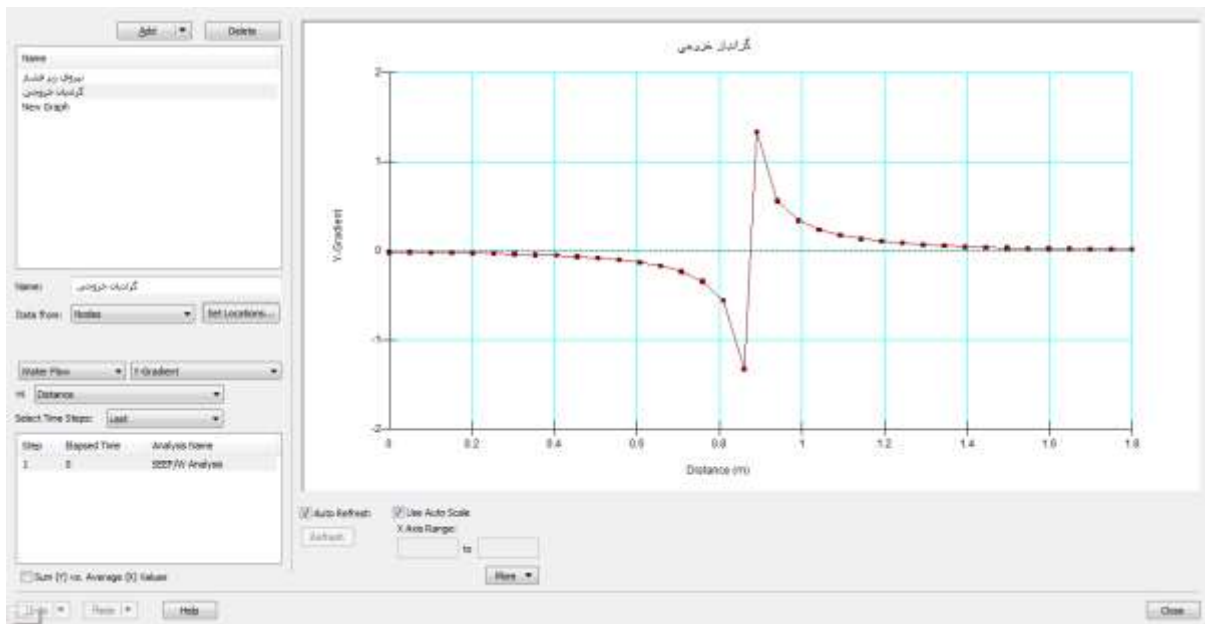
را از آن نقطه نمایش می دهد.

به منظور مشاهده بردارهای سرعت در سراسر مدل گزینه Vector از نوار Draw را فعال می کنیم.

این نرم افزار قابلیت ارائه نتایج را به فرم نمودار یا داده در قالب صفحه گسترده داراست. برای این منظور از پنجره Graph از نوار Draw استفاده می کنیم. پس از انتخاب این گزینه پنجره‌ای مطابق شکل ۶-۲۴ باز می شود. که با استفاده از آن می توان حالات مختلفی از نمودارهای سرعت، گرادیان هیدرولیکی بحرانی، فشار آب و ... را رسم کرد.

برای این کار ابتدا یک نمودار جدید ایجاد کرده، سپس از پایین صفحه نوع و جنس پارامتر مورد نظر را انتخاب می کنیم.

برای مشخص کردن قسمت مورد نظر جهت رسم از گزینه های Data From و Set Location استفاده می کنیم.



شکل ۶-۲۴ پنجره Draw Garph برای رسم نمودار های مختلف





## منابع و مأخذ

۱. ساعتی ع.م.، (۱۳۸۵)، "تزریق در سنگ با تاکید بر ساختگاه سد"، چاپ اول، انتشارات سیمای دانش، تهران، ص ۲۷۵-۳۱۰.
۲. قادری س.، (۱۳۹۲)، "بررسی بحران کم آبی و آلودگی آب در دودخانه زاینده رود" اولین همایش بحران آب، اصفهان.
۳. معاریان ح.، (۱۳۸۱)، "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۱۵-۳۱۴.
۴. افشار حرب ع.، (۱۳۷۳)، "زمین شناسی کپه داغ"، چاپ اول، انتشارات سازمان زمین شناسی، شماره ۱۱، ص ۲۷۵-۲۸۶.
۵. عابدی کوپایی ج.، (۱۳۷۰)، پایان نامه ارشد: "بررسی عوامل موثر بر زیرفشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۶. شمسایی ا.، (۱۳۸۴)، "آشکارسازی و مقابله با نشت از سدها"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ص ۱۸۴.
۷. خلیلی شایان ح.، تکلدانی ا.، (۱۳۹۱)، "برآورد آزمایشگاهی و عددی نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی در شرایط حضور دیوار سپری و بلانکت در طراحی بندهای انحرافی"، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه.
۸. عباسی م.، غفوری م.، (۱۳۸۵)، "تزریق پذیری و نفوذپذیری ساختگاه سد اراک"، دهمین همایش انجمن زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.
۹. طاحونی ش.، (۱۳۷۶)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک خاک"، جلد اول، چاپ پنجم، انتشارات فروزش، تهران.
۱۰. حبیبی م.، (۱۳۷۴)، "مدلهای فیزیکی و هیدرولیکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ص ۲۱۰.
۱۱. حیدری نژاد ق.، (۱۳۷۶)، "مدلهای هیدرولیکی و فیزیکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۸۰-۱۵.
۱۲. صدر کریمی ج.، کیا م.، (۱۳۸۵)، "ارزیابی مدل مور-کلمب و خزشی خاک نرم در پیش بینی نشت سدهای خاکی"، مجله دانشکده فنی تبریز، دوره ۳۲، شماره ۳، ص ۱-۱۵.
۱۳. معاونت برنامه ریزی و راهبردی جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۷۸)، "استانداردهای مهندسی آب کشور، راهنمای تزریق در سازه های آبی"، نشریه شماره ۱۸۶.

