

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : کشاورزی

گروه : آب و خاک

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آبند (cutoff) بر روی گرادیان
هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و تراوش از زیر سدهای خاکی

عبدالصالح حجتی

اساتید راهنما :

دکتر خلیل اژدری

دکتر سید حسین قریشی

۱۳۹۳ استاد مشاور

دکتر صمد امامقلی زاده

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۳

تشکر و قدردانی

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش را، نمونه‌مان شد و به بهمن‌شینی رهروان علم و دانش

مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزمان ساخت.

از اساتید گرامیم جناب آقایان دکتر ارژدی، دکتر قریشی و دکتر امامت‌علی زاده بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی‌های

ایشان تاین این پایان نامه بسیار مشکل نمی‌نمود.

تعهد نامه

اینجانب عبدالصالح حجتی 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 خاکی تحت راهنمایی دکتر اژدري، دکتر قریشی و دکتر امامقلی زاده 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 افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه مسائل مربوط به ایمنی و پایداری سدهای خاکی که با هزینه‌های هنگفت به بهره برداری رسیده‌اند، دارای اهمیت خاصی می‌باشند. بسیاری از مخازن سدهای ساخته شده دارای مشکلات ناشی از نشت می‌باشند. احداث پرده‌های آب‌بند در زیر سازه‌های آبی از مؤثرترین روش‌ها جهت افزایش طول خزش و کاهش میزان دبی نشت می‌باشد. هدف از این تحقیق یافتن روابطی جهت تاثیر عمق، مکان و زاویه مناسب برای پرده‌های آب‌بند می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقدار نشت و فشار پیژومتری برای حضور یک دیوار آب‌بند در ابتدای سد برای تعداد ۲۰ اختلاف هد بالادست و پایین دست و سه طول متفاوت سد با یک نوع خاک پی سد به تعداد ۶۳ داده آزمایشگاهی برداشت گردید. نتایج بدست آمده جهت صحت‌سنجی مدل عددی ۲۰۰۷ seep/w استفاده شد و نشان داد مدل عددی تطابق قابل قبول با داده‌های آزمایشگاهی دارد. مقادیر دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی از مدل عددی به تعداد ۴۰۰۰ داده برای یک پرده آب‌بند و دو پرده در ۴ عمق مختلف، ۷ مکان، ۱۱ زاویه، ۴ اختلاف هد بالادست و پایین دست از نرم افزار استخراج گردید. نتایج نشان داد بهترین مکان برای کاهش دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی یکی در پاشنه و دیگری در پنجه سد می‌باشد که رابطه‌های بدون بعد برای تاثیر عمق، زاویه و مکان پرده‌های آب‌بند روی دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و طول معادل نشت آب ارائه گردید. همچنین نتایج نشان داد طول خزشی که از تئوری‌های لین و بلای استخراج می‌شود صرفاً برای محیط‌های آزمایشگاهی مناسب بوده و در زیر سدهای خاکی حل عددی معادلات ریچاردز و لاپلاس به روش اجزای محدود از دقت بسیار بالایی برخوردارند. به منظور مطالعه روش عددی از نتایج اندازه گیری نرم افزار seep/w از بسته ۲۰۰۷ GeoStudio استفاده گردید.

کلمات کلیدی: دیوار آب‌بند، سدهای خاکی، گرادیان خروجی، نشت، seep/w

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت تحقیق	۳
۱-۳- اهداف پایان نامه	۵
فصل دوم پیشینه تحقیق	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۱-۱-۲- تقسیم بندی سدها از نظر جنس مصالح مصرفی	۱۰
۱-۱-۱-۲- سدهای خاکی و سنگریزه ای	۱۰
۲-۱-۱-۲- سدهای بتنی وزنی	۱۱
۳-۱-۱-۲- سدهای بتنی قوسی	۱۲
۲-۱-۲- نشست از پی سد	۱۳
۲-۲- مفاهیم اولیه	۱۵
۱-۲-۲- معادلات حاکم در محیط متخلخل	۱۵
۲-۲-۲- طول خزش	۱۷
۱-۲-۲-۲- تئوری بلای	۱۷
۲-۲-۲-۲- تئوری لین	۱۸
۳-۲-۲-۲- تئوری خوسلا	۱۹
۳-۲-۲- ترسیم شبکه جریان	۲۰
۴-۲-۲- پدیده گرادیان بحرانی	۲۱

۲۳	۳-۲- روشهای کاهش نشت آب در زیر سد خاکی
۲۳	۳-۲-۱- دیوارهای سپری
۲۴	۳-۲-۱-۱- آسترها و پوششها
۲۴	۳-۲-۱-۲- دیوار خاکی متراکم شده
۲۵	۳-۲-۱-۳- دیواره های بتنی
۲۵	۳-۲-۱-۴- دیوار با شمع های صفحه ای
۲۵	۳-۲-۱-۵- دیوارهای گلی
۲۶	۳-۲-۱-۶- تزریق
۳۲	۳-۲-۲- زهکشها
۳۳	۳-۲-۴- مروری بر مطالعات انجام شده
۳۳	۳-۲-۴-۱- مطالعات براساس صحت قانون داری (سرعت کم جریان آب در محیط متخلخل)
۳۶	۳-۲-۴-۲- مطالعات در شرایط غیر داری (سرعت زیاد جریان آب در محیط متخلخل):
۳۹	فصل سوم مواد و روشها
۴۰	۳-۱- مقدمه
۴۰	۳-۲- معادله لاپلاس
۴۲	۳-۳- حل تحلیلی معادله لاپلاس
۴۶	۳-۴- حل عددی حرکت آب در خاک با مدل عددی seep/w
۴۶	۳-۴-۱- معرفی نرم افزار seep/w
۴۸	۳-۴-۲- تنظیمات اولیه صفحه نمایش
۵۲	۳-۴-۳- انتخاب نوع تحلیل و معیار های همگرایی
۵۳	۳-۴-۴- تعیین خصوصیات فیزیکی مدل

۵۴	 (Saturated Only) خاک اشباع ۱-۴-۴-۳
۵۵	 (Saturated / Unsaturated) خاک اشباع / غیر اشباع ۲-۴-۴-۳
۵۷	 (Interface) خاک غیر قابل نفوذ ۳-۴-۴-۳
۵۸	 ترسیم هندسه مدل ۵-۴-۳
۶۲	 اختصاص دادن Material به منطقه یا خط و مش بندی ۶-۴-۳
۶۳	 اختصاص شرایط مرزی ۷-۴-۳
۶۵	 قرائت و اندازه گیری دبی ۸-۴-۳
۶۷	 اجرای مدل ۹-۴-۳
۶۷	 مشاهده نتایج ۱۰-۴-۳
۷۰	 مدل عددی جریان بدون حضور پرده آببند ۱-۱۰-۴-۳
۷۱	 مدل جریان با حضور یک پرده آببند در ابتدای سد ۲-۱۰-۴-۳
۷۳	 مدل جریان با حضور یک پرده آببند در وسط سد ۳-۱۰-۴-۳
۷۴	 مدل جریان با حضور یک پرده آببند در انتهای سد ۴-۱۰-۴-۳
۷۵	 مدل آزمایشگاهی ۵-۳
۷۸	 مشاهده‌های آزمایشگاهی ۶-۳
۷۸	 پرده آببند ابتدای سد و طول سد ۶۱ سانتی متر ۱-۶-۳
۷۹	 دبی نشت ۱-۱-۶-۳
۸۱	 زیر فشار با حضور یک پرده آببند ۲-۱-۶-۳
۸۲	 صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۶۱ سانتی متر) ۳-۱-۶-۳
۸۳	 پرده آببند ابتدای سد و طول سد ۷۸/۳ سانتی متر ۲-۶-۳
۸۳	 دبی نشت ۱-۲-۶-۳
۸۶	 زیر فشار با حضور یک پرده آببند (طول سد ۷۸/۳) ۲-۲-۶-۳

- ۳-۶-۲-۳- صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۷۸/۳ سانتی متر)..... ۸۷
- ۳-۶-۳- کات آف ابتدای سد و طول سد ۹۲/۸ سانتی متر..... ۸۸
- ۳-۶-۳-۱- دبی نشت..... ۸۹
- ۳-۶-۳-۲- زیر فشار با حضور یک پرده آببند..... ۹۱
- ۳-۶-۳-۳- صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۹۲/۸ سانتی متر)..... ۹۲

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۹۳

- ۴-۱- مقدمه..... ۹۴
- ۴-۲- نتایج حل عددی با حضور یک پرده آببند..... ۹۵
- ۴-۲-۱- تغییرات دبی نشت با حضور یک پرده آببند..... ۹۶
- ۴-۲-۲- تغییرات طول خزش جریان آب در زیر سد..... ۹۷
- ۴-۲-۳- ارزیابی طول معادل مسیر لین و بالای..... ۹۸
- ۴-۲-۴- تاثیر یک پرده آببند بر گرادیان خروجی..... ۹۹
- ۴-۲-۵- تاثیر پرده آببند بر نیروی زیر فشار..... ۹۹
- ۴-۳- نتایج حل عددی با حضور دو پرده آببند زیر سد..... ۱۰۱
- ۴-۳-۱- تغییرات دبی نشت با حضور دو پرده آببند..... ۱۰۲
- ۴-۳-۲- تغییرات طول معادل جریان آب با حضور دو پرده آببند در زیر سد..... ۱۰۳
- ۴-۳-۳- تاثیر دو پرده آببند بر گرادیان خروجی..... ۱۰۵
- ۴-۴- نتایج حل عددی با حضور یک پرده آببند زاویه دار زیر سد..... ۱۰۷
- ۴-۴-۱- تغییرات دبی نشت با حضور یک پرده آببند زاویه دار..... ۱۰۸
- ۴-۴-۲- تغییرات طول خزش با تغییر زاویه آببند..... ۱۰۹
- ۴-۵- نتایج حل عددی با حضور دو پرده آببند زاویه دار..... ۱۱۲

- ۴-۵-۱- تغییرات دبی نشت با حضور دو پرده آببند زاویه دار ۱۱۳
- ۴-۵-۲- تغییرات گرادیان خروجی نسبت به زوایای آببندهای ابتدایی و انتهایی ۱۱۶
- ۴-۵-۳- طول معادل خزش در پی هایی با دو پرده آببند زاویه دار ۱۱۷
- ۴-۶-۱- تعیین موقعیت بهینه مکانی پرده آببند ۱۲۰
- ۴-۶-۲- تعیین اثر نسبت ضریب نفوذ پذیری افقی به قائم (k_x/k_y) بر دبی نشت ۱۲۱
- ۴-۶-۳- تعیین اثر نسبت ضریب نفوذ پذیری افقی به قائم (k_x/k_y) بر گرادیان هیدرولیکی ۱۲۳
- ۴-۶-۴- تغییرات دبی نشت با زاویه دار شدن خاک ناهمسان ۱۲۵
- ۴-۶-۵- تغییرات kh/q (طول معادل مسیر جریان) با زاویه دار شدن خاک غیر همگن ۱۲۷
- فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۲۹
- ۵-۱- نتایج ۱۳۱
- ۵-۲- پیشنهادها ۱۳۲
- مراجع و منابع ۱۳۶

فهرست جداول

شماره صفحه

- جدول ۳-۱- مشاهده‌های آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۶۱ سانتی متر ۸۰
- جدول ۳-۲- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیژومتری با طول مدل سد ۶۱ سانتی متر ۸۱
- جدول ۳-۳- مشاهده‌های آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۷۸/۳ سانتی متر ۸۵
- جدول ۳-۴- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیژومتری با طول مدل سد ۷۸/۳ سانتی متر ۸۶
- جدول ۳-۵- مشاهده‌های آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۹۲/۸ سانتی متر ۹۰
- جدول ۳-۶- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیژومتری با طول مدل سد ۹۲/۸ سانتی متر ۹۱

- شکل ۱-۲- نمای کلی از سد خاکی ۱۱
- شکل ۲-۲- نمای شماتیک سد بتنی وزنی ۱۲
- شکل ۳-۲- نمای کلی سد بتنی قوسی ۱۳
- شکل ۴-۲- نشت آب در پایاب سد ۱۴
- شکل ۵-۲- رانش مصالح بر اثر پدیده رگاب ۱۴
- شکل ۶-۲- نشت آب در بدنه سد ۱۵
- شکل ۷-۲- پارامترهای مورد استفاده در محاسبات ۱۷
- شکل ۸-۲- مقایسه نیروی زیر فشار بین تئوری بلای و خوسلا ۱۹
- شکل ۹-۲- تصویر شبکه جریان در زیر یک دیوار سپری ۲۰
- شکل ۱۰-۲- محدوده ایجاد پدیده گرادیان بحرانی ۲۲
- شکل ۱۱-۲- تصویر شماتیک پرده آببند ۲۳
- شکل ۱۲-۲- پتوی ناتراوا در بالادست ۲۴
- شکل ۱۳-۲- اجرای دیوار آببند بنتونیتی ۲۶
- شکل ۱۴-۲- اجرای دیوار آببند با ملات دوغاب ۲۷
- شکل ۱۵-۲- رابطه نوع خاک و نوع پرده آببند تزریقی (طاحونی، ۱۳۷۶) ۲۸
- شکل ۱۶-۲- دستگاه هیدروفرز جهت حفاری دیوار آببند (مهلب قدس، ۱۳۷۴) ۲۸
- شکل ۱۷-۲- دستگاه کلمشل جهت حفار دیوار آببند (مهلب قدس، ۱۳۷۴) ۲۹
- شکل ۱۸-۲- تاثیر عمق پرده آببند بر کاهش دبی نشت (هار، ۱۹۶۲) ۲۹
- شکل ۱۹-۲- تاثیر عمق پرده آببند، طول بلانکت و مکان پرده آببند بر فاکتور q/kh (هار، ۱۹۶۲) ۳۰
- شکل ۲۰-۲- اجرای پرده آببند در سد serre-poncon در فرانسه ۳۰

- شکل ۲-۲۱- اجرای پرده آببند در سد mattmark سوئیس ۳۱
- شکل ۲-۲۲- اجرای پرده آببند در سد duralassboden استرالیا ۳۱
- شکل ۲-۲۳- اجرای پرده آببند در سد high aswan مصر ۳۱
- شکل ۲-۲۴- زهکش افقی در پاشنه سد خاکی ۳۲
- شکل ۲-۲۵- زهکش افقی و مایل در زیر سد خاکی ۳۲
- شکل ۲-۲۶- نحوه استقرار زهکش لوله ای زیر سد ۳۳
- شکل ۲-۲۷- ترانشه زهکش در پاشنه سد ۳۳
- شکل ۳-۱ - صفحه اولیه نرم افزار Seep/w ۴۸
- شکل ۳-۲- تعیین اندازه صفحه کار جهت مدل سازی ۴۹
- شکل ۳-۳- انتخاب سیستم واحدی، محدوده ابعاد افقی و قائم صفحه و وزن مخصوص آب ۵۰
- شکل ۳-۴- نمایش نقاط کمکی جهت شبکه بندی ۵۰
- شکل ۳-۵- ویرایش فرم و نام محور های افقی و قائم جهت ترسیم ۵۱
- شکل ۳-۶- تعیین طول و تعداد بازه های محور های افقی و قائم ۵۱
- شکل ۳-۷- تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره Type و انتخاب اعداد سعی و خطا و مقدار خطای انتخابی در هر گام ۵۲
- شکل ۳-۸- تعریف خاک جدید ۵۳
- شکل ۳-۹- تعریف خاک در شرایط اشباع ۵۵
- شکل ۳-۱۰- تعریف رابطه بین عبور دهی هیدرولیکی با فشار آب حفره ای در خاک های نیمه اشباع ۵۶
- شکل ۳-۱۱- تعریف رابطه بین ضریب ذخیره ویژه با فشار آب حفره ای ۵۶
- شکل ۳-۱۲- تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ ۵۷
- شکل ۳-۱۳- تعریف مختصات نقاط ۵۸
- شکل ۳-۱۴- منوی Draw و انتخاب Points برای جانمایی دستی نقاط ۵۹

- شکل ۳-۱۵- منوی Lines برای مشخص کردن خط بین نقاط با داشتن شماره نقاط ۶۰
- شکل ۳-۱۶- منوی Regions برای مشخص کردن منطقه بین نقاط با داشتن شماره نقاط ۶۰
- شکل ۳-۱۷- نوار Draw و انتخاب Regions و Lines برای مشخص کردن منطقه و خط بین نقاط ... ۶۱
- شکل ۳-۱۸- پنجره Mesh Properties از نوار Draw برای مش بندی ۶۳
- شکل ۳-۱۹- اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی ۶۴
- شکل ۳-۲۰- تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی ۶۵
- شکل ۳-۲۱- رسم Flux Sections با استفاده از مختصات نقاط ۶۶
- شکل ۳-۲۲- رسم Flux Sections با استفاده از نشانگر موس ۶۷
- شکل ۳-۲۳- منوی Draw Contours برای شخصی سازی و انتخاب کن تور ها ۶۸
- شکل ۳-۲۴- پنجره Draw Garph برای رسم نمودار های مختلف ۶۹
- شکل ۳-۲۵- خطوط جریان و افت پتانسیل بدون پرده آب بند ۷۰
- شکل ۳-۲۶- زیر فشار عدم حضور پرده آب بند ۷۰
- شکل ۳-۲۷- گرادیان خروجی عدم حضور پرده آب بند ۷۱
- شکل ۳-۲۸- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور پرده آب بند در ابتدای سد ۷۱
- شکل ۳-۲۹- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرده آب بند در ابتدای سد ۷۲
- شکل ۳-۳۰- گرادیان خروجی با حضور کات آف در ابتدای سد ۷۲
- شکل ۳-۳۱- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور پرده آب بند در وسط سد ۷۳
- شکل ۳-۳۲- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرد آب بند در وسط سد ۷۳
- شکل ۳-۳۳- گرادیان خروجی با حضور پرده آب بند در وسط سد ۷۴
- شکل ۳-۳۴- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور کات آف در انتهای سد ۷۴
- شکل ۳-۳۵- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرده آب بند در انتهای سد ۷۵
- شکل ۳-۳۶- گرادیان خروجی با حضور پرده آب بند در انتهای سد ۷۵

- شکل ۳-۳۷- ابعاد مدل آزمایشگاهی و محل قرارگیری پیزومترها ۷۷
- شکل ۳-۳۸- مدل در حال انجام آزمایش ۷۷
- شکل ۳-۳۹- منحنی دانه بندی خاک پی مدل ۷۸
- شکل ۳-۴۰- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۶۱ سانتیمتر ۷۹
- شکل ۳-۴۱- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و عددی ۸۲
- شکل ۳-۴۲- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۷۸/۳ سانتیمتر ۸۳
- شکل ۳-۴۳- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار عددی ۸۷
- شکل ۳-۴۴- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۷۸/۳ سانتیمتر ۸۸
- شکل ۳-۴۵- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار عددی ۹۲
- شکل ۴-۱- پارامترهای مورد استفاده ۹۵
- شکل ۴-۲- تغییرات دبی نشت با حضور کات آف در طول زیر سد ۹۶
- شکل ۴-۳- تغییرات kh/q با حضور پرده آببند در طول زیر سد ۹۷
- شکل ۴-۴- تغییرات طول مسیر لین و بالای نسبت به طول واقعی kh/q ۹۸
- شکل ۴-۵- تغییرات گرادیان خروجی با حضور پرده آببند در طول زیر سد ۹۹
- شکل ۴-۶- تغییرات نیروی زیر فشار با حضور دیوار سپری در طول زیر سد ۱۰۰
- شکل ۴-۷- پارامترهای مورد استفاده در دو دیوار آببند قائم ۱۰۱
- شکل ۴-۸- نسبت تغییرات دبی نشت در حالت وجود یک و دو پرده آببند به عدم حضور پرده آببند ۱۰۲
- شکل ۴-۹- تغییرات مقادیر لین و بالای در مقابل $\frac{kh}{q}$ با حضور دو پرده آببند قائم ۱۰۴
- شکل ۴-۱۰- تغییرات طول خزش با ثابت بودن آببند ابتدایی و تغییر مکان آببند انتهایی ۱۰۴
- شکل ۴-۱۱- تغییرات طول خزش با ثابت بودن آببند انتهایی و تغییر مکان آببند ابتدایی ۱۰۵
- شکل ۴-۱۲- تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به تغییر مکان پرده آببند اول ۱۰۶

- شکل ۴-۱۳- تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به تغییر مکان آببند دوم ۱۰۶
- شکل ۴-۱۴- پارامترهای مورد استفاده ۱۰۷
- شکل ۴-۱۵- تغییرات دبی نشت با تغییر زاویه پرده آببند ۱۰۸
- شکل ۴-۱۶- نسبت تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل طول خزش لین و بلای با حضور یک پرده آببند زاویه دار ۱۱۰
- شکل ۴-۱۷- تغییرات مقادیر لین و بلای در مقابل تغییر زاویه کات آف ۱۱۱
- شکل ۴-۱۸- تغییرات $\frac{kh}{q}$ نسبت به کسینوس زاویه پرده آببند ۱۱۱
- شکل ۴-۱۹- پارامترهای مورد استفاده جهت دو پرده آببند زاویه دار ۱۱۲
- شکل ۴-۲۰- تغییرات دبی بر اساس تغییرات کسینوس زاویه در مکان های مختلف کات آف
- ابتدایی $\cos(a_1)$ ۱۱۴
- شکل ۴-۲۱- تغییرات دبی بر اساس تغییرات کسینوس زاویه در مکان های مختلف کات آف
- انتهایی $\cos(a_2)$ ۱۱۴
- شکل ۴-۲۲- تاثیر سه بعدی زوایای دو پرده آببند بر روی دبی نشت ۱۱۵
- شکل ۴-۲۳- تاثیر زوایای پرده آببند بر گرادیان خروجی ۱۱۶
- شکل ۴-۲۴- تاثیر موقعیت مکانی و زاویه آببند انتهایی بر گرادیان ۱۱۷
- شکل ۴-۲۵- تغییرات طول خزش بلای با تغییر زاویه آببند بالادست و قائم بودن آببند پایین دست ۱۱۸
- شکل ۴-۲۶- تغییرات طول خزش لین با تغییر زاویه آببند پایین دست و قائم بودن آببند بالادست .. ۱۱۸
- شکل ۴-۲۷- تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل $\cos(a_1)$ ۱۱۹
- شکل ۴-۲۸- تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل $\cos(a_2)$ ۱۱۹
- شکل ۴-۲۹- پارامترهای مورد استفاده جهت یک پرده آببند در پی غیر ایزوتروپ ۱۲۰
- شکل ۴-۳۰- تغییرات q/q_0 در طول زیر سد با حضور پرده آببند در k_x/k_y مشخص ۱۲۱

- شکل ۴-۳۱- تغییرات q/q_0 در طول زیر سد با حضور پرده آببند در خاک ناهمسان ۱۲۲
- شکل ۴-۳۲- تغییرات گرادیان هیدرولیکی در پنجه و پاشنه سد با حضور پرده آببند ۱۲۲
- شکل ۴-۳۳- تغییرات q/q_0 نسبت به k_x/k_y با عمق مختلف پرده آببند در پاشنه سد ۱۲۳
- شکل ۴-۳۴- صحت سنجی مقادیر q/q_0 بدست آمده از فرمول در مقابل محاسبات عددی ۱۲۴
- شکل ۴-۳۵- تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به تغییرات k_x/k_y با پرده آببند در انتهای سد ۱۲۵
- شکل ۴-۳۶- صحت سنجی مقادیر i بدست آمده از فرمول در مقابل محاسبات عددی ۱۲۶
- شکل ۴-۳۷- تغییرات دبی نشت در مقابل افزایش زاویه خاک پی نسبت به افق ۱۲۷
- شکل ۴-۳۸- تغییرات q/q_0 نسبت به k_x/k_y با عمق ثابت آببند در پاشنه سد با زاویه پی نسبت به افق ۱۲۸
- شکل ۴-۳۹- تغییرات kh/q در مقابل افزایش زاویه خاک پی نسبت به افق ۱۳۰
- شکل ۴-۴۰- تغییرات kh/q نسبت به k_x/k_y با عمق ثابت پرده آببند در پاشنه سد با زاویه پی نسبت به افق ۱۳۰

فصل اول

کلیات

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 هزینه ها و فواید 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 می دهد 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 می تواند در انتخاب روش برداشت در شرایط مختلف منطقه و رودخانه موثر باشد و حداقل مشکلات را در بهره برداری ایجاد نماید (ساعتی، ۱۳۸۵).

سدها سازه هایی هستند که در مسیر رودخانه و برای ذخیره سازی منابع آب رودخانه ها احداث می شود. 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 سیستم‌های 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 زمینه‌های عمرانی و آبادی بر طرف نمایند و آثار و شواهد آن را نیز می‌توان در نقاط مختلف ایران درک نمود. علاوه بر آن بسیاری از آثار به جا مانده از این دوران‌ها در سرزمین‌های تابعه حکومت‌های ایران باستان نیز قابل مشاهده است (افشار، ۱۳۷۳).

۱-۲- ضرورت تحقیق

از آنجایی که سدها، به ندرت روی زمین‌های کاملاً ناتراوا ساخته می‌شوند، لذا در اغلب موارد جریان آب زیرزمینی وجود داشته و نشت آب بر کارایی و عملکرد صحیح سد کاملاً اثر می‌گذارد. به دلیل اختلاف بار آبی میان بالادست و پایین دست در سدهای خاکی، آب در محیط متخلخل پی و بدنه سد نفوذ کرده و به طرف پایین دست سد نشت می‌کند این تراوش باعث ایجاد نیروی زیرفشار، دبی نشت و گرادیان خروجی گردیده و باعث ایجاد تنش کششی و در نهایت منجر به لغزش و واژگون شدن سد می‌شود (خلیلی شایان و تکلدانی، ۱۳۹۱).

در تمامی سدهای خاکی وجود نشت آب غیرقابل اجتناب می‌باشد. فرسایش داخلی و رگاب^۱ مشکلات فراوانی را برای سازه‌های خاکی بخصوص سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بوجود می‌آورند. فرسایش داخلی حمل تدریجی ذرات ریز خاک توسط جریان آب می‌باشد که در حالت توسعه یافته موجب ایجاد یک آبراهه (pipe) در سازه خاکی می‌گردد. رگاب یکی از اصلی‌ترین علل خرابی سدها است و مطابق آمار موجود تا سال ۱۹۸۶، ۴۸ درصد از تخریب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بزرگ بر اثر

^۱ piping

رگاب بوده است. از این میان رگاب مصالح بدنه سد، به ویژه مصالح هسته، بالاترین درصد (۳۳٪) را به خود اختصاص داده است (صدرکریمی و کیا، ۱۳۸۵).

این پدیده در سدهای خاکی همگن بیشتر محتمل است. پدیده رگاب یک فرآیند فرسایشی پیشرونده می‌باشد که امکان وقوع آن در بدنه سد و همچنین در شالوده و یا هر دو وجود دارد. شروع رگاب از نقطه‌ای است که نشت آب در آنجا متمرکز شده و گرادیان هیدرولیکی نسبی برای شستن خاک مناسب باشد. یعنی در آن نقطه نیروی مقاوم خاک در برابر فرسایش، کمتر از تأثیر نیروی مخرب نشت آب در آن نقطه می‌باشد که در نتیجه ذرات می‌توانند جدا شده و همراه زه‌آب جابجا گردند. در این حالت مجرای بوجود آمده که بتدریج در امتداد جریان و در جهت گرادیان هیدرولیکی بزرگتر گسترش یافته و سرانجام به مخزن سد می‌رسد. هنگامی که این مجرا به نزدیکی‌های مخزن برسد، جریان شدید آب با سرعت زیاد ایجاد شده و فرصت هرگونه تصمیم‌گیری را سلب خواهد کرد. در زمان کوتاهی این مجرا بزرگتر شده و به تخریب کلی سد منجر خواهد شد (داسیلوا، ۲۰۰۶).

پرده‌های آب‌بند^۱، فیلترها و زهکش‌ها برای جلوگیری از نشت آب در بالادست و پایین‌دست هسته سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بکار برده می‌شوند. نظر به اینکه کشور ایران از لحاظ تعداد سدهای در دست اجرا، در دنیا مقام سوم را دارد و تعداد قابل توجهی از این سدها از نوع خاکی یا سنگریزه‌ای هستند، طرح و اجرای پرده‌های آب‌بند و فیلتر بهینه باعث حصول اطمینان بیشتر و صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی می‌گردد (پوراسکندری، ۱۳۸۸).

^۱ cutoff

۱-۳- اهداف پایان نامه

در سدهای خاکی که بر روی بستر خاکی احداث می گردند، به علت امکان نفوذ و نشت آب از بالادست به سمت پائین دست در زیر پی سد خاکی، می بایست با طراحی و اجرای هسته معکوس و یا پرده آببند، مسیر حرکت آب در زیر سد را افزایش داده تا با ایجاد افت فشار، امکان تراوش آب در پائین دست را به صفر رساند. در هسته معکوس، در زیر هسته سد و با شیب متقارن با آن و با مصالح مشابه مصالح هسته رسی، طراحی و اجرا صورت می گیرد. پرده آببند نیز که به صورت تیغه یا دیواره ای نفوذناپذیر در زیر هسته رسی اجرا می شود، معمولاً از مصالحی استفاده می شود که علاوه بر نفوذناپذیری در برابر جریان آب، دارای انعطاف پذیری مناسب به منظور جلوگیری از ترک خوردگی و یا گسیختگی ناشی از جابجائی ها و نیروهای احتمالی باشد. در این راستا معمولاً از مصالح رسی، بنتونیت، بتن پلاستیک و یا ترکیبی از موارد ذکر شده استفاده می شود. به منظور اجرای پرده آببند، معمولاً پس از حفر دیواره مربوطه، مصالح با قالب بندی یک درمیان اجرا تا قطعات اجرا شده به طور مطلوبی در یکدیگر ترکیب شوند (طاحونی، ۱۳۷۶).

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آببند بر روی گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیرفشار و تراوش از زیر سدهای خاکی می باشد. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیرفشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار می رود ایجاد دیواره های آببند می باشد. دیواره های آببند که غالباً نفوذناپذیر 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 آببند 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 آببند. در این

تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقدار نشت و فشار پیژومتری در ۴۸ نقطه از مدل آزمایشگاهی برای حضور یک دیوار آببند در ابتدای سد برای تعداد ۲۰ اختلاف هد بالادست و پایین دست و سه طول متفاوت سد با یک نوع خاک برداشت گردید. از نتایج بدست آمده جهت صحت سنجی مدل عددی که از حل عددی معادله لاپلاس در حالت دو بعدی و اشباع خاک به روش اجزای محدود می باشد استفاده شد. نتایج نشان داد مقادیر بدست آمده از روش حل عددی دارای دقت بالای می باشد. داده های عددی به تعداد ۴۰۰۰ عدد در حالات مختلف زیر بدست آمد:

- وجود یک پرده آببند در یک لایه خاک همسان.

- وجود یک پرده آببند در یک لایه خاک ناهمسان ($K_x \neq K_y$).

- وجود یک پرده آببند زاویه دار در یک لایه خاک همسان.

- وجود دو پرده آببند در یک لایه خاک همسان.

- وجود دو پرده آببند زاویه دار در یک لایه خاک همسان.

از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده جهت تعیین صحت مقادیر بدست آمده عددی استفاده شد. از ۴۰۰۰ داده حل عددی جهت ارائه روابطی برای تصحیح طول های خزش لین و بلای همچنین تعیین موقعیت مکانی بهینه و بهترین زاویه تاثیر پرده آببند در حالت های مذکور استفاده شد. نتایج نشان داد طول خزشی که از تئوری های لین و بلای استخراج می شود صرفاً برای محیط های آزمایشگاهی مناسب بوده و در زیر سدهای خاکی حل عددی معادلات ریچاردز و لاپلاس به روش اجزای محدود از دقت بسیار بالایی برخوردارند. همچنین بهترین مکان برای کاهش دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی یکی در پاشنه و دیگری در پنجه سد می باشد و زاویه ۳۰ درجه به سمت بالا دست برای سپر بالادست و ۳۰ درجه به سمت پایین

دست برای سپر پایین دست نسبت به حالت قائم سپر، بیشترین تاثیر را روی کاهش دبی و گرادیان خروجی دارد.

به منظور مطالعه روش عددی از نتایج اندازه گیری نرم افزار seep/w از بسته ۲۰۰۷ Geo Studio استفاده گردید.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

در این فصل به بررسی مطالعات انجام شده و تشریح مفاهیم اولیه مورد بحث اعم از نشت، زیر فشار و گرادیان خروجی پرداخته و سپس به بررسی روش‌های کاهش دبی نشت پرداخته، در انتها تحقیقات انجام شده در این زمینه ارائه شده است.

۱-۱-۲- تقسیم بندی سدها از نظر جنس مصالح مصرفی

۱-۱-۱-۲- سدهای خاکی و سنگریزه ای

این سدها با مصالح خاکی یا پاره سنگی اجرا شده و معمولاً با مقاطع دوزنقه‌ای شکل، طراحی و با شیب‌های ملایم در بالا دست و پایین دست به صورت عریض اجرا می‌گردند. بنابراین می‌توان گفت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به سدهایی اطلاق می‌گردد که از مصالح طبیعی موجود در طبیعت از قبیل خاک، سنگ، سنگریزه و ... تشکیل شده باشد و از هیچ گونه مصالح چسبنده طبیعی و غیر طبیعی در آن‌ها استفاده نشود و مقاومت کافی در برابر نیروها و تراوش آب از آن‌ها تنها با تراکم مصالح به وجود آید. با توجه به اینکه در سدهای ذکر شده، هم از مصالح خاکی و هم از مصالح سنگریزه‌ای استفاده می‌شود، تنها با توجه به درصد مصرفی هر یک از این مصالح، نوع سد مشخص می‌شود و وجه تمایز مشخصی را نمی‌توان برای آن مشخص کرد. شکل ۱-۲ نمای کلی از سد خاکی نمایش داده شده است. با این توصیف معمولاً اگر بیش از ۵۰٪ از حجم مواد جایگذاری شده سد را خاک متراکم تشکیل دهد، آن را سد خاکی گویند و در این گونه سدها، معمولاً تراوش و نفوذ آب توسط هسته‌های نفوذ ناپذیر و یا توسط خود بدنه کنترل و جلوگیری می‌شود، ولی در سدهای سنگریزه‌ای با توجه به اینکه نفوذ آب در

بدنه سد قابل کنترل نیست، این عمل توسط المانی دیگر که بر روی بدنه به عنوان المان ناتراوا و یا غشای نفوذ ناپذیر ساخته می شود، در نظر گرفته می شود. این المان ممکن است از مصالح مختلفی مثل بتن ریخته شده، بلوک های بتنی، آسفالت، ژئوممبرین و غیره باشد. در این گونه سدها، بدنه سد که از سنگریزه تشکیل شده است توسط غلتک های سنگین در لایه های کم ضخامت به شدت متراکم شوند. با توجه به خصوصیات مکانیک خاکی مصالح سنگریزه ای از جمله بالا بودن زاویه اصطکاک نسبت به مصالح خاکی می توان شیب شیروانی های بالا دست و یا مقاومت سدهای سنگریزه ای را کمتر از سدهای خاکی در نظر گرفت (شمسائی، ۱۳۸۴).

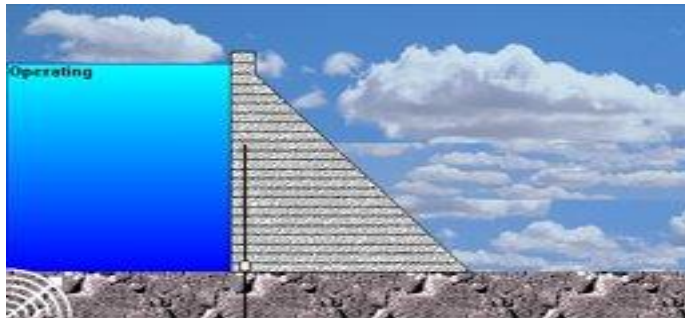


شکل ۲-۱- نمای کلی از سد خاکی

۲-۱-۱-۲- سدهای بتنی وزنی

این سدها عمدتاً کوتاه هستند و ارتفاع آنها بین ۱۵ تا ۲۰ متر می باشد، این سدها به دلیل وزن زیادی که با بتن برای آن بوجود می آورند بر اثر فشار آب حرکت نمی کند و از جای خود تکان نمی خورد. در این نوع سد سرریز شدن آب مشکلی ایجاد نمی کند این سدها در دره های عریض ساخته می شوند.

این نوع سد در برابر تغییر درجه حرارت نیز هیچگونه حساسیتی ندارد. شکل ۲-۲ نمای کلی از یک سد بتنی وزنی نشان داده شده است (شمسائی، ۱۳۸۴).



شکل ۲-۲- نمای شماتیک سد بتنی وزنی

۲-۱-۱-۳- سدهای بتنی قوسی

در شکل ۳-۲ نمایی از سدهای بتنی قوسی نشان داده شده است. این سدها معمولاً در دره‌های باریک با شیب زیاد و از جنس سنگ اجرا می‌گردد و می‌تواند دو قوسی نیز باشند و در راستای عمودی و افقی در دره دو حالت قوس داشته باشند. حسن این سدها این است که اگر به هر علتی در بدنه آنها ترک ایجاد شود خود نیروی فشار اعمالی از جانب آب پشت سد باعث هم آمدن این ترکها (ترکهای حرارتی) می‌شود (شمسائی، ۱۳۸۴).



شکل ۲-۳- نمای کلی سد بتنی قوسی

۲-۱-۲- 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 زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی طبقه بندی کرد. نیروی زیر فشار، 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^۱ 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

^۱. Piping.

غفوری، ۱۳۸۵). در شکل ۴-۲ نشت آب در پایاب سد نشان داده شده است. در شکل ۵-۲ رانش مصالح پایاب سد نشان داده شده است. در شکل ۶-۲ نشت آب در بدنه سد نمایش داده شده است.



شکل ۴-۲- نشت آب در پایاب سد



شکل ۵-۲- رانش مصالح بر اثر پدیده رگاب



شکل ۲-۶- نشت آب در بدنه سد

۲-۲- مفاهیم اولیه

۲-۲-۱- معادلات حاکم در محیط متخلخل

معادله عمومی جریان آب در خاکهای غیر همگن و غیر همسان بدون منبع تخلیه یا تغذیه که بنام معادله ریچاردز^۱ معروف است بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (۱-۲)$$

که در آن h بیانگر بارآبی، k_x ، k_y ، k_z به ترتیب نفوذپذیری خاک در جهت های X, Y, Z می باشد.

اگر جریان بصورت ماندگار باشد یعنی تغییرات حجم در واحد زمان صفر باشد ($\frac{\partial v}{\partial t} = 0$) در این صورت

معادله ریچاردز به صورت زیر تغییر می کند:

^۱ Richards equation

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (2-2)$$

در صورت وجود منبع تخلیه یا تغذیه در حجم کنترل داریم:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) - \frac{q}{dx.dy} \quad (3-2)$$

که در آن q مثبت نشان دهنده شرایط زهکشی و q منفی شرایط تغذیه را نشان می دهد.

اگر خاک همسان و همگن باشد و شرایط تخلیه یا تغذیه در حجم کنترل وجود نداشته باشد معادله

ریچاردز تبدیل به معادله سه بعدی لاپلاس^۱ می گردد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4-2)$$

با استفاده از قانون داریسی سرعت را به صورت زیر می توان نوشت:

$$v_x = -k_x . i_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_z = -k_z . i_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5-2)$$

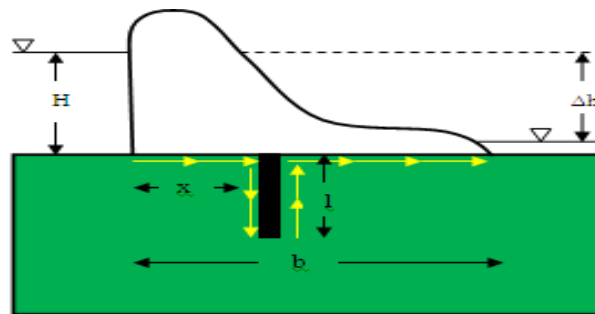
که در آن v_x سرعت حرکت آب در جهت افقی، v_z سرعت حرکت آب در جهت قائم، k_x, k_z به ترتیب

هدایت هیدرولیکی خاک در جهت های قائم و افقی، i_x, i_z نیز گرادیان هیدرولیکی در جهت های قائم و افقی

^۱ Laplace's equation

می‌باشد (شجاعی فرد و هشترودی، ۱۳۸۶). در شکل ۷-۲ پارامترهای مورد استفاده نشان داده شده است.

H اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست، x فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد می‌باشد.



شکل ۷-۲- پارامترهای مورد استفاده در محاسبات

۲-۲-۲- طول خزش

۲-۲-۲-۱- تئوری بلای

بلای^۱ (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 زیر فشار 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:

^۱.Bligh

$$L_x = \begin{cases} X, 0 \leq X \leq x \\ X + 2l, X > x \end{cases} \quad (۶-۲)$$

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

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 Δh اختلاف ارتفاع سطح آب در طرفین می باشد.

۲-۲-۲-۲- تئوری لین^۱

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 طول های افقی و ضریب 1 به مجموع طول های قائم، طول معادل را به صورت زیر تعریف کرد:

$$L_{eq} = \frac{1}{3} \sum L_H + \sum L_V \quad (۷-۲)$$

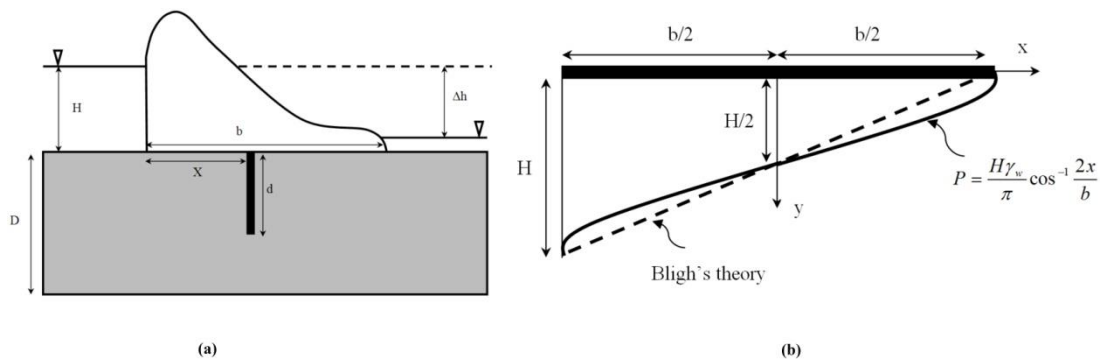
که در آن: $\sum L_H$ طول مسیر خزش افقی (و دیواره های کم شیب تر از 45° درجه) و $\sum L_V$ طول مسیر خزش قائم (و دیواره های پر شیب تر از 45° درجه) می باشد. در این روش نیز مشابه تئوری خزشی بلای، توزیع زیر فشار در زیر سد خطی فرض می شود.

^۱ Lane

۳-۲-۲-۲- تئوری خوسلا^۱

خوسلا و همکاران (۱۹۳۶)، توزیع واقعی فشار بالابرنده را با حل تابع پتانسیل مختلط با بهره گیری از نگاشت‌های همدیس ارائه کردند. ایشان شبکه جریان را در زیر یک سازه هیدرولیکی با بدنه صلب و نفوذناپذیر روی پی قابل نفوذ مورد بررسی قرار دادند. خطوط جریان به صورت بیضی‌های هم کانون و خطوط هم پتانسیل به فرم هذلولی‌های هم کانون فرض شد. رابطه پیشنهادی خوسلا جهت برآورد توزیع زیرفشار در هر نقطه مطابق شکل ۸-۲ به فاصله x از کف بند به طول $2b$ در شرایط عدم وجود دیواره سپری عبارت است از :

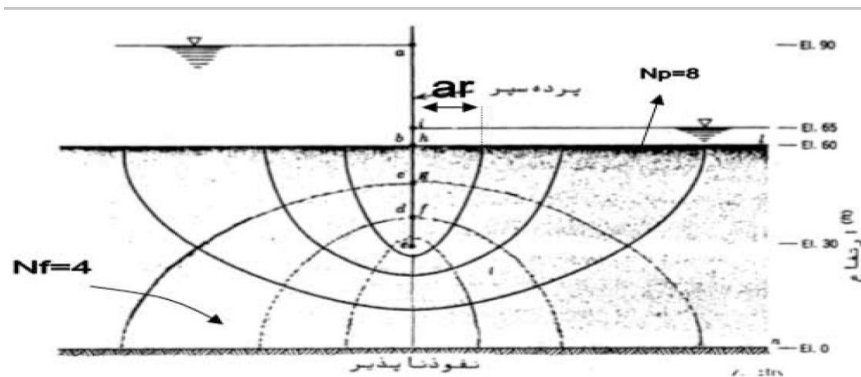
$$P = \frac{H\gamma_w}{\pi} \cos^{-1} \frac{2x}{b} : -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2} \quad (۸-۲)$$



شکل ۸-۲- مقایسه نیروی زیرفشار بین تئوری بلای و خوسلا

۳-۲-۲- ترسیم شبکه جریان

در شکل ۹-۲ 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).



شکل ۹-۲- تصویر شبکه جریان در زیر یک دیوار سپری

رابطه پیوستگی جریان برای یک محیط خاک ایزوتروپیک نشان دهنده دو خانواده منحنی عمود برهم است که نام یکی خطوط جریان و نام دیگری خطوط هم پتانسیل است. خط جریان^۱ خطی است که ذرات آب در امتداد آن از بالادست به پایین دست در خاک نفوذ پذیر جریان می یابند. خط هم پتانسیل^۲ خطی است که نقاط واقع در روی آن دارای یک انرژی پتانسیل می باشند. ترکیبی از تعدادی خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل، شبکه جریان نامیده می شود.

پس از رسم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل داریم:

$$q = kh \frac{N_f}{N_p} \quad (9-2)$$

^۱Flow line

^۲Equipotential line

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

۴-۲-۲- پدیده گرادیان بحرانی

در تمام جریان‌های ثقلی آب در داخل خاک نیروی نشت وجود دارد. آبی که در داخل خاک جریان می یابد نیرویی در جهت جریان به توده خاک وارد می سازد. این نیرو متناسب با شیب هیدرولیکی می باشد. شیب هیدرولیکی نیروئی است که آب را در داخل خاک تحت فشار قرار می دهد 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 :

$$\sigma' = \sigma - u \quad (۱۰-۲)$$

$$u = \gamma_w \cdot z \quad (۱۱-۲)$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot z \quad (۱۲-۲)$$

u فشار آب حفره ای σ' تنش موثر، σ تنش کل می باشد.

برای فشار ناشی از تراوش داریم:

$$h \cdot \gamma_w = i z \gamma_w \quad (13-2)$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot z - i z \gamma_w \quad (14-2)$$

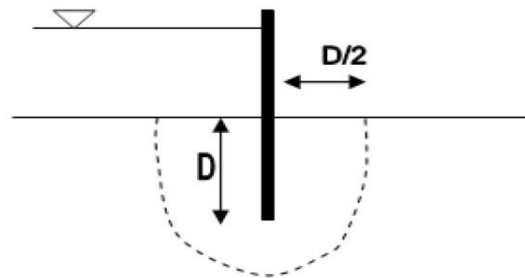
در صورتیکه فشار موثر صفر باشد یعنی گرادیان هیدرولیکی در سطح خروجی بحرانی باشد داریم:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (15-2)$$

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 $\frac{D}{4}$ از پایین دست کات آف رخ میدهد یعنی

مطابق شکل ۱۰-۲ در منشوری به عمق D و عرض $\frac{D}{4}$ (طاحونی، ۱۳۷۶).

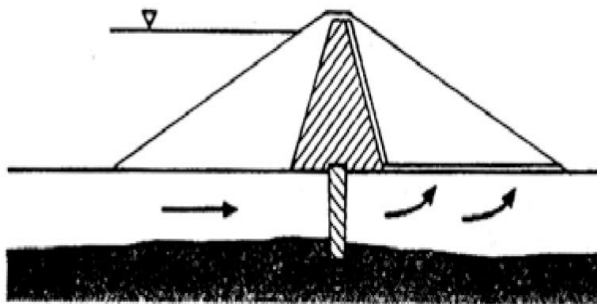


شکل ۱۰-۲ - محدوده ایجاد پدیده گرادیان بحرانی

۳-۲- روشهای کاهش نشت آب در زیر سد خاکی

۱-۳-۲- دیوارهای سپری

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



دیوار آب بند cut-off

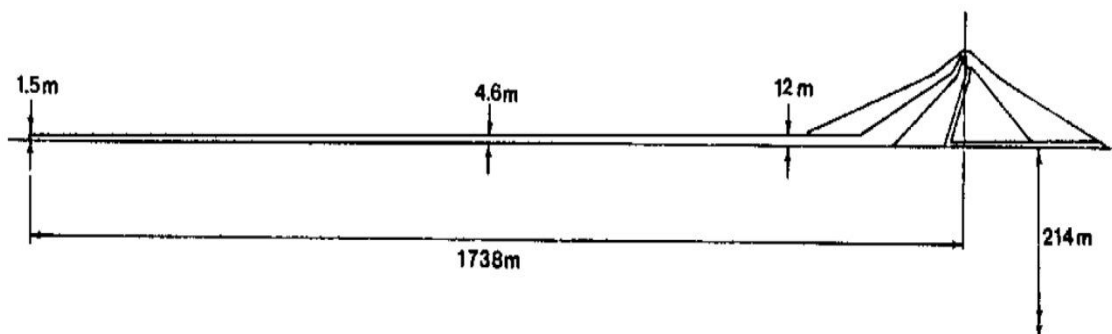
شکل ۱۱-۲- تصویر شماتیک پرده آببند

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

۲-۳-۱-۱- 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).



شکل ۲-۱۲- پتوی ناتراوا در بالادست

۲-۳-۱-۲- 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).

۳-۱-۳-۲- دیواره های بتنی

این نوع دیوار معمولاً در حفاری پی‌ها یا به عنوان پوشش داخل تونل‌ها، مخصوصاً در جاهایی که جلوگیری داریم 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.

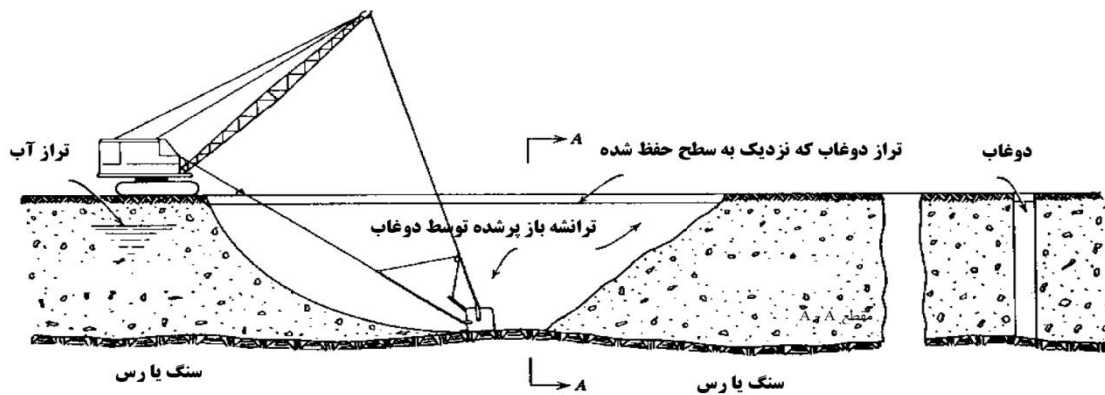
۳-۱-۴- دیوار با شمع‌های صفحه‌ای

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).

۳-۱-۵- 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 ۲-۱۳ 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).

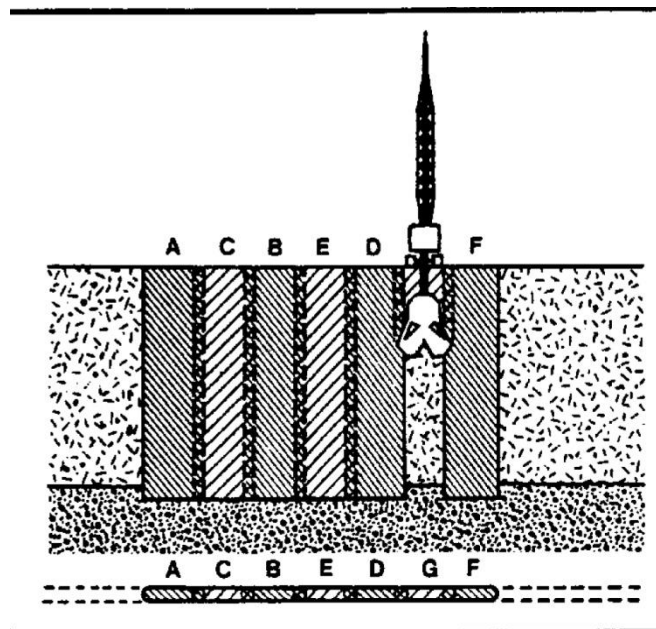


شکل ۲-۱۳- اجرای دیوار آب‌بند بنتونیتی

۲-۳-۱-۶- تزریق

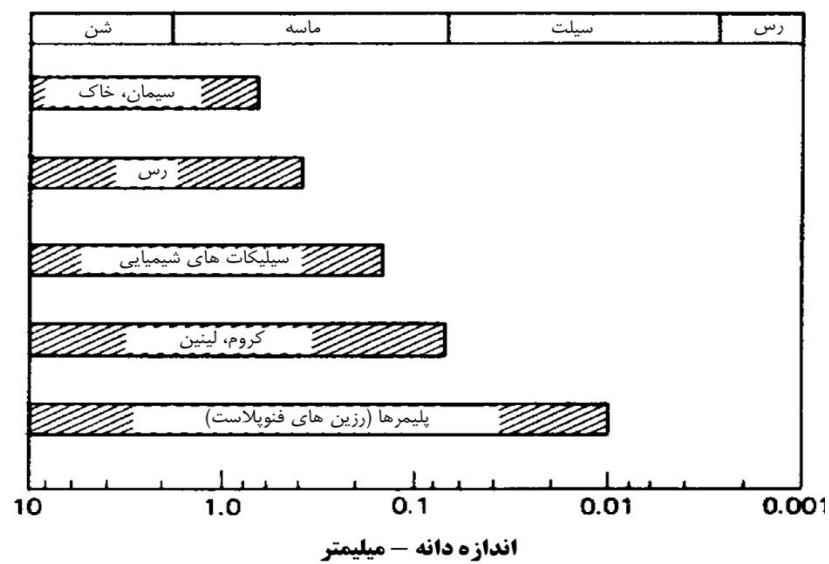
در شکل ۲-۱۴ روش اجرایی تزریق بصورت شماتیک ترسیم شده است. تزریق دوغاب به داخل خاکهای نفوذ پذیر و سنگ، روش رایج و دائمی برای جلوگیری از جریان آب زیرزمینی است. البته در اغلب موارد دیواری که به این ترتیب بوجود می‌آید کاملاً نفوذپذیر نیست. از تزریق همچنین برای افزایش مقاومت سنگ و خاک سود جسته می‌شود. دوغاب‌ها 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

گمانه ها و تزریق در آنها اغلب کافی است. پرده تزریق را می توان با افزودن رشته های دیگری از گمانه های تزریق شده ضخیم تر نمود. در سنگ های شکافدار یا جاهایی که جریان زیاد است، موفقیت عملیات تزریق کمتر است (نشریه استانداردهای مهندسی آب کشور، راهتمای تزریق در سازه های آبی، ۱۳۷۸).



شکل ۲-۱۴- اجرای دیوار آببند با ملات دوغاب

در شکل ۲-۱۵ رابطه نوع خاک و نوع پرده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود برای پی های ماسه ای از تزریق سیمان - خاک و رس، برای پی های سیلتی از تزریق کروم یا پلیمرها استفاده می شود. در شکل های ۲-۱۶ و ۲-۱۷ دستگاه های مورد استفاده جهت نصب پرده آببند یا تزریق نشان داده شده است. شکل های ۲-۱۸ و ۲-۱۹ نتایج آزمایشگاهی هار در سال ۱۹۶۲ برای تاثیر دیوار آببند بر فاکتورهای نشست نشان داده شده است.



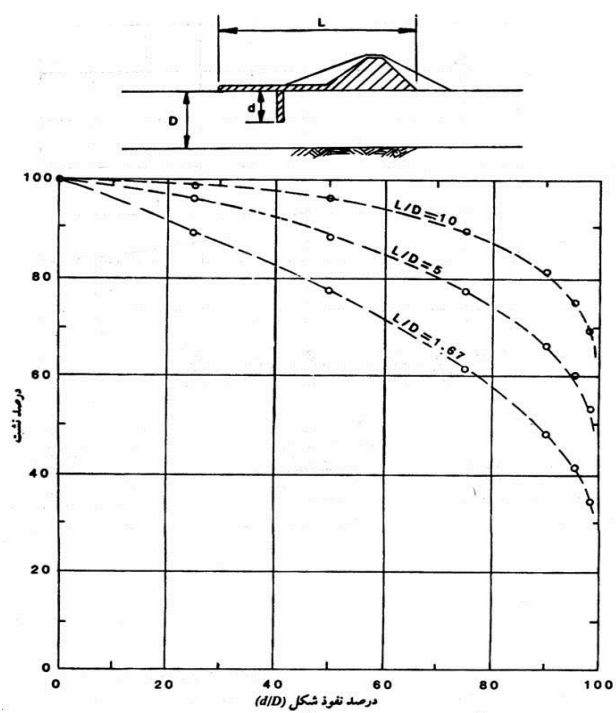
شکل ۲-۱۵- رابطه نوع خاک و نوع پرده آب بند تزریقی (طاحونی، ۱۳۷۶)



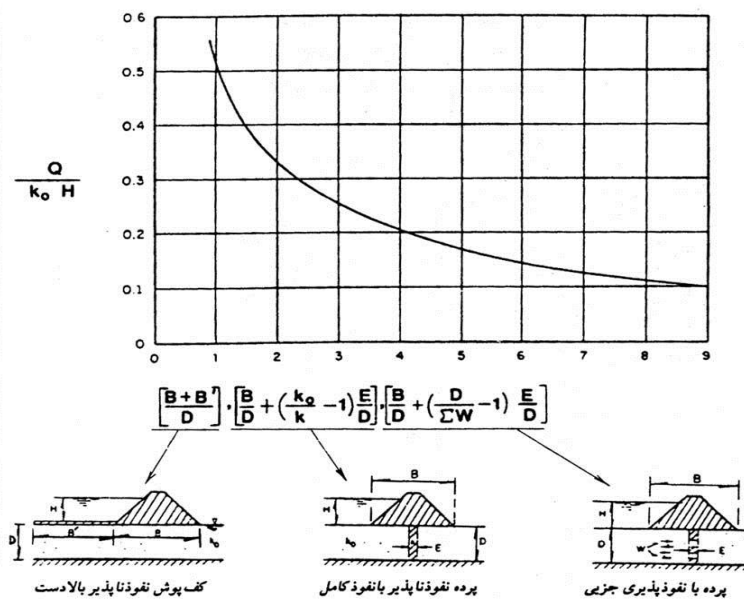
شکل ۲-۱۶- دستگاه هیدروفرز جهت حفاری دیوار آب بند (مهاب قدس، ۱۳۷۴)



شکل ۱۷-۲- دستگاه کلمشل جهت حفار دیوار آببند (مهتاب قدس، ۱۳۷۴)

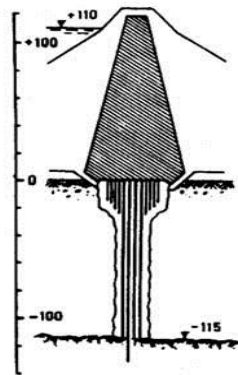


شکل ۱۸-۲- تاثیر عمق پرده آببند بر کاهش دبی نشت (هار، ۱۹۶۲)

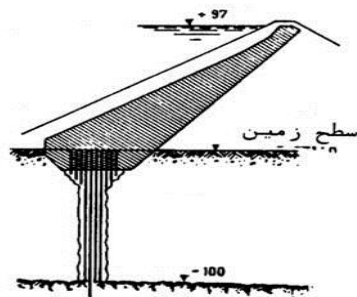


شکل ۲-۱۹- تاثیر عمق پرده آببند، طول بلانکت و مکان پرده آببند بر فاکتور q/kh (هار، ۱۹۶۲)

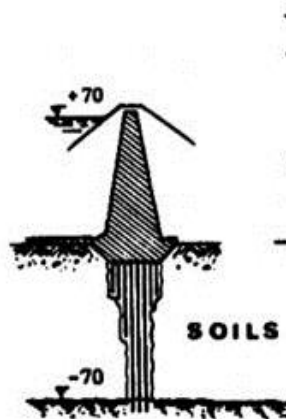
در شکلهای ۲-۲۰ و ۲-۲۱ و ۲-۲۲ و ۲-۲۳ انواع پرده های آببند اجرا شده در برخی از سدها نشان داده شده است.



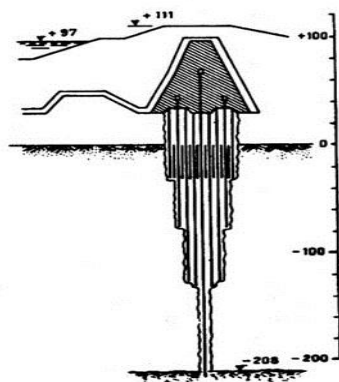
شکل ۲-۲۰- اجرای پرده آببند در سد serre-poncon در فرانسه



شکل ۲-۲۱- اجرای پرده آببند در سد mattmark سوئیس



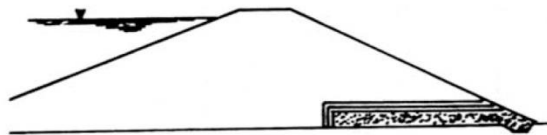
شکل ۲-۲۲- اجرای پرده آببند در سد duralassboden استرالیا



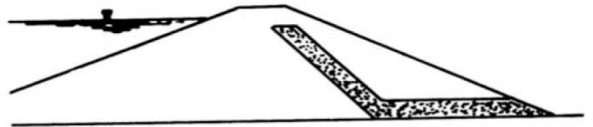
شکل ۲-۲۳- اجرای پرده آببند در سد high aswan مصر

۲-۳-۲- زهکشها

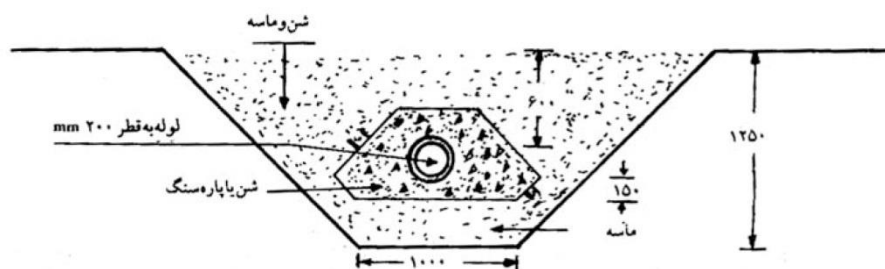
جهت خارج نمودن آب از رگاب‌های پی یا بدنه سد از زهکش‌ها استفاده می‌شود. معمولاً زهکش‌ها در پایین‌دست سد خاکی اجرا می‌شود تا زه درون بدنه و پی را خارج کند. مطابق شکل‌های ۲-۲۴ و ۲-۲۵ زهکش‌ها با چند طبقه فیلتر به خاک بدنه سد متصل می‌شود. طول و ضخامت زهکش باید بر اساس میزان متحمل زه و شرایط دیگر تعیین گردد شکل‌های ۲-۲۶ و ۲-۲۷ روش اجرایی نصب زهکش‌ها نشان داده شده است. (نشریه استانداردهای مهندسی آب کشور، راهتمای تزریق در سازه‌های آبی، ۱۳۷۸).



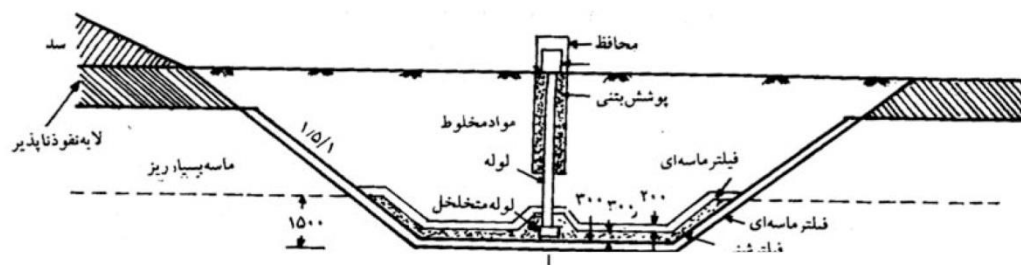
شکل ۲-۲۴- زهکش افقی در پاشنه سد خاکی



شکل ۲-۲۵- زهکش افقی و مایل در زیر سد خاکی



شکل ۲-۲۶- نحوه استقرار زهکش لوله ای زیر سد



شکل ۲-۲۷- ترانشه زهکش در پاشنه سد

۲-۴- مروری بر مطالعات انجام شده

۲-۴-۱- مطالعات براساس صحت قانون داریسی (سرعت کم جریان آب در محیط متخلخل)

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 45° درجه به عنوان طول‌های افقی و بالاتر از 45° درجه به عنوان طول‌های قائم در نظر گرفته می‌شود.

■ حسین خلیلی شایان و تکلدانی (۱۳۹۱)، به بررسی نیروی زیر فشار، گرا دیان 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 زیر فشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد.

■ 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 زیر فشار، 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 می‌باشد.

■ صیادزاده (۱۳۸۶)، آنالیز نشت از پی خاک‌های لایه دار با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار داد و بوسیله منحنی‌های بدون بعد اپسیلین ε پولوبارینوا-کوچینا دیاگرام‌های $\frac{kh}{q}$ را برای پی‌های سه لایه ترسیم نمود همچنین دبی نشت و گرا دیان خروجی را در پی‌های دو لایه و سه لایه نشان داد.

- 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.
- ساناز پوراسکندری (۱۳۹۱)، با 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 .
- ابول پور (۱۳۷۳)، مدلی را پیشنهاد کرد که زیرفشار وارد بر سازه های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد، مدل فوق در محاسبه زیرفشار و زیرشویی از روش‌های لین، بلای، خوسلا و شبکه جریان استفاده کرده و میزان خطای بدست آمده در مقایسه با داده‌های پیزومتریک سد درودزن حدود ۴ درصد بود.
- اپی رچال (۲۰۰۳)، نخستین بار روش منطق فازی را به منظور شناخت مسیر خط نشت درون سدها به کار برد.

- جای (۲۰۰۴)، با استفاده از روش تفاضل محدود مبتنی بر روش انتقال مختصات برازش مرزی به بررسی نشت از زیر سدها و فرازبندها به کمک معادله پوآسون پرداختند.
- صدقی اصل و همکاران (۲۰۱۱)، اثرات روش‌های مختلف کنترل اثرات نشت در زیر دایک‌های ساحلی را با بهره‌گیری از یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ایشان طول بهینه بلانکت و عمق بهینه دیواره‌های سپری را به گونه‌ای ارائه کردند که مقدار نیروی زیرفشار وارد بر دایک حداقل گردد. ایشان نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تئوری‌های بلای و لین در شرایط متناظر قیاس نموده و نتیجه گرفتند روش لین مقدار نیروی زیرفشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش بلای برآورد می‌کند.
- پاکباز و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل SEEP۳D به ارزیابی ساخت دیوار آب بند بتن پلاستیک در تکیه گاه راست و چپ سدخاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با ساخت دیوار آبد چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

۲-۴-۲- مطالعات در شرایط غیر داری (سرعت زیاد جریان آب در محیط متخلخل):

در حالتی که سرعت جریان آب در خاک زیاد باشد قانون داری فاقد اعتبار بوده و رابطه بین سرعت و شیب هیدرولیکی بصورت معادله دیفرانسیل غیرخطی می باشد. شکل عمومی این رابطه بصورت $V=a(i)^b$ می‌باشد.

رابطه عمومی غیر خطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در محیط اشباع و شرایط غیر داری بصورت زیر است:

$$v = ai^b \quad (22-2)$$

با جایگذاری رابطه فوق در معادله پیوستگی داریم:

$$\frac{\partial(ai_x^b)}{\partial x} + \frac{\partial(ai_y^b)}{\partial y} = 0 \quad \& \quad i_x = -\frac{\partial h}{\partial x}, \quad i_y = -\frac{\partial h}{\partial y} \quad (23-2)$$

معادله دیفرانسیلی حاکم بر نشت غیر داری بصورت زیر است:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^{b-1} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^{b-1} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (24-2)$$

- سامانی (۲۰۰۳) و لی (۱۹۹۸)، به تعیین ضرایب سرعت و گرادیان هیدرولیکی در شرایط غیرداری پرداختند.
- شفافی بجستانی (۱۳۹۰)، سرعت جریان آب در خاک در شرایط غیر داری را فاکتوری از جرم حجمی (ρ)، اندازه متوسط ذرات (d_{50})، لزجت مایع (μ)، تخلخل (N) و شیب هیدرولیکی (i) می‌داند.

فصل سوم

مواد و روشها

عملکرد سازه‌های هیدرولیکی باید قبل از اجرا در آزمایشگاه و در مقیاس کوچکتری مورد آزمایش قرار گیرد تا از بروز هرگونه خسارت و تخریب در سازه اصلی به دلیل عدم طراحی مناسب جلوگیری شود. علاوه بر این تا کنون برای بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی روابط ریاضی مشخصی یافت نشده و لازم است با بررسی این پدیده‌ها در آزمایشگاه، مکانیزم وقوع و چگونگی عملکرد آنها دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد و روابط تجربی نیز استخراج گردد (شفاعی بجستانی، ۱۳۹۰).

در این فصل ابتدا به تشریح معادله لاپلاس و حل تحلیلی و عددی آن پرداخته سپس توضیحاتی در مورد مدل آزمایشگاهی مورد استفاده که در آزمایشگاه ماشین‌های آبی دانشگاه شهید بهشتی (پردیس فنی شهید عباسپور) در مدل مخزن نشت و نفوذ مورد آزمایش قرار گرفت، آورده شده است و در نهایت تطبیق نرم افزار حل عددی مساله نشت آب در خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- معادله لاپلاس^۱

معادله لاپلاس معادله‌ای است دیفرانسیلی با مشتقات جزئی که از اهمیت و کاربرد فراوانی در ریاضیات، فیزیک، و مهندسی برخوردار است. علاوه بر مسئله نشت و حرکت آب در محیط اشباع خاک، به عنوان چند نمونه می‌شود به زمینه‌هایی همچون الکترومغناطیس و ستاره‌شناسی اشاره کرد که حل این معادله در آن‌ها کاربرد دارد (پاکباز، ۲۰۰۹).

در حالات سه بعدی می‌شود آن را به صورت زیر نمایش داد:

^۱ Laplace's equation

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (۱-۳)$$

همچنین بدین صورت نوشته می‌شود:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

یا

$$\text{Div grad} \phi = 0 \quad (۲-۳)$$

که div همان دیورژانس است و grad همان گرادیان، یا

$$\Delta \phi = 0$$

که Δ عملگر لاپلاس است.

جواب‌های معادله‌ی لاپلاس توابع همساز نامیده می‌شود.

اگر طرف راست، یک تابع سه متغیره $f(x, y, z)$ در نظر گرفته شود، برای مثال

$$\Delta \phi = f \quad (۳-۳)$$

این معادله، معادله پواسون نامیده می‌شود. معادله لاپلاس و پواسون ساده‌ترین مثال‌های معادلات

دیفرانسیل جزئی بیضوی‌اند. عملگر دیفرانسیل جزئی ∇^2 یا Δ (که شاید در هر بعدی تعریف شده باشد)

عملگر لاپلاس، لاپلاس نما نامیده می‌شود.

شرایط مرزی

در کل سه نوع شرایط مرزی وجود دارد: دیریکله، نویمان، کوشی.

- **شرط مرزی دیریکله** یعنی مقدار خود تابع روی مرز داده شده باشد.
- **شرط مرزی نویمان** یعنی مشتق عمود بر سطح تابع روی مرزها مشخص باشد.
- **شرط مرزی کوشی** به معنی مشخص بودن هم خود تابع و هم مشتق عمود بر سطح آن است.

برای معادله لاپلاس شرایط دیریکله یا نویمان کافی است. یعنی با در دست داشتن یکی از شرایط هم مقدار تابع به دست می‌آید و هم مشتق عمود آن و شرط مرزی کوشی برای این معادله اشتباه است.

جواب معادله لاپلاس در داخل مرزها تحلیلی است. اصل برهمنه‌ی در مورد جوابهای این معادله صادق است یعنی هر ترکیب خطی از جوابهای معادله خود نیز جواب معادله است (عظیمیان، ۱۳۷۷).

۳-۳- حل تحلیلی معادله لاپلاس

قسمت حقیقی و موهومی یک تابع تحلیلی مختلط، هر دو در معادله لاپلاس صدق می‌کند. اگر Z مختلط باشد و داشته باشیم:

$$f(z) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (۳-۴)$$

شرط لازم برای اینکه $f(z)$ تابع تحلیلی باشد این است که معادله‌ی کوشی ریمان را ارضا کند.

$$u_x = v_y \quad v_x = -u_y \quad (5-3)$$

این منجر می شود به:

$$u_{yy} = -(v_x)_y = -(v_y)_x = -(u_x)_x \quad (6-3)$$

بنابراین u در معادله لاپلاس صدق می کند. به همین شکل میتوان نشان داد که v هم در معادله لاپلاس صدق می کند و بالعکس با در نظر گرفتن یک تابع همساز، بخش تحلیلی $(f(z))$ حداقل بطور موضعی است اگر آزمون به فرم

$$f(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y) \quad (7-3)$$

باشد، در صورتی که قرار دهیم:

$$\psi_x = -\varphi_y \quad \psi_y = \varphi_x \quad (8-3)$$

معادله کوشی - ریمن ارضا می شود. این رابطه ψ را مشخص نمی کند بلکه فقط رشد آن را مشخص می کند.

$$\psi_{xy} = \psi_{yx} \quad (9-3)$$

معادله لاپلاس برای ψ به طور ضمنی بیان می کند که شرایط انتگرال پذیری در ψ صدق می کند.

$$\varphi = \log r \quad (۱۰-۳)$$

و بنا براین ψ را می‌توان با یک انتگرال خط تعریف کرد. شرایط انتگرال‌پذیری و قضیه استوکس نشان می‌دهد که مقدار انتگرال تنها به دو نقطه ابتدایی و انتهایی ارتباط دارد و از مسیر مستقل است. جفت جواب‌های معادله لاپلاس توابع همساز نامیده می‌شوند. این نتیجه تنها هنگامی که مسیر دور یک نقطه تکین دور نزنند و به طور موضعی مورد قبول است برای مثال اگر Γ و V مختصات قطبی باشند داریم:

$$\varphi = \log r$$

یک تابع تحلیلی معادل است با

$$f(z) = \log z = \log r + i\theta \quad (۱۱-۳)$$

در هر صورت زاویه‌ی θ فقط در ناحیه‌ای که مبدا را محصور نمی‌کند تک مقداری است.

رابطه نزدیک بین معادله لاپلاس و تابع تحلیلی نشان می‌دهد که هر جواب معادله لاپلاس از هر مرتبه‌ای مشتق دارد و حداقل در یک دایره که یک نقطه تکین را محصور نکند می‌تواند به صورت یک سری توانی بسط داده شود. این با جواب معادله موج کاملاً در تضاد است، که معمولاً نظم کمتری دارد. یک رابطه نزدیک بین سری‌های توانی و سری‌های فوریه وجود دارد. اگر ما یک تابع f را بصورت سری توانی در یک دایره با شعاع R بسط دهیم، این به این معناست که

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n \quad (۱۲-۳)$$

ضرایب تعریف شده مناسب قسمت های موهومی و حقیقی دارند بنابراین:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n r^n \cos n\theta - b_n r^n \sin n\theta] + i \sum_{n=1}^{\infty} [a_n r^n \sin n\theta + b_n r^n \cos n\theta] \quad (۱۳-۳)$$

که فرمول بالا، یک سری فوریه برای f است (شمسی، ۱۳۷۹).

شارش سیال

فرض کنیم u و v مولفه های عمودی و افقی سرعت یک سیال تراکم ناپذیر و غیرچرخشی در فضای دو بعدی باشد. شرط اینکه سیال تراکم ناپذیر باشد به این صورت است که:

$$u_x + v_y = 0 \quad (۱۴-۳)$$

و شرط اینکه سیال غیرچرخشی باشد:

$$v_x - u_y = 0 \quad (۱۵-۳)$$

اگر ما دیفرانسیل تابع ψ را به این صورت در نظر بگیریم:

$$\psi_x = v \quad \psi_y = -u \quad (۱۶-۳)$$

در این صورت شرط تراکم ناپذیری، شرط انتگرال پذیری برای این دیفرانسیل است. تابع حاصل، تابع جریان نامیده می شود، چون که در راستای شارش ثابت است. مشتق اول ψ به صورت زیر داده می شود:

$$\varphi_x = -u \quad \varphi_y = -v \quad (۱۷-۳)$$

و شرط غیرچرخشی بودن اشاره به این دارد که، ψ در معادله لاپلاس صدق می‌کند. تابع همساز φ که همیوغ ψ است، "پتانسیل سرعت" نامیده می‌شود. معادله کوشی - ریمان بیان می‌کند که:

$$\varphi_x = -u \quad \varphi_y = -v \quad (۱۸-۳)$$

بنابراین هر تابع تحلیلی با یک شارش سیال تراکم‌ناپذیر و پایدار و غیرچرخشی در صفحه مرتبط است. بخش حقیقی "پتانسیل سرعت" و بخش موهومی، "تابع جریان" است (آموس، ۲۰۰۳).

۳-۴- حل عددی حرکت آب در خاک با مدل عددی seep/w

۳-۴-۱- معرفی نرم افزار seep/w

جهت حل عددی معادله لاپلاس در پی و برآورد دبی نشت، گرادیان خروجی و زیرفشار از نرم‌افزار seep/w از بسته geostudio ۲۰۰۷ استفاده گردید.

نرم افزار مبتنی بر اجزاء محدود می باشد که برای مدل سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل نظیر خاک و سنگ تهیه شده است. در این نرم افزار فرمول‌بندی‌ها طوری انجام شده که هم برای مسائل ساده و هم در مسائل بسیار پیچیده تراوش می تواند مورد استفاده قرار گیرد. این نرم افزار یک نرم افزار تحلیلی جامع می باشد که قادر است جریان را در هر دو حالت اشباع و غیر اشباع مدل کند. توانایی این نرم افزار برای مدل کردن جریان در محیط غیر اشباع، منجر گشته تا شرایط بسیار واقعی‌تر نسبت به سایر نرم افزارها حاصل گردد. در حالی که بسیاری از نرم افزار های دیگر قادر به در

نظر گرفتن این توابع در کنار یکدیگر نیستند. در این نرم افزار امکان استفاده از تمام شرایط مرزی ممکن از قبیل هد کل، هد فشار، دبی و همچنین شرایط خروج آب از مدل در یک مسأله تراوش وجود دارد. با توجه به اینکه این نرم افزار تحلیل غیر اشباع انجام می دهد، لذا امکان تعریف تابع نفوذپذیری در این نرم افزار وجود دارد. رابطه ضریب نفوذ پذیری با فشار منفذی، به صورت نقطه ای تعریف می شود و نرم افزار با استفاده از روشهای برازش منحنی، یک منحنی به این نقاط برازش داده و در تحلیل از آنها استفاده می کند. در تحلیل مدل های دارای سطح آزاد جریان و شرایط مرزی از نوع خروج آب از مدل، از آنجایی که هم موقعیت محل خروج آب از مدل و هم ضرایب نفوذپذیری در نقاط مختلف مدل نامعلوم می باشند. لذا برنامه از دو سعی و خطا در داخل هم استفاده می کند. بدین ترتیب که ابتدا با یک شرایط مرزی مفروض مسأله را حل می کند تا جایی که دیگر ضریب نفوذ پذیری در نقاط مختلف مدل تغییر نکند، در این حالت سعی و خطای اول همگرا شده و برنامه با این فرضیات شرایط مرزی را کنترل می نماید. اگر شرایط مرزی در حال خروج در محل خروج آب از مدل ارضا شده باشد، سعی و خطای دوم نیز خاتمه می یابد. در غیر این صورت با اعمال تغییرات لازم بر روی شرایط مرزی، مسأله دوباره تحلیل و این روند تا حصول همگرایی ادامه می یابد (کراهن، ۲۰۰۲).

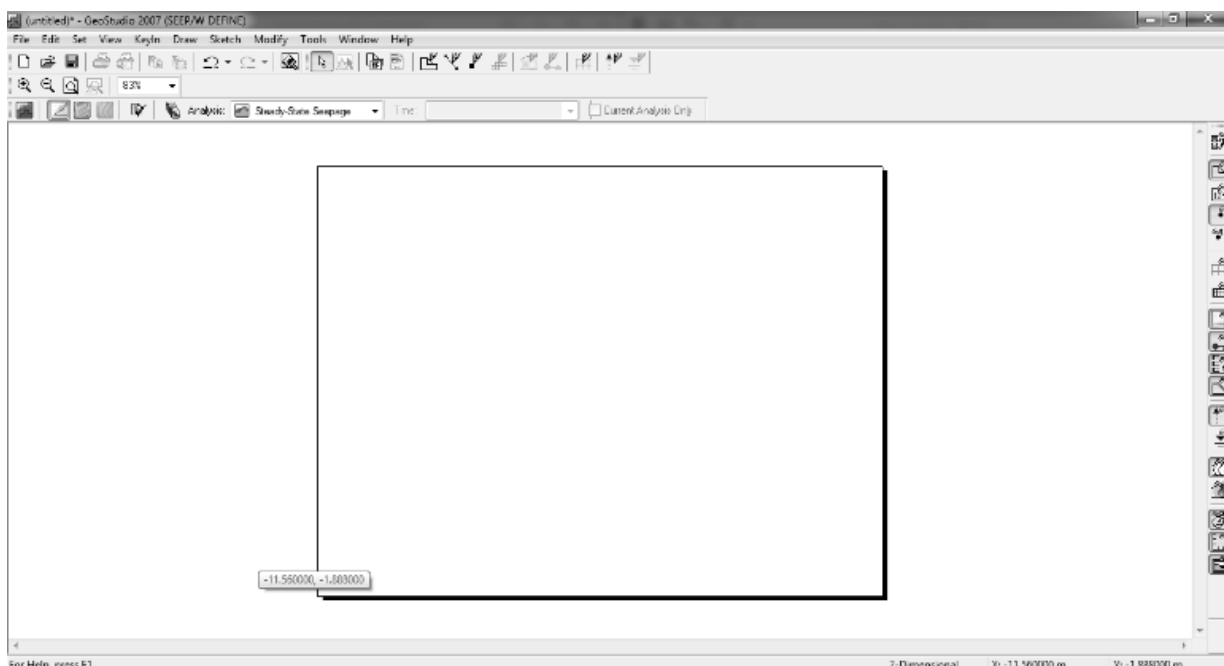
در سد های خاکی، در داخل جسم سد و در محدوده سطح آزاد آب، محیط به دو قسمت اشباع و غیر اشباع تقسیم می شود که جریان در هر دو محیط و نیز بین دو محیط وجود دارد. همانطور که گفته شد، ضریب نفوذپذیری یک خاک غیر اشباع با تغییرات درصد رطوبت یا تغییرات مکش حفره ای تغییر می کند و در این نوع جریان، قانون دارسی و رابطه پیوستگی در هر دو محیط صادق است. با داشتن رابطه محتوای رطوبت حجمی بر حسب مکش حفره ای و ضریب نفوذپذیری می توان معادله تراوش را با استفاده از سعی و خطا حل نمود. چون مقدار ضریب نفوذپذیری در هر نقطه از محیط در ابتدای امر معلوم نیست، ابتدا با فرض محیط اشباع، معادله تراوش حل شده و فشارهای منفذی در هر المان از محیط محاسبه

می‌شوند، سپس با استفاده از مقدار فشار منفذی در مرکز هر المان، مقدار ضریب نفوذپذیری آن المان تعیین شده معادله تراوش با ضرایب نفوذپذیری جدید مجدداً حل می‌شود. این روند تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد.

مدل‌سازی هر نوع پروژه در محیط نرم افزار seep/w دارای چند گام مشترک است، تعیین نوع تحلیل اعم از تراوش در جریان ماندگار و شرایط غیر ماندگار، ترسیم هندسه مدل، تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح موجود در مدل، اختصاص شرایط مرزی، حل مدل و استخراج نتایج (کراهن، ۲۰۰۲).

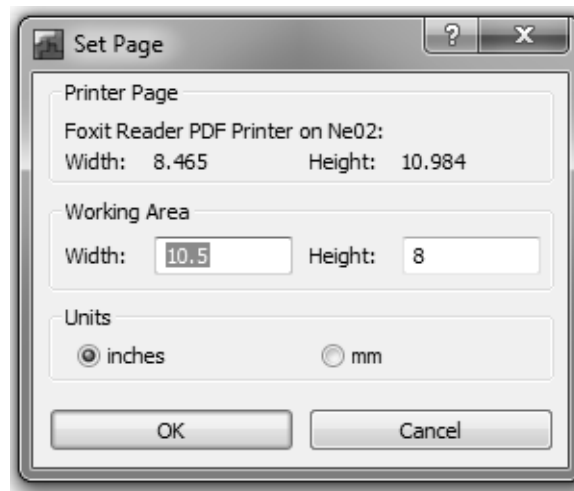
۳-۴-۲- تنظیمات اولیه صفحه نمایش

شکل ۳-۱ صفحه نمایش محیط نرم افزار Seep/w را نشان می‌دهد.



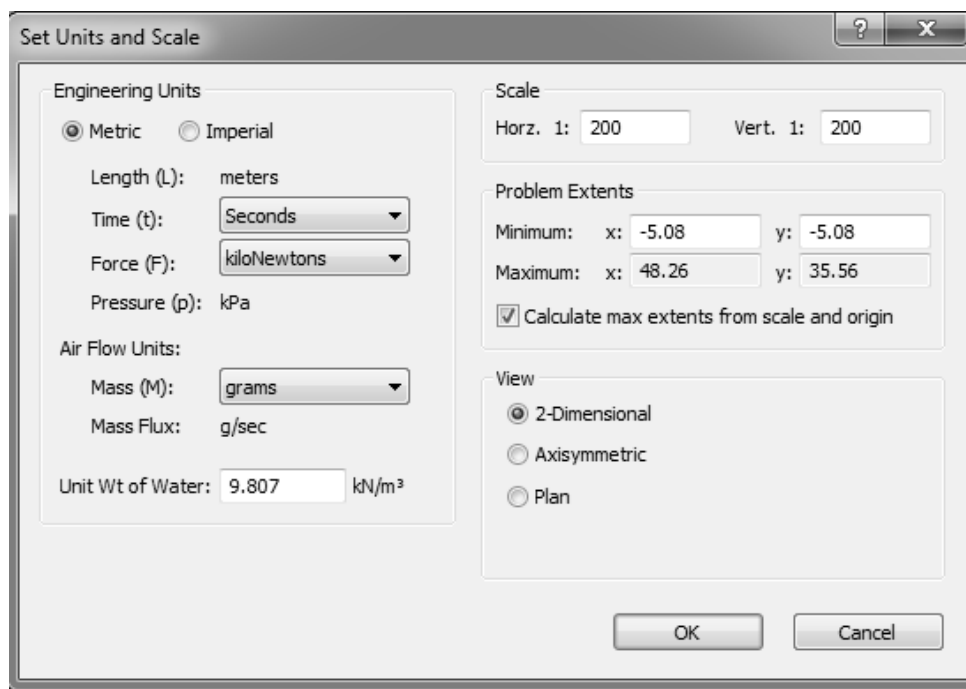
شکل ۳-۱ - صفحه اولیه نرم افزار Seep/w

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. به انتخاب منوی Set و گزینه Page می‌توان طول و عرض صفحه نمایش را بر حسب میلیمتر یا اینچ مشخص کرد (شکل ۳-۲). تعیین ابعاد صفحه بهتر است با توجه به محدوده توسعه مختصات افقی و قائم مدل به گونه‌ای باشد که تمام فضای موجود در صفحه توسط نقاط هندسه اشغال شود. بدین ترتیب فضای خالی در سطح صفحه نمایش وجود نداشته باشد.



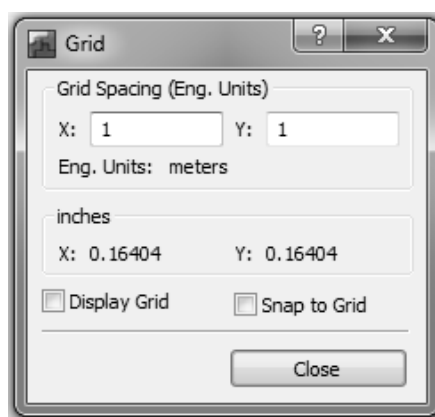
شکل ۳-۲- تعیین اندازه صفحه کار جهت مدل سازی

با انتخاب پنجره Scale از منوی Set پنجره‌ای مطابق شکل ۳-۳ 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 Extents Problem وارد خواهد شد و در این پنجره می‌توان وزن مخصوص آب را به دلخواه تغییر داد.



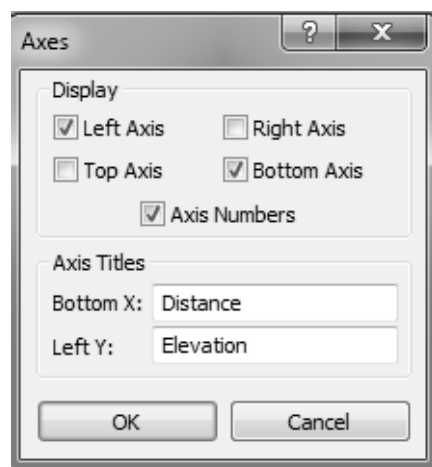
شکل ۳-۳- انتخاب سیستم واحدی، محدوده ابعاد افقی و قائم صفحه و وزن مخصوص آب

جهت نمایش نقاط کمکی با فواصل معین از گزینه Grid مطابق شکل ۳-۴ 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 Snap Grid نقاط کمکی در صفحه نمایش ظاهر می شود.

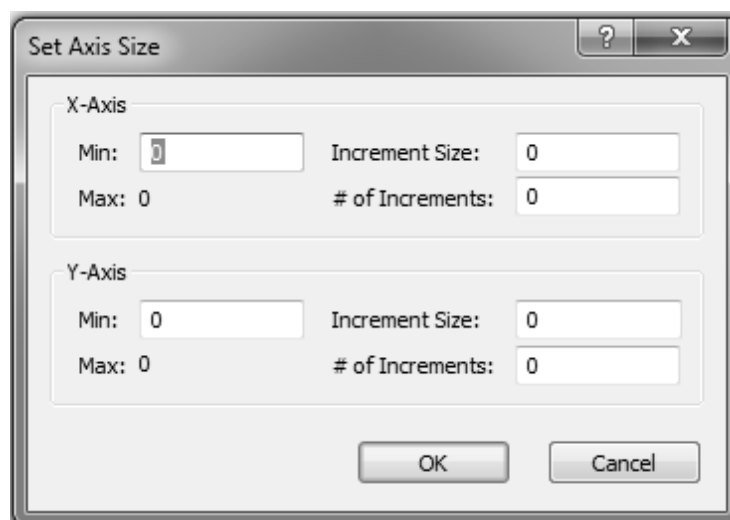


شکل ۳-۴- نمایش نقاط کمکی جهت شبکه بندی

در پنجره Axes از منوی Set مطابق شکل ۳-۵ می‌توان نمایش محورهای مختصات را ویرایش نمود. در این پنجره موقعیت نمایش محورهای مختصات و نام انتخابی برای محورها وارد می‌گردد. در ادامه پنجره Axes مطابق شکل ۳-۶ پنجره دیگری باز خواهد شد که در این صفحه می‌توان حداقل، طول بازه و تعداد بازه‌های محور افقی و قائم را مشخص کرد.



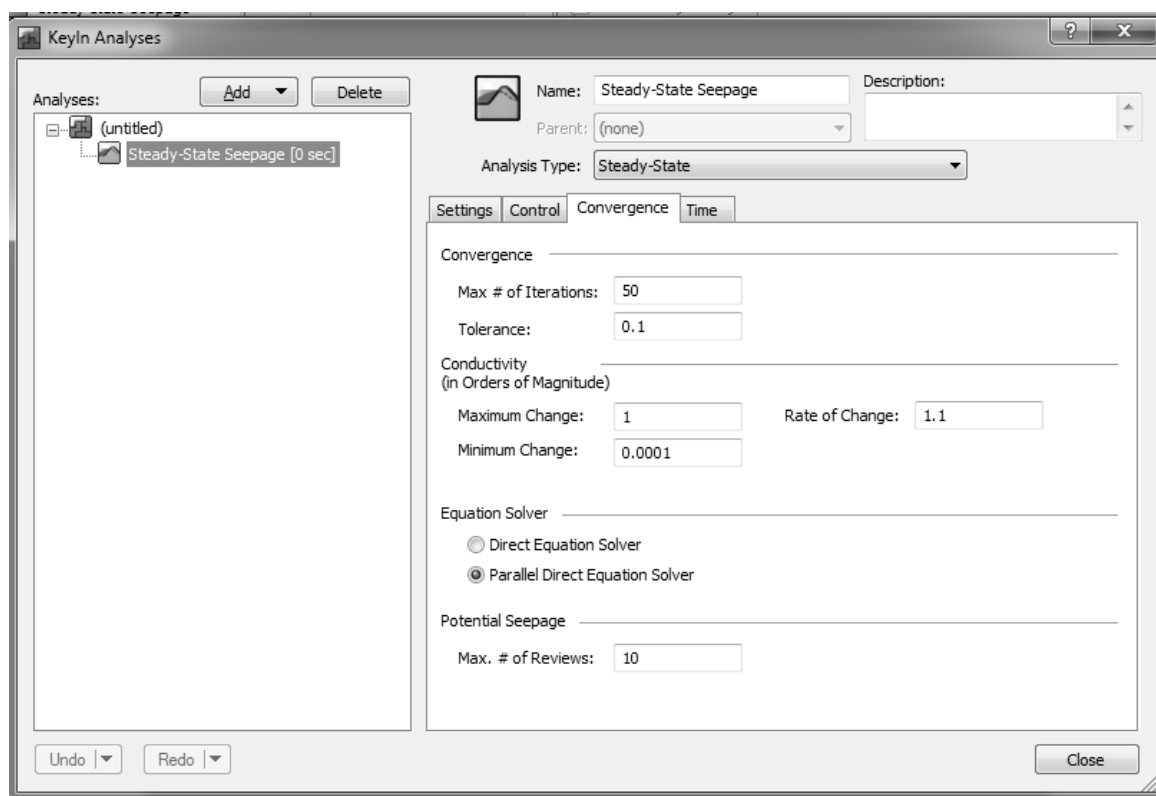
شکل ۳-۵- ویرایش فرم و نام محور های افقی و قائم جهت ترسیم



شکل ۳-۶- تعیین طول و تعداد بازه های محور های افقی و قائم

۳-۴-۳- انتخاب نوع تحلیل و معیار های همگرایی

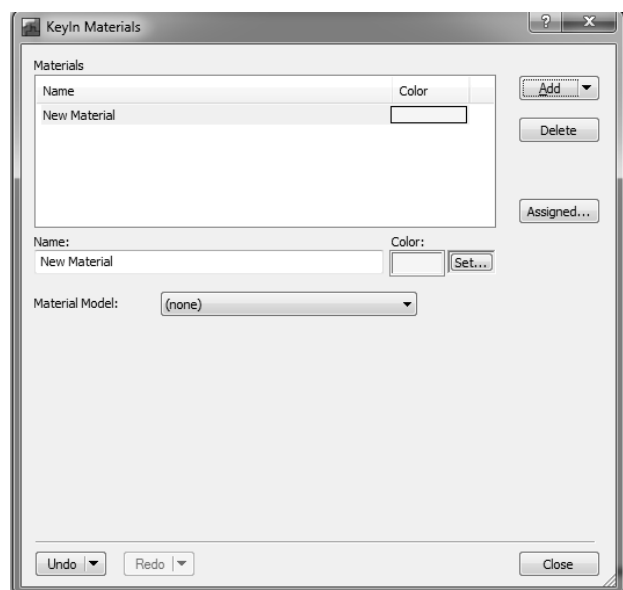
جهت تعریف مشخصات مدل از قبیل نوع تحلیل اعم از تحلیل ماندگار و تحلیل غیر ماندگار، تعداد گام های سعی و خطا، خطای انتخابی، طول گام های زمانی جهت اجرای پروژه مطابق شکل ۳-۷ از پنجره Analysis Setting واقع در منوی KeyIn استفاده می شود. در این پنجره از گزینه Type جهت تعیین نوع تحلیل اعم از ماندگار Steady و غیر 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 ۳-۷- تعیین نوع تحلیل تراوش از پنجره Type و انتخاب اعداد سعی و خطا و مقدار خطای انتخابی در هر گام

۳-۴-۴- 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 ۳-۸ از منوی KeyIn گزینه Materials فعال شود.



شکل ۳-۸- 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

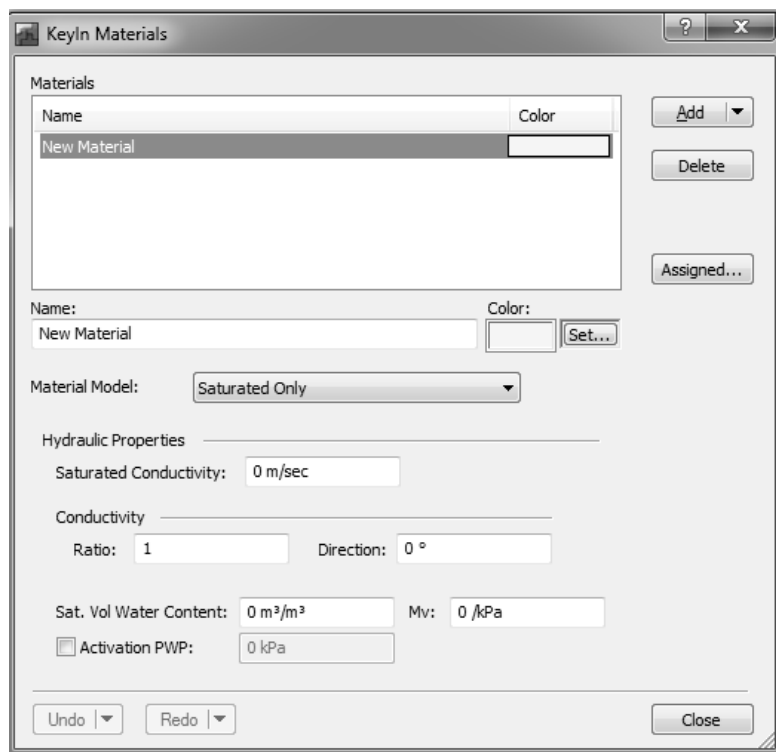
اشباع در فشار صفر برابر ضریب نفوذپذیری اشباع و مقدار ضریب نفوذپذیری در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال برابر $\frac{K_{sat}}{100}$ فرض می‌گردد.

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

۳-۴-۱- خاک اشباع (Saturated Only)

مطابق شکل ۳-۹ 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 تماماً 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.



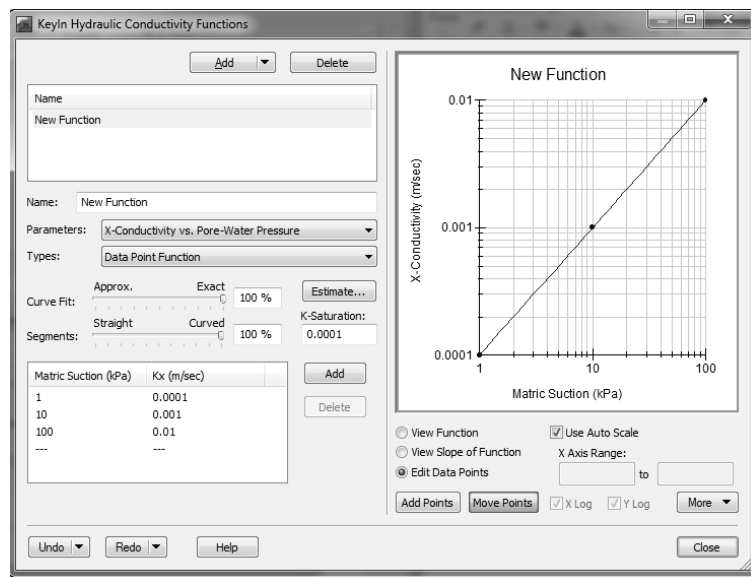
شکل ۳-۹- تعریف خاک در شرایط اشباع

۳-۴-۲- خاک اشباع / غیر اشباع (Saturated / Unsaturated)

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

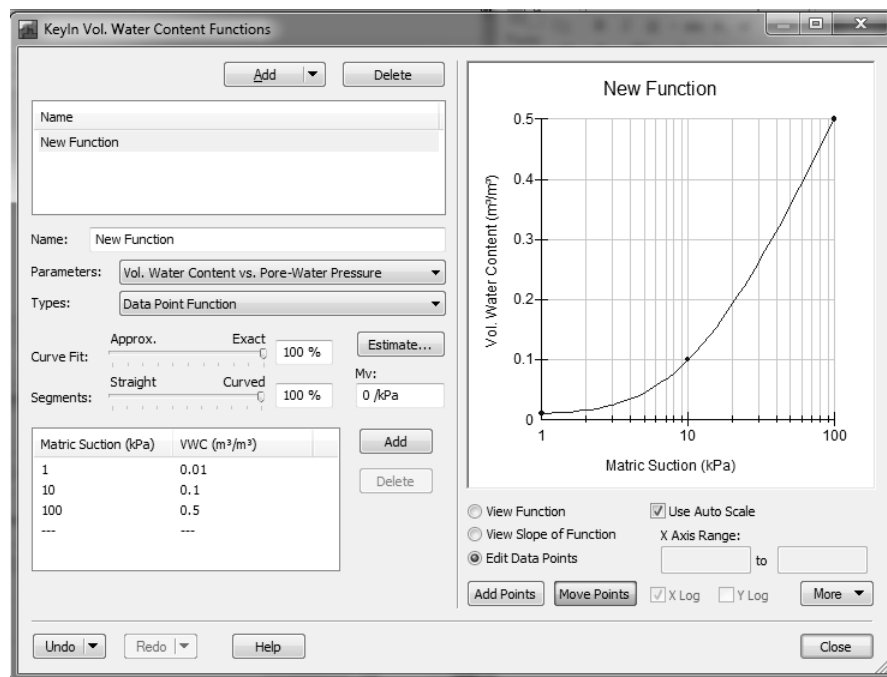
همانطور که گفته شد مقدار عبوردهی هیدرولیکی در راستای X بسته به پارامتر فشار آب حفره‌ای دارد و

می‌توان مطابق شکل ۳-۱۰ آن را تعریف کرد. ضریب عبور دهی مانند قسمت قبل بدست می‌آید.



شکل ۳-۱۰- تعریف رابطه بین عبور دهی هیدرولیکی با فشار آب حفره ای در خاک های نیمه اشباع

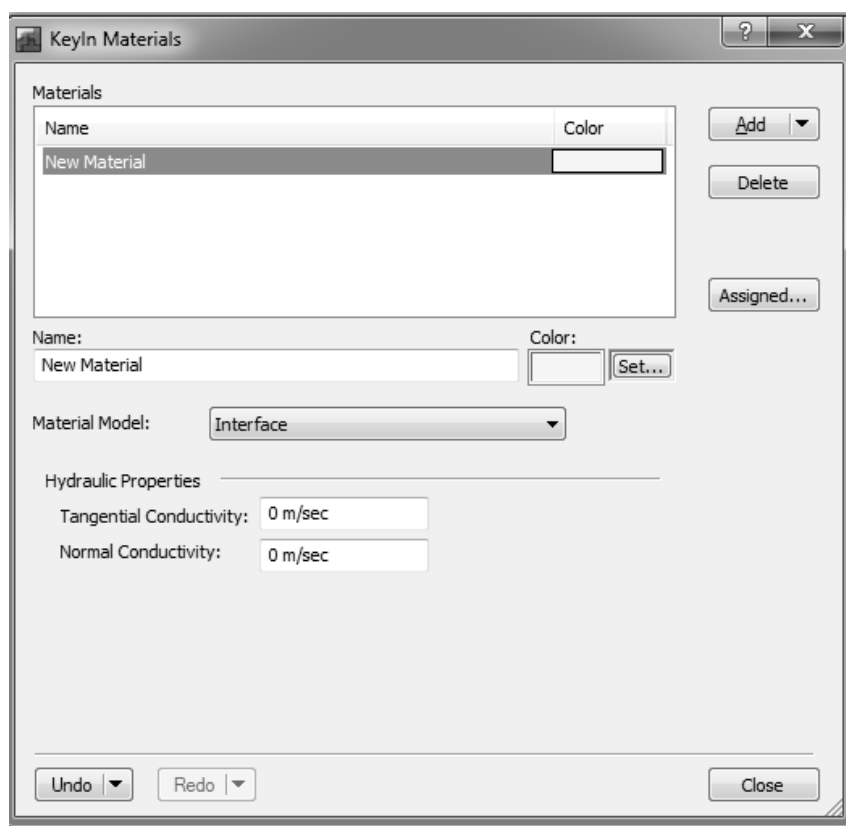
رابطه بین فشار آب حفره ای و ضریب ذخیره ویژه نیز از طریق نمودار شکل ۳-۱۱ و به صورت عدد دهی مانند قسم قبل قابل تعریف است.



شکل ۳-۱۱- تعریف رابطه بین ضریب ذخیره ویژه با فشار آب حفره ای

۳-۴-۳- خاک غیر قابل نفوذ (Interface)

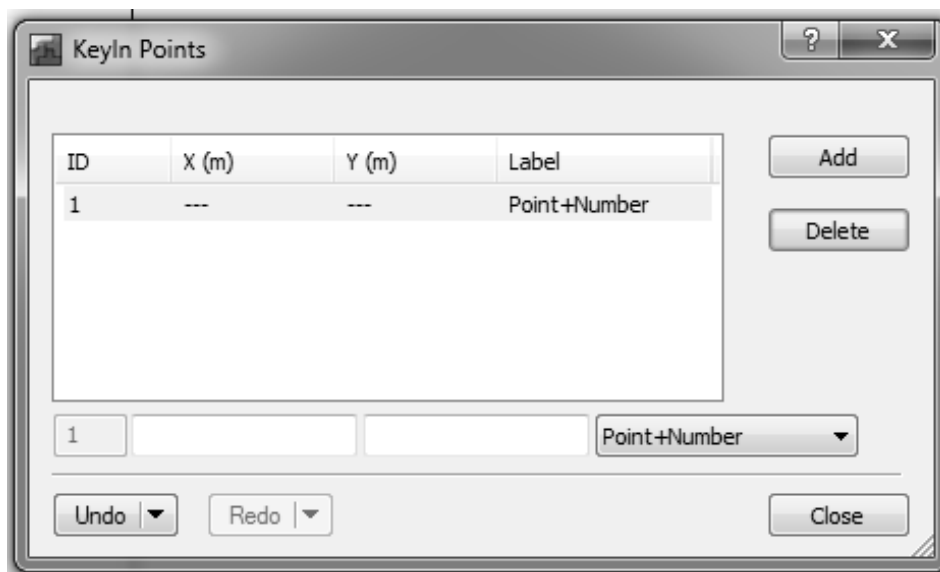
همانطور که می‌دانیم خاک غیر قابل نفوذ می‌تواند جریان بسیار کمی را از خود عبور دهد. چون این جریان نسبت به بقیه مناطق بسیار ناچیز و غیر قابل توجه است می‌توان ضریب عبوردهی هیدرولیکی آن را برابر صفر در نظر گرفت. اما برای دقت بیشتر می‌توان ضریب عبوردهی مماسی و عادی را مانند شکل ۳-۱۲ در نظر گرفت.



شکل ۳-۱۲- تعریف مشخصات خاک غیر قابل نفوذ

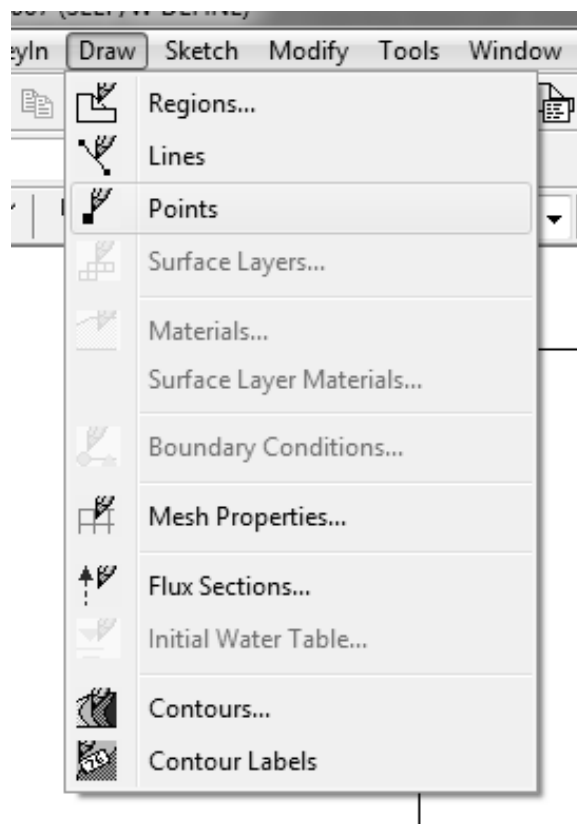
۳-۴-۵- ترسیم هندسه مدل

جهت ترسیم هندسه مدل لازم است مختصات نقاط مختلف مرزهای مدل وارد شوند. برای این منظور از منوی KeyIn پنجره KeyIn Points استفاده می شود. در پنجره ظاهر شده مطابق شکل ۳-۱۳ می توان مختصات نقاط را به طور یک به یک وارد کرد. پس از کلیک بر روی گزینه Add نقطه در صفحه ظاهر می شود. 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 می شوند. در این تحقیق یک خاک یک تکه به عمق ۳۵ متر در نظر گرفته شده است که برای خروجی های بهتر و درست تر (اثبات شده صورت تجربی) در بالادست و پایین دست کفبند سد که ۹۰ متر طول دارد؛ عمق خاک را به طول ۳۰ متر ۵ متر بالاتر قرار داده ایم.



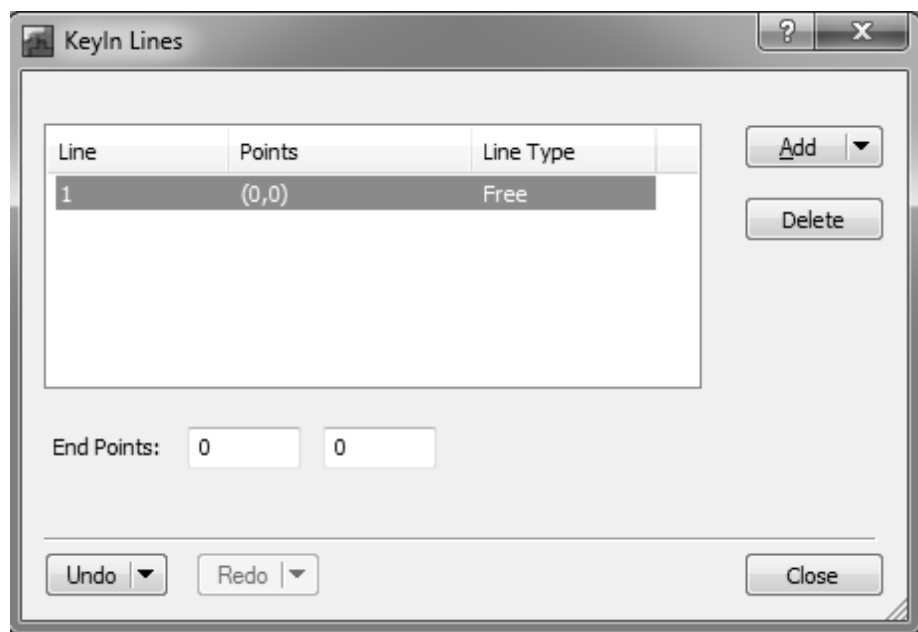
شکل ۳-۱۳- تعریف مختصات نقاط

البته برای تعریف و مشخص سازی نقاط می توان مطابق شکل ۳-۱۴ از منوی Draw و گزینه Points استفاده کرد و به صورت دستی نقاط را روی صفحه مشخص کرد.

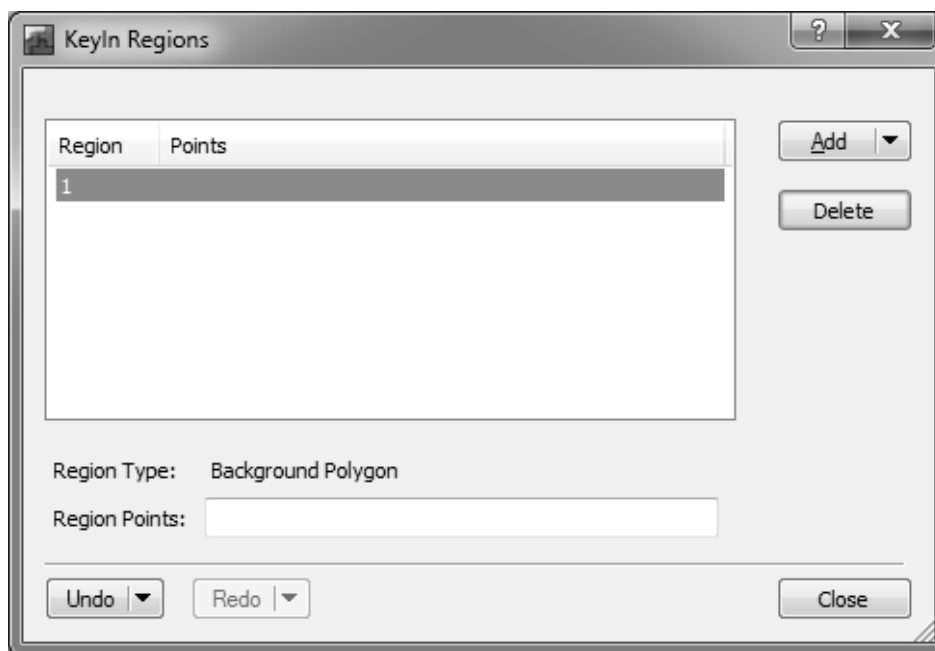


شکل ۳-۱۴- منوی Draw و انتخاب Points برای جانمایی دستی نقاط

پس از مشخص کردن نقاط در صفحه با داشتن شماره هر نقطه می توان مطابق شکل ۳-۱۵ از نوار KeyIn و منوهای (Line) و (Region) بین آنها خط یا یک منطقه مشخص کرد.

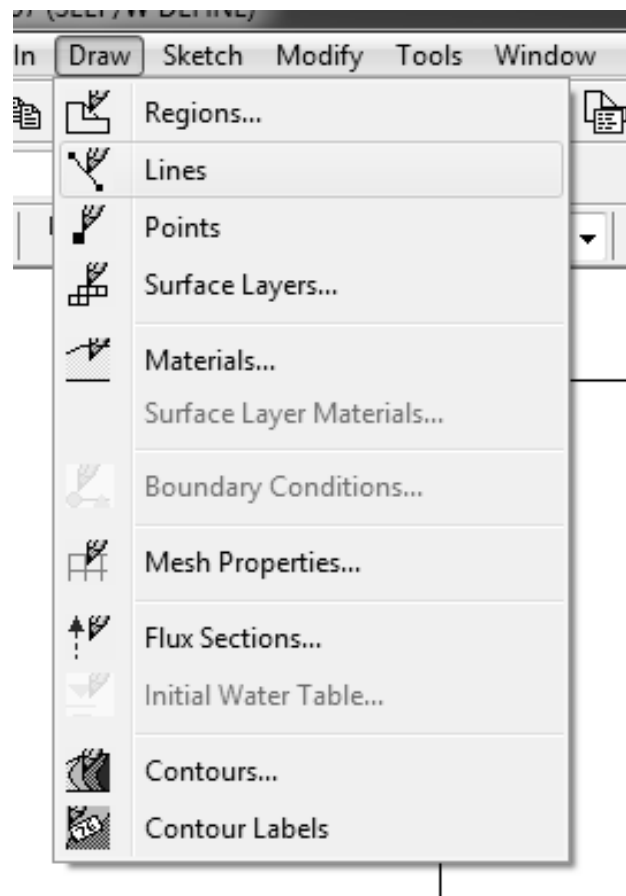


شکل ۳-۱۵- منوی Lines برای مشخص کردن خط بین نقاط با داشتن شماره نقاط



شکل ۳-۱۶- 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 ۳-۱۷ 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.



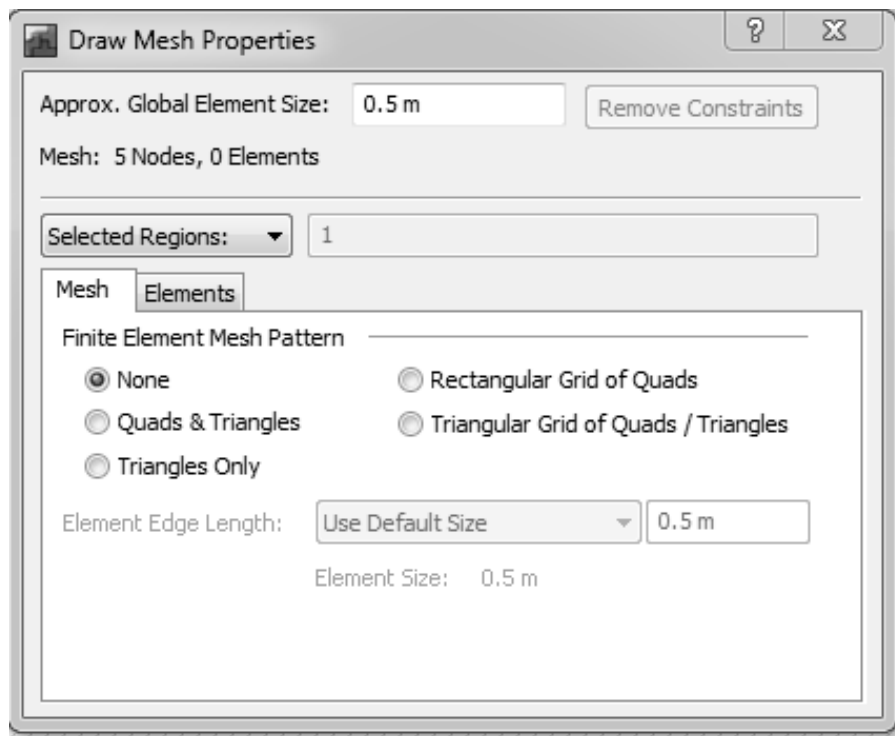
شکل ۳-۱۷- نوار Draw و انتخاب Regions و Lines برای مشخص کردن منطقه و خط بین نقاط

۳-۴-۶- 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 ۳-۱۸ 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 ۳-۱۸- پنجره Mesh Properties از نوار Draw برای مش بندی

۳-۴-۷- 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 ۳-۱۹ 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.

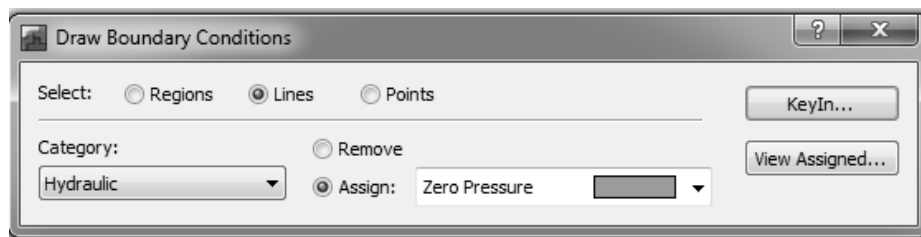
شرایط مرزی Pressure Head برای حالت وجود یک سطح با بار آبی ثابت برای تمام نقاط این سطح به کار می‌رود. به عنوان مثال چنانچه اطمینان از ظهور سطح آب در بخش پایین‌دست سد وجود داشته باشد. برای این شرایط مرزی از نوع Pressure Head تعریف می‌شود. در حالی که از محل

خروج سطح آب در بخش شیب‌دار پایین‌دست اطمینان وجود نداشته باشد از شرایط Total Flux (Q) یا Unit Flux (q) همراه با روشن کردن گزینه Potential Seepage Face Review استفاده می‌شود.

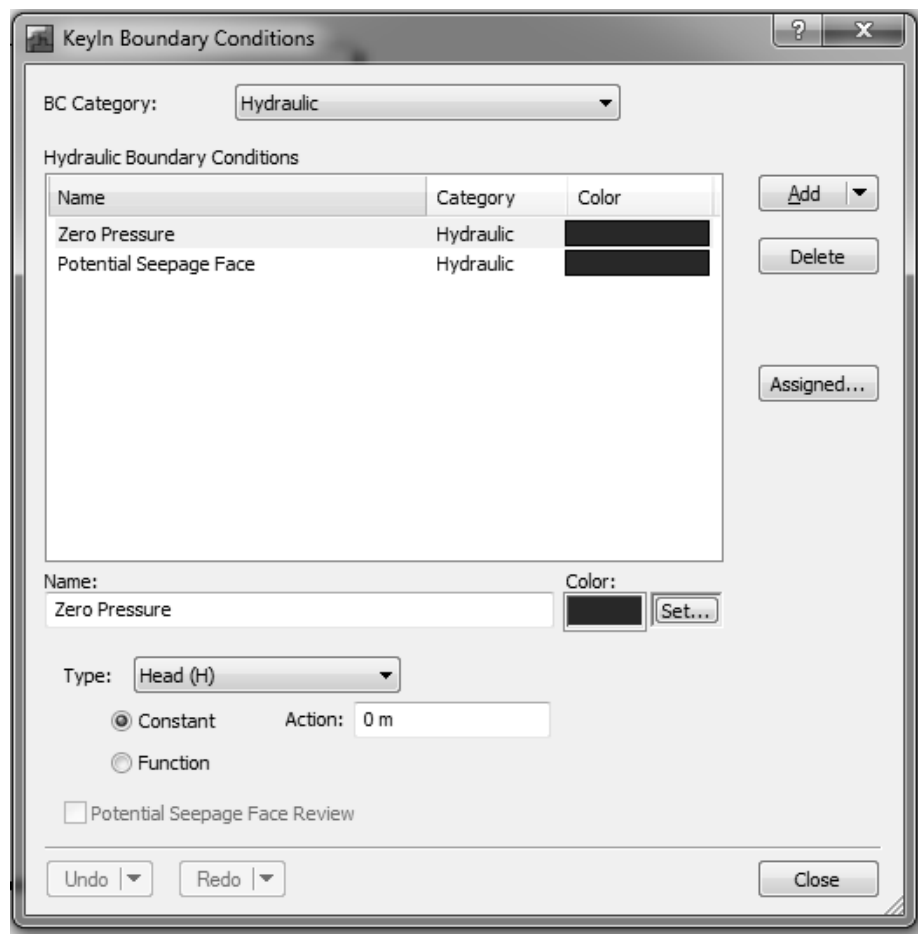
باید توجه داشت دو شرط مرزی Head و Pressure Head هر دو دارای مفاهیم یکسانی هستند، با این تفاوت که شرط مرزی Head رقوم از کف را نیز علاوه بر Pressure Head در نظر می‌گیرد.

البته تمام حالات گفته شده فقط در حالات ماندگار تعریف می‌شوند و مقادیر ثابت (Constant) را در هر دو حالت بالادست و پایین‌دست 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.

در این تحقیق نوع حدود مرزی Pressure Head و هد پایین دست صفر و هد بالادست ۵ متر انتخاب شده است.



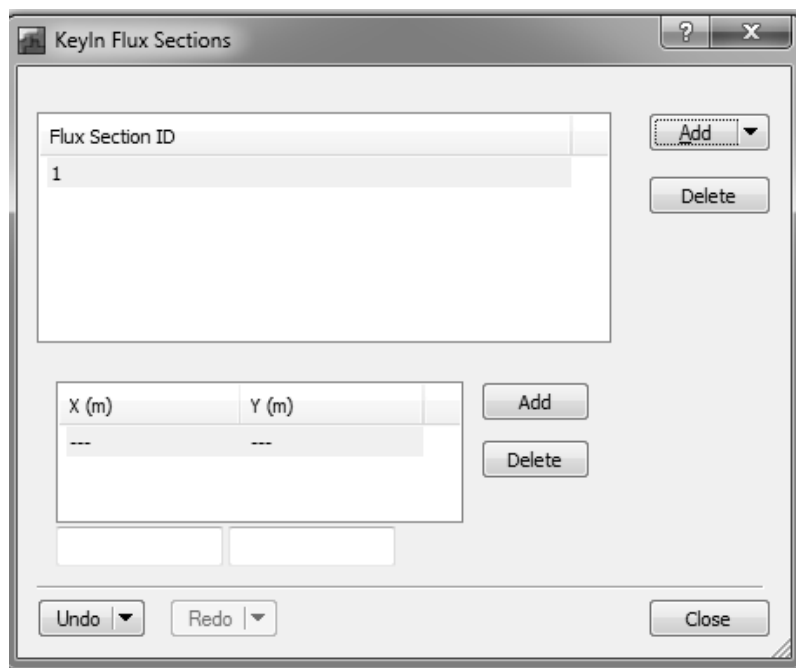
شکل ۳-۱۹- اختصاص شرایط مرزی هیدرولیکی



شکل ۳-۲۰- تعریف شرایط مرزی هیدرولیکی

۳-۴-۸- قرائت و اندازه گیری دبی

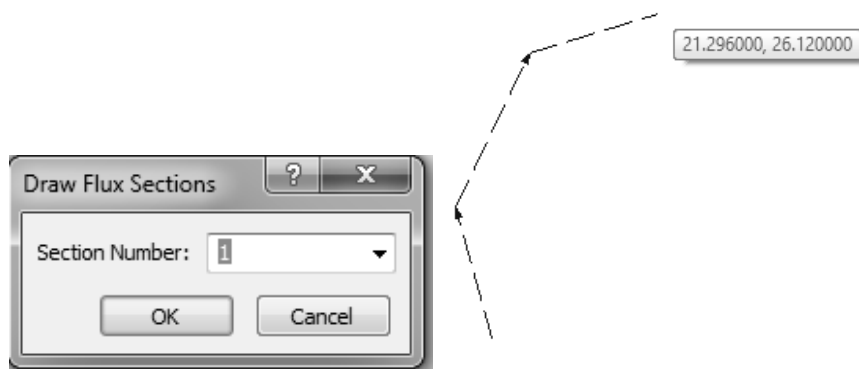
در این نرم افزار می توان مقطعی به دلخواه را در واحد عرض با تعریف مختصات ابتدا یا انتهای مقطع انتخاب و یا به طور دستی رسم کرد و مقدار دبی را محاسبه کرد. برای این منظور پنجره KeyIn Flux Sections از منوی KeyIn انتخاب می شود. پس از این مرحله پنجره ای مطابق شکل ۳-۲۱ باز می شود که می توان در آن مختصات ابتدا 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 ۳-۲۱- رسم Flux Sections با استفاده از مختصات نقاط

این مقطع‌ها را به طور دستی نیز می‌توان زد. برای این کار باید مطابق شکل ۳-۲۲ از نوار Draw گزینه Flux section را انتخاب کرد و با انتخاب کد نشانگر به علامت مثبت تبدیل می‌شود 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.



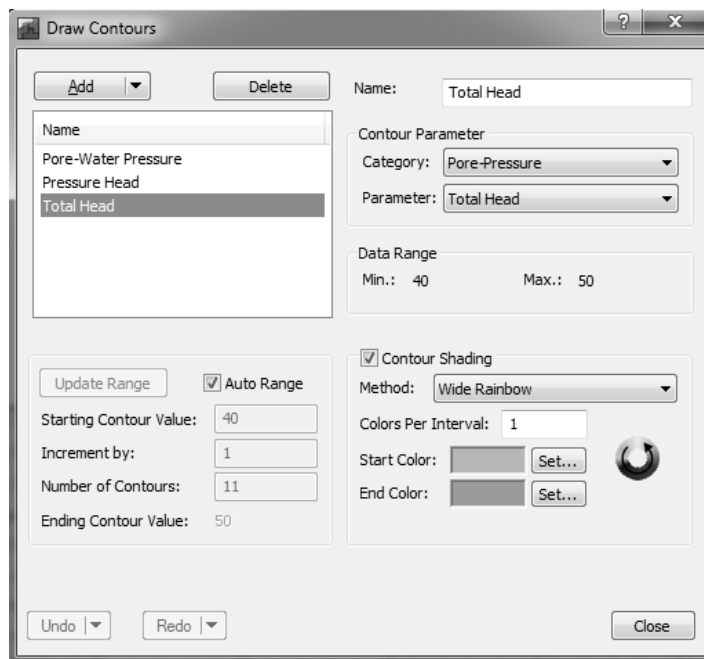
شکل ۳-۲۲- رسم Flux Sections با استفاده از نشانگر موس

۳-۴-۹- 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.

۳-۴-۱۰- 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 ۳-۲۳ از نوار Draw گزینه Contours  استفاده کرد.



شکل ۳-۲۳- منوی Draw Contours برای شخصی سازی و انتخاب کنتور ها

همچنین برای نمایش مقدار هر کنتور از گزینه Contours Labels  را انتخاب کنید.

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 Pathes  را از منوی Draw

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 منوی

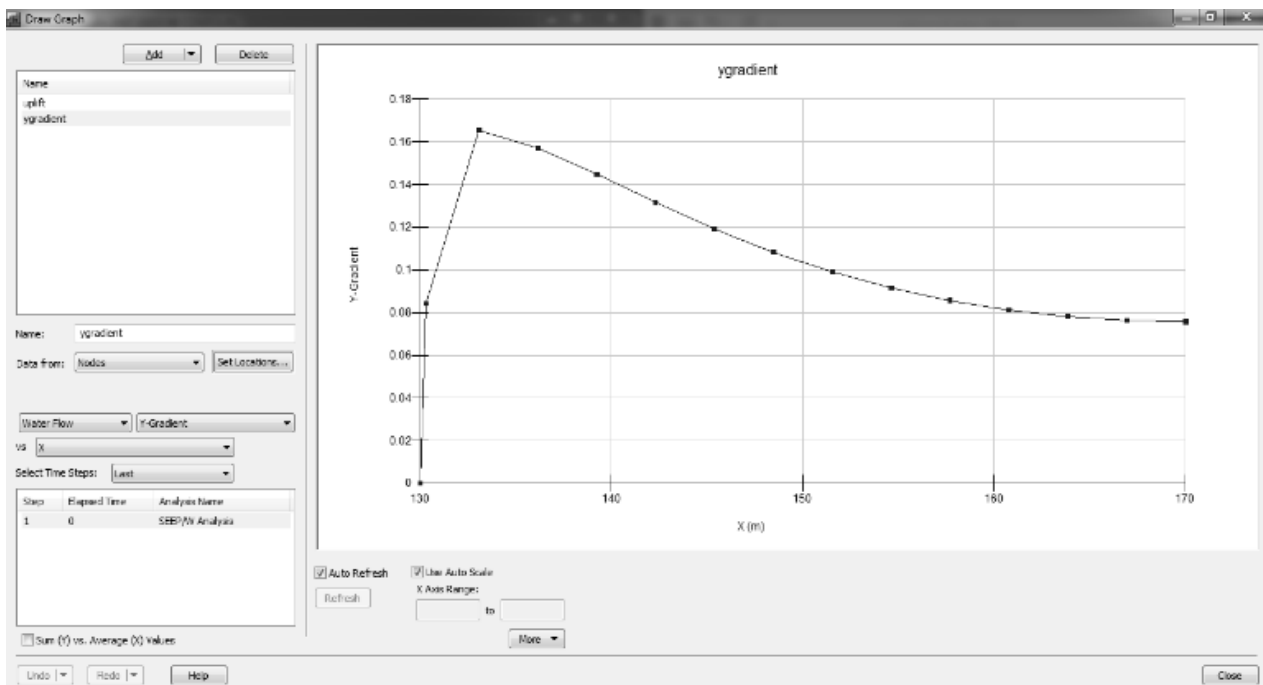
Draw را فعال می کنیم.

این نرم افزار قابلیت ارائه نتایج را به فرم نمودار یا داده در قالب صفحه گسترده داراست. برای این

منظور از پنجره Graph  Graph... از نوار Draw استفاده می کنیم. پس از انتخاب این گزینه پنجره ای مطابق شکل ۳-۲۴ 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.

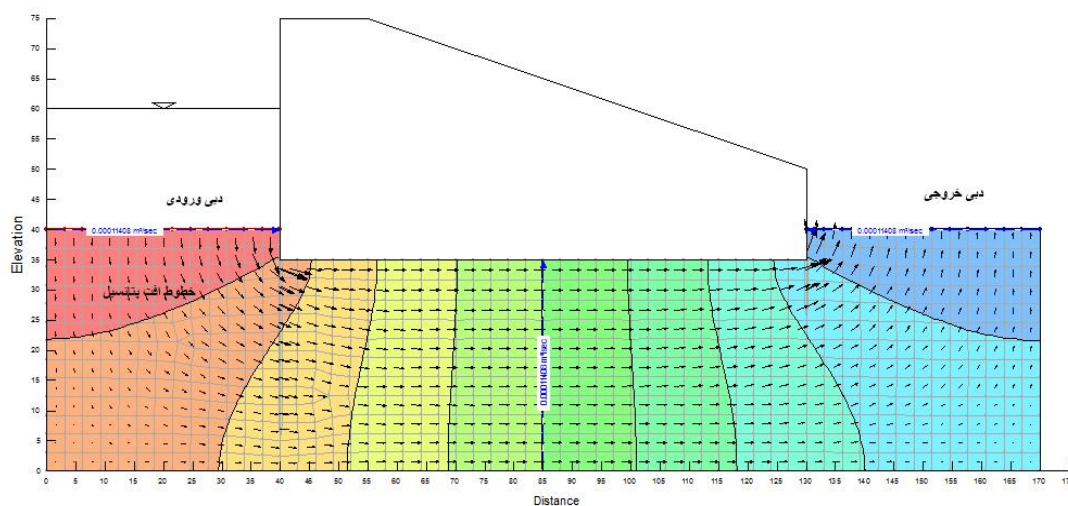
برای مشخص کردن قسمت مورد نظر جهت رسم از گزینه های Data From و Set Location استفاده می کنیم.



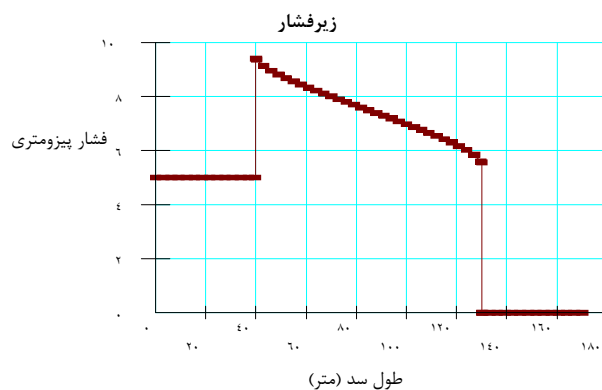
شکل ۳-۲۴- پنجره Draw Garph برای رسم نمودار های مختلف

۳-۴-۱-۱- مدل عددی جریان بدون حضور پرده آببند

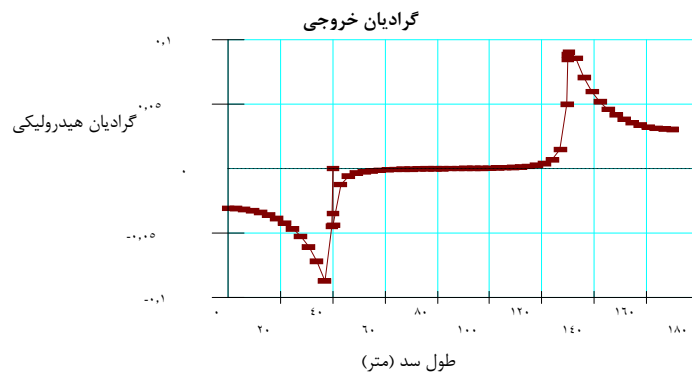
شکل ۳-۲۵ خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل پس از اجرای نرم افزار عددی seep/w نشان داده شده است. شکل ۳-۲۶ و ۳-۲۷ نمودار زیر فشار و گرادیان خروجی در طول سد برای حالت اول یعنی عدم وجود پرده آببند ترسیم شده است.



شکل ۳-۲۵- خطوط جریان و افت پتانسیل بدون پرده آببند



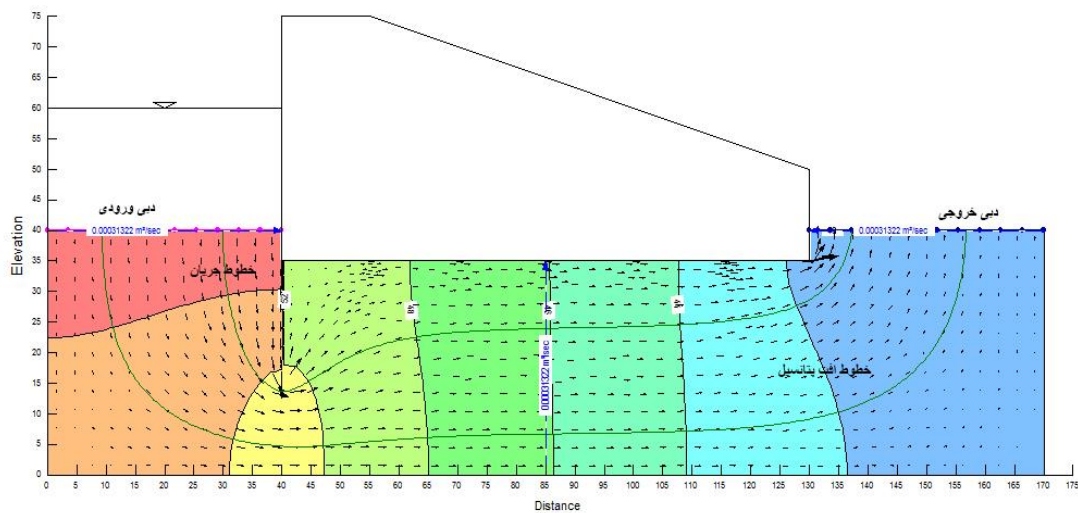
شکل ۳-۲۶- زیر فشار عدم حضور پرده آببند



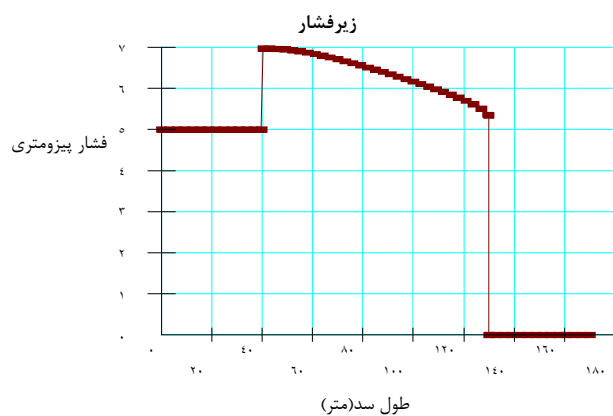
شکل ۳-۲۷- گرادیان خروجی عدم حضور پرده آببند

۳-۴-۱۰-۲- مدل جریان با حضور یک پرده آببند در ابتدای سد

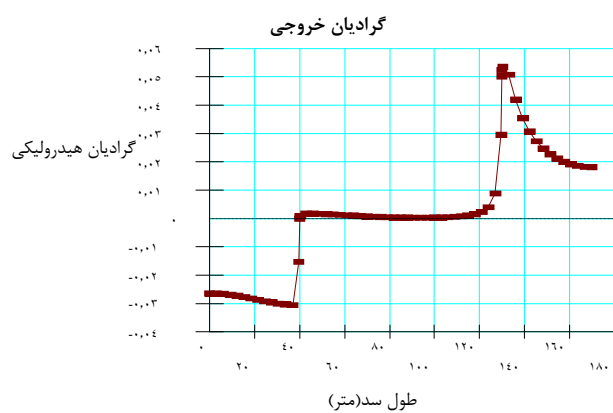
در شکل‌های ۳-۲۸ و ۳-۲۹ و ۳-۳۰ نتایج حاصل از حل عددی زیرفشار و گرادیان خروجی برای حضور پرده آببند در ابتدای سد نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۸- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور پرده آببند در ابتدای سد



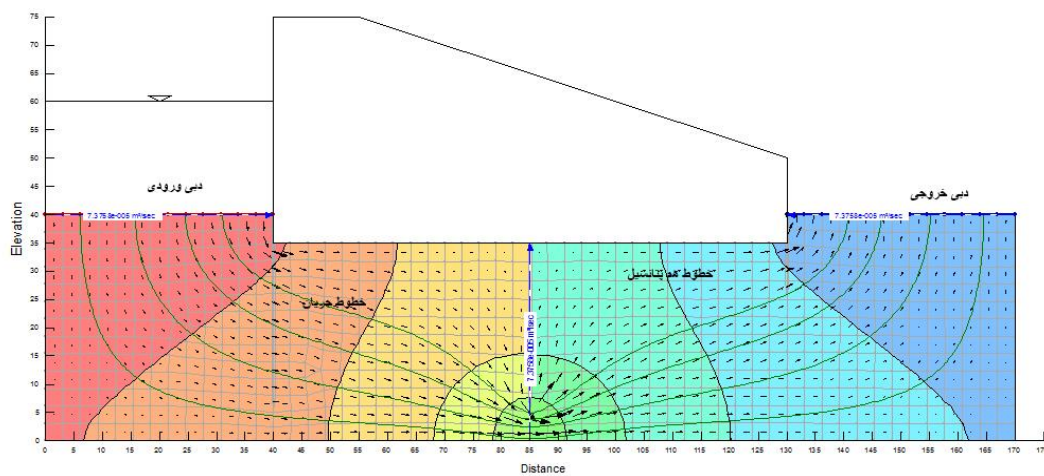
شکل ۳-۲۹- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرده آب‌بند در ابتدای سد



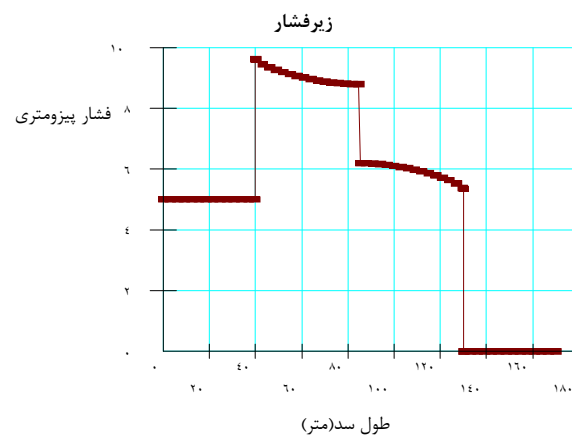
شکل ۳-۳۰- گرادیان خروجی با حضور کات آف در ابتدای سد

۳-۴-۱۰-۳- مدل جریان با حضور یک پرده آببند در وسط سد

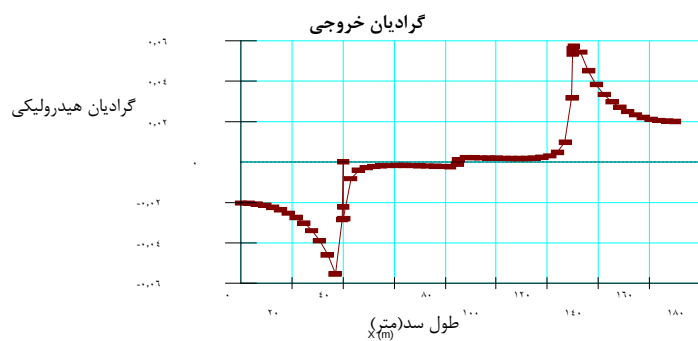
شکل‌های ۳-۳۱ و ۳-۳۲ و ۳-۳۳ نتایج و گراف‌های حاصل از حل عددی زیر فشار و گرادیان خروجی برای حضور پرده آببند در وسط سد نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۱- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور پرده آببند در وسط سد



شکل ۳-۳۲- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرد آببند در وسط سد

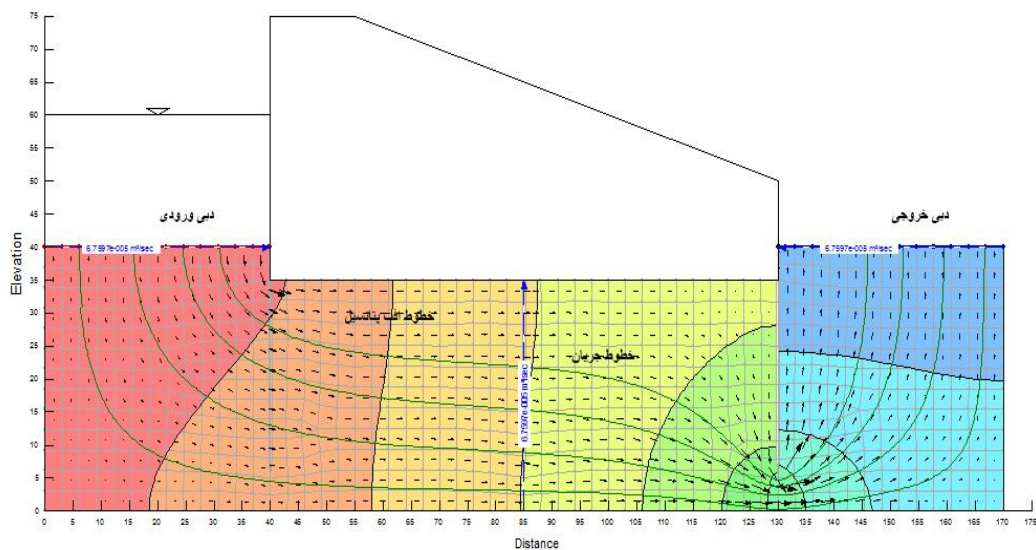


شکل ۳-۳۳- گرادیان خروجی با حضور پرده آببند در وسط سد

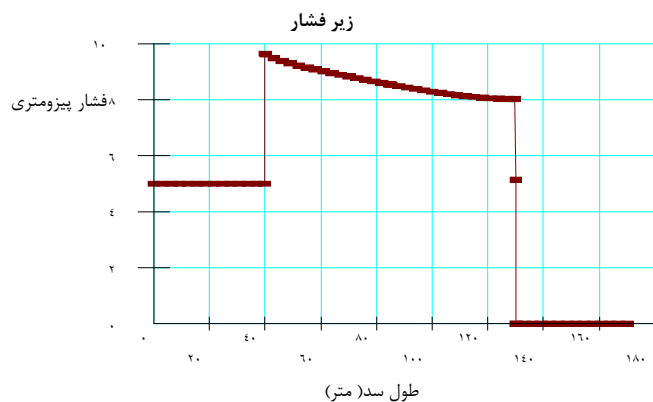
۳-۴-۱۰- مدل جریان با حضور یک پرده آببند در انتهای سد

شکل‌های ۳-۳۴ و ۳-۳۵ و ۳-۳۶ نتایج و گراف‌های حاصل از حل عددی زیر فشار و گرادیان

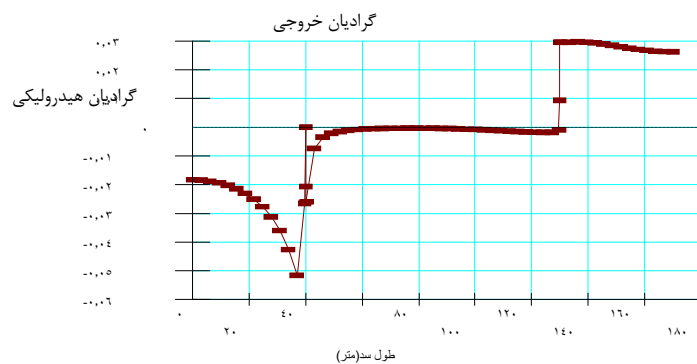
خروجی برای حضور پرده آببند در انتهای سد نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۴- خطوط جریان و افت پتانسیل با حضور کات آف در انتهای سد



شکل ۳-۳۵- تعیین ارتفاع پیزومتری (زیر فشار) با حضور پرده آببند در انتهای سد



شکل ۳-۳۶- گرادیان خروجی با حضور پرده آببند در انتهای سد

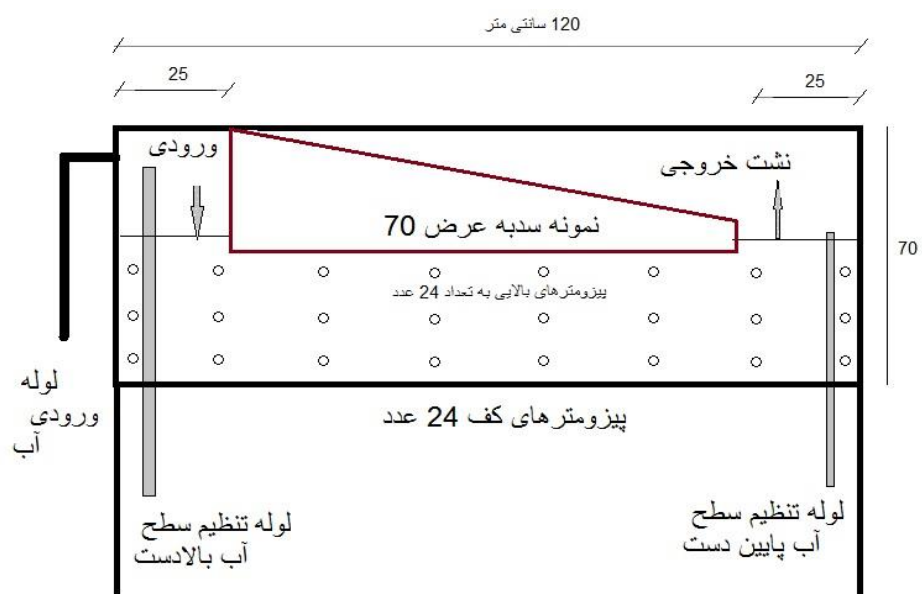
۳-۵- مدل آزمایشگاهی

جهت صحت سنجی و کالیبره کردن مدل عددی از مدل آزمایشگاهی مخزن نشت و نفوذ استفاده شد. آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه ماشین‌های آبی دانشگاه شهید بهشتی

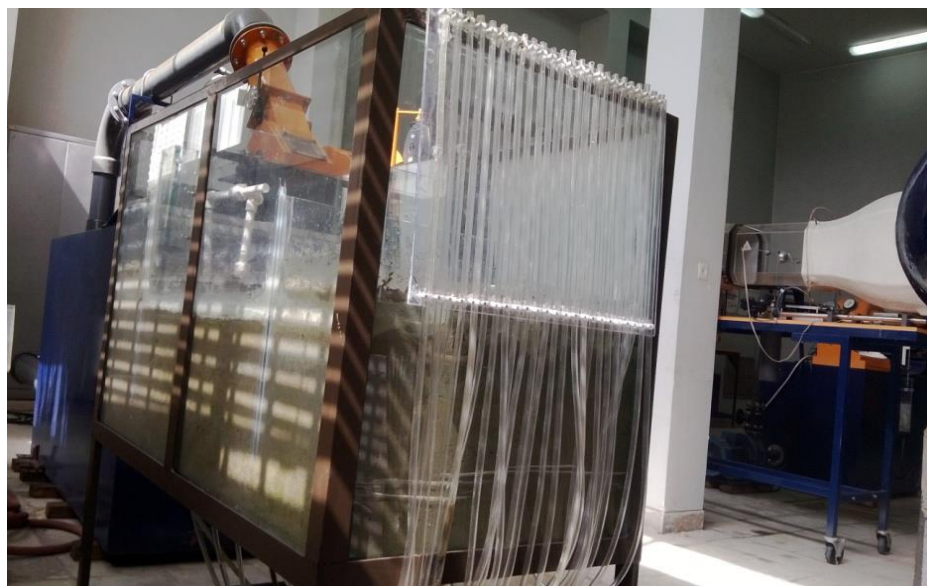
پردیس فنی شهید عباسپور و در مدل آزمایشگاهی شامل مخزن نشت و نفوذ به طول ۱۲۰ سانتی متر عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر ساخته شده از شیشه به ضخامت ۱۰ میلی متر انجام شد. مطابق سوراخ‌هایی با فواصل ۱۵ سانتی متر در سه ردیف به تعداد ۲۴ عدد در دیواره و به همین تعداد در کف مدل به منظور نصب ۴۸ عدد پیزومتر تعبیه گردید. نمونه خاک از جنس ماسه بادی به عمق ۳۵ سانتی متر و با هدایت هیدرولیکی $k=0/0000315$ بر حسب متر بر ثانیه از روش بار افتان و تخلخل $0/375$ و دانه‌بندی

$$\text{و } d_{10} = 0.085mm, \quad d_{30} = 0.16mm, \quad d_{50} = 0.22mm, \quad d_{60} = 0.265mm,$$

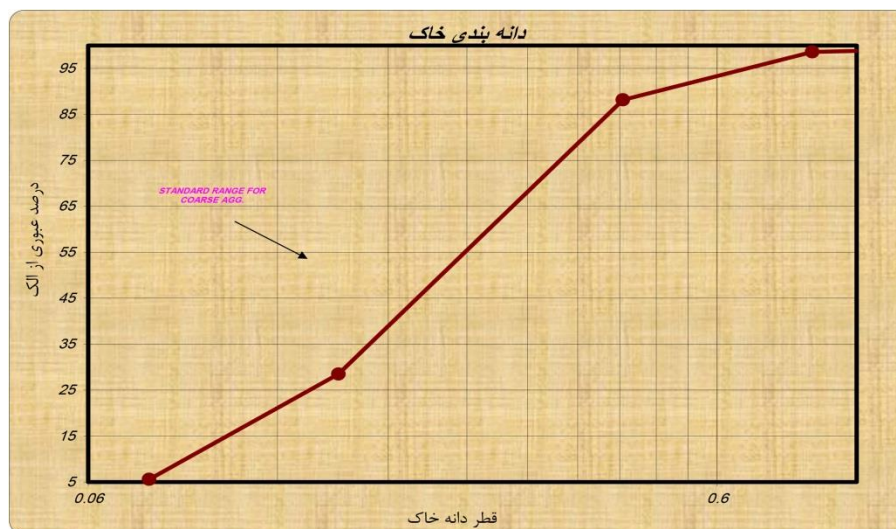
ضریب یکنواختی $C_u=3/1176$ و ضریب دانه بندی $C_c=1/1365$ که نشان دهنده خاک کاملاً یکنواخت است در آزمایشگاه مکانیک خاک مطابق شکل ۳-۳۹ محاسبه گردید. شکل ۳-۳۷ و ۳-۳۸ نمای مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقدار نشت برای حضور یک دیوار آب‌بند در ابتدای سد برای تعداد ۲۰ اختلاف هد بالادست و پایین دست و سه طول متفاوت سد و با یک نوع خاک برداشت گردید.



شکل ۳-۳۷- ابعاد مدل آزمایشگاهی و محل قرارگیری پیزومترها



شکل ۳-۳۸- مدل در حال انجام آزمایش



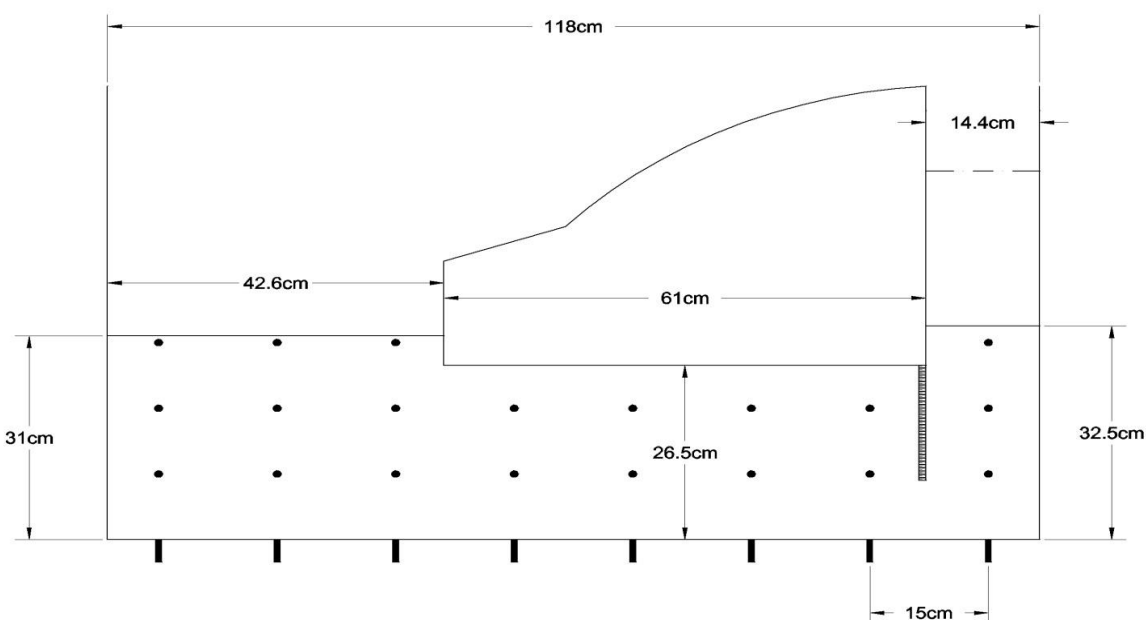
شکل ۳-۳۹- منحنی دانه بندی خاک پی مدل

۳-۶- مشاهددهای آزمایشگاهی

در این بخش به نتایج حاصل از مشاهددهای آزمایشگاهی پرداخته شده است در مجموع ۶۲ آزمایش جهت صحت سنجی مدل عددی انجام شد که در جداول ۳-۱ الی ۳-۶ نشان داده شده است.

۳-۶-۱- پرده آببند ابتدای سد و طول سد ۶۱ سانتی متر

شکل ۳-۴۰ نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی شامل پرده آببند به عمق ۲۰ سانتی متر نشان داده شده است. جدول شماره ۳-۱ مشاهددهای آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۶۱ سانتی متر را نشان داده است. در ستون اول فاصله پرده آببند از ابتدای سد بر حسب سانتی متر و در ستون دوم عمق پرده آببند بر حسب سانتی متر و در ستون سوم اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست بر حسب سانتی متر و در ستون چهارم دبی نشت بر حسب میلی لیتر بر دقیقه نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۰- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۶۱ سانتیمتر

۳-۶-۱-۱- دبی نشت

سری اول آزمایش‌ها برای نمونه سد به طول ۶۱ سانتی متر شامل ۲۳ آزمایش با پارامترهای زیر

می‌باشد:

- طول کف بالادست ۱۴/۴ سانتی متر
- طول کف پایین دست ۴۲/۶ سانتی متر
- عمق پرده آب‌بند ۲۰ سانتی متر و محل قرارگیری در ابتدای سد
- تعداد ۲۳ اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست
- مدت زمان اندازه‌گیری هر دبی نشت ۶۰ ثانیه

جدول ۳-۱- مشاهددهای آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۶۱ سانتی متر

فاصله پرده آببند از ابتدای سد (cm)	عمق پرده آببند بر حسب سانتی متر	اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست (cm)	دبی نشت بر حسب میلی لیتر در دقیقه
.	۲۰	۲۲/۵	۶۶
.	۲۰	۲۱/۵	۶۰
.	۲۰	۲۰/۵	۵۸
.	۲۰	۱۹/۵	۵۲
.	۲۰	۱۸/۵	۵۰
.	۲۰	۱۸	۴۸
.	۲۰	۱۷/۵	۴۷
.	۲۰	۱۷	۴۵
.	۲۰	۱۶/۵	۴۴
.	۲۰	۱۵/۵	۴۱
.	۲۰	۱۵	۳۹
.	۲۰	۱۴/۵	۳۸/۵
.	۲۰	۱۴	۳۶/۵
.	۲۰	۱۳/۵	۳۵
.	۲۰	۱۳	۳۳
.	۲۰	۱۲/۵	۳۱
.	۲۰	۱۲	۲۹/۵
.	۲۰	۱۱/۵	۲۸
.	۲۰	۱۱	۲۶/۵
.	۲۰	۱۰/۵	۲۵
.	۲۰	۱۰	۲۳/۵
.	۲۰	۹/۵	۲۲
.	۲۰	۹	۲۱/۵

۳-۶-۱-۲- زیر فشار با حضور یک پرده آب‌بند

جدول ۲-۳ مقادیر زیر فشار با قرائت پیزومترهای کف در ۸ اختلاف هد ۲۲/۵، ۲۱/۵، ۱۴/۵، ۱۲/۵، ۱۱/۵ و ۹ سانتیمتر را نشان می‌دهد. در ردیف اول مقادیر اختلاف ارتفاع و در ستونهای زیرین فشارهای پیزومتری قرائت شده برای ۸ پیزومتر نشان داده شده است.

سری اول آزمایش‌ها برای نمونه سد به طول ۶۱ سانتی متر، طول کف بالادست ۱۴/۴ سانتی متر، پایین دست ۴۲/۶ سانتی متر، عمق پرده آب‌بند ۲۰ سانتی متر می باشد.

جدول ۲-۳- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیزومتری با طول مدل سد ۶۱ سانتی متر

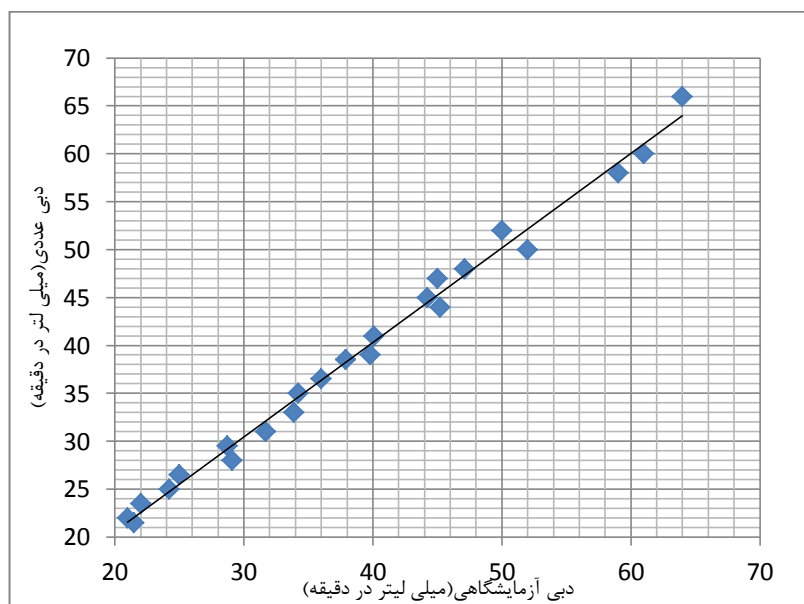
اختلاف ارتفاع	۲۲/۵	۲۱/۵	۱۴/۵	۱۲/۵	۱۱/۵	۹
ارتفاع پیزومتری						
شماره پیزومتر	۱	۱۶	۱۴	۱۲/۵	۱۱/۵	۱۰/۵
	۲	۱۵/۴	۱۳/۵	۱۲	۱۱	۱۰
	۳	۱۴/۸	۱۲/۹	۱۱/۷	۱۰/۶	۹/۷
	۴	۱۴/۲	۱۲/۴	۱۱	۱۰/۲	۹/۴
	۵	۱۳/۶	۱۲	۱۰/۷	۱۰	۸/۶
	۶	۸	۶/۵	۵/۳	۴/۵	۳/۸
	۷	۷/۸	۶/۴	۵/۲	۴/۴	۳/۸
	۸	۷/۲	۶/۳	۵/۱	۴/۴	۳/۸

۳-۶-۱-۳- صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۶۱ سانتی متر)

برای مقایسه کمی روش‌ها از ضریب همبستگی (RSQ) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به شرح زیر استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \hat{x}_i)}{x_i} \right)^2 \right]}$$

که در آن x_i = مقدار مشاهداتی، $\hat{x}_i$ = مقدار محاسبه شده و $\bar{x}$ = میانگین مقادیر مشاهداتی است.

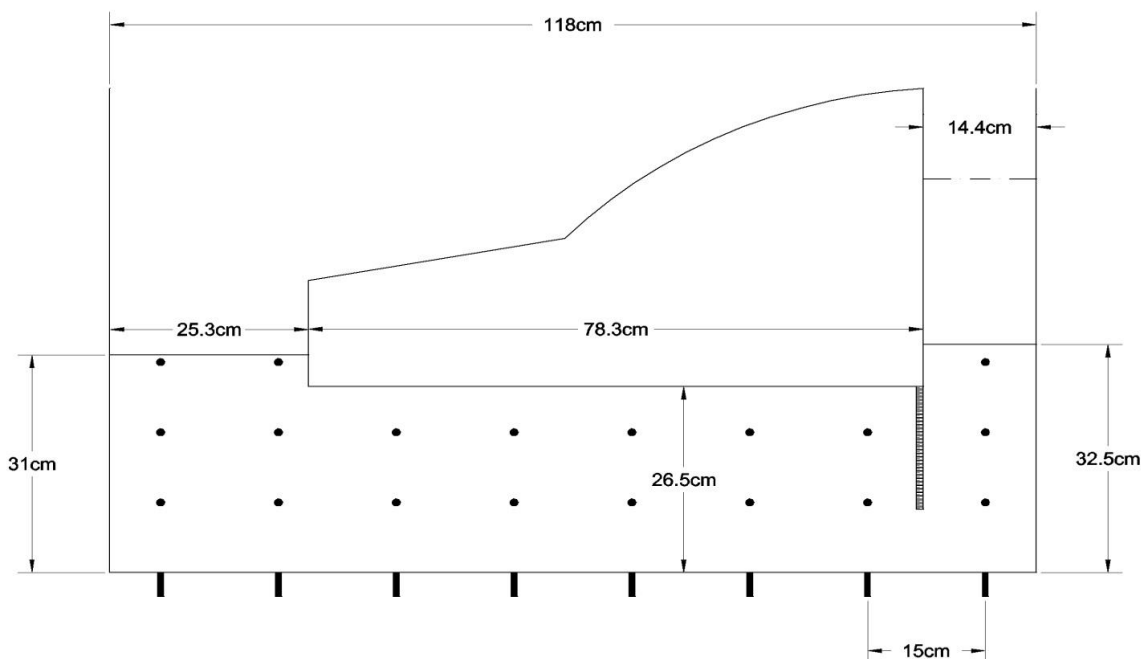


شکل ۳-۴۱- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و عددی

نتایج بدست آمده از روش آزمایشگاهی و مقایسه آن با روش عددی و محاسبه مجذور ضریب همبستگی برابر $R^2 = 0.9916$ و $RSME = 0.02379$ نشان دهنده دقت قابل قبول روش عددی در محاسبه مقادیر دبی نشت می باشد.

۳-۶-۲- پرده آببند ابتدای سد و طول سد ۷۸/۳ سانتی متر

شکل ۳-۴۲ نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی شامل پرده آببند به عمق ۲۰ سانتی متر نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۲- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۷۸/۳ سانتیمتر

۳-۶-۲-۱- دبی نشت

جدول شماره ۳-۳ مشاهده‌های آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۷۸/۳ سانتی متر را نشان داده است. در ستون اول فاصله پرده آببند از ابتدای سد بر حسب سانتی‌متر و در ستون دوم عمق پرده آببند بر حسب سانتی متر و در ستون سوم اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست بر حسب سانتی متر و

در ستون چهارم دبی نشت بر حسب میلی‌لیتر بر دقیقه نشان داده شده است. سری دوم آزمایشات برای نمونه سد به طول ۷۸/۳ سانتی متر شامل ۲۰ آزمایش با پارامترهای زیر می‌باشد:

- طول خاک بالادست ۱۴/۴ سانتی متر
- طول خاک پایین دست ۲۵/۳ سانتی متر
- عمق پرده آب‌بند ۲۰ سانتی متر و محل قرارگیری در ابتدای سد
- تعداد ۲۰ اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست
- مدت زمان اندازه‌گیری هر دبی نشت ۶۰ ثانیه

جدول ۳-۳- مشاهددهای آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۷۸/۳ سانتی متر

فاصله پرده از ابتدای سد	عمق پرده آببند بر حسب سانتی متر	اختلاف بار ابی بالادست و پایین دست	دبی نشت بر حسب میلی لیتر در دقیقه
۰	۲۰	۲۲/۵	۶۱
۰	۲۰	۲۲	۶۰
۰	۲۰	۲۱/۵	۶۰
۰	۲۰	۲۱	۵۹/۵
۰	۲۰	۲۰/۵	۵۹
۰	۲۰	۲۰	۵۷
۰	۲۰	۱۹/۵	۵۴/۵
۰	۲۰	۱۹	۵۳/۵
۰	۲۰	۱۸/۵	۵۳
۰	۲۰	۱۸	۵۱
۰	۲۰	۱۷/۵	۵۰
۰	۲۰