۱۴. پوراسکندری س، (۱۳۹۱)، "بررسی آزمایشگاهی و عددی پرده آبنند بر روی نشت از پی‌های مطابق در سدها"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۱۵. قبادیان ر، خدایی ک، (۱۳۸۸)، "تاثیرات دیوار آبنند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود"، نشریه آب و خاک جلد ۲۳، شماره ۴، دانشگاه فردوسی مشهد.
۱۶. صدقی اصل م، رحیمی ح، خالقی ح، (۱۳۸۴)، "اثر موقیت بهینه پرده آبنند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه های آبی با استفاده از مدل عددی"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۱۷. ابول پور ب، (۱۳۷۳)، پایان نامه ارشد: "روشهای برآورد تراوش، زیرفشار و زیرشویی در سازه‌های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
۱۸. صیادزاده ف، زمردیان م، (۱۳۸۶)، "آنالیز نشت از پی خاکهای لایه داربا استفاده از روش المان محدود"، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
۱۹. Bligh W.G. (1910), "dams barrages and wiers on porous foundations", engineering news, 64 (dec), 708.
۲۰. Yifeng C. and chuangbing z. (2008), "a numerical solution to seepage problems with complex drainage system", **computers and geotechniques. 35, 3, pp 383-393**
۲۱. Wong i.h. (2001), "methods of resisting hydrostatic uplift in substructures", **journal of tunneling and underground space teq. Vol 16. pp 77-86.**
۲۲. Harr, M. E., (1962), "**Groundwater and Seepage**", McGraw-Hill, New York.
۲۳. Lane E.W. (1935), "security from underseepage masonry dams on earth foundations", trans. **ASCE**, 1235 -1272.
۲۴. Pakbaz m.s. (2009), "evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkhe dam using 3-D seepage analysis and measurement", **journal of applied sciences, 9, 4, pp 724-730.**

- Opyrachal L. (2003), “application of fuzzy sets identify seepage path through dams”, **journal of hydraulic engineering** (ASCE), vol. **129**. pp **546-548**. .۲۵
- Sadeghi-asl M. rahimi H. khaleghi H. (2011), “laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes”, **experimental techniques**, (inpress). doi: 10.1111/j.1747-1567.2010.00692. .۲۶
- Jie y. (2004), “seepage analysis based on boundary-fitted coordinate transformation method”, **computer and geotechnics**. Vol **31**, 5, pp **279-283**. .۲۷

# Numerical analyses and Experimental Investigation of the cut off wall on the hydraulic gradient, uplift pressure and seepage from the diversion dam foundations.

## Abstract

In the last years a lot of problems about safety and stability of diversion dams and seepage through dam foundation has been created. Also occurrence of piping at the downstream of diversion dams and destruction of the bed is considerable. Construction of cut off and concrete apron under the water structures are the effective alternatives in order to control of seepage discharge and piping.

In this study using the experimental model for different positions of cut off and apron at several upstream heads, outlet gradient, seepage discharge and uplift forces were investigated. In order to verify numerical results software of Geo studio 2007 (seep/w) was used. Result showed that using the downstream apron compare to upstream apron was more appropriate to control seepage.

Also apron with cut off at the downstream and upstream showed the best result in control of the outlet gradient, seepage discharge and uplift force so that at the head of 52cm, relative error for this model was 2% and 8%, respectively. In experimental model, the seepage discharge for the main model, model apron and model with cut off was measured about 302,175 and 222, respectively. Simulation results of the uplift force for the model with apron and foundation cut off and the model with apron and cut off at the end had relative error about 8%.

Result showed that numerical model had good agreement with experimental model so that the relative error was less than  $\pm 10\%$ . According to results of this study in order to simulate moving of water through the soil with acceptable precision can use the seep/w software.

**Key words:** diversion dam, outlet gradient, uplift force, seepage discharge, apron, cut off, piping, seep/w



Shahrood University of Technology

faculty Agriculture

M.Sc.Thesis in Water Structures Engineering

Numerical analyses and Experimental Investigation of the cut off wall on  
the hydraulic gradient, uplift pressure and seepage from the diversion dam  
foundations

By:Seyyed Mostafa Ashrafi

Supervisor:

Dr. Khalil Azhdari

Adviser:

Dr. Samad Emamgholizadeh

Dr. Seyyed Hossein Hosseini

January 2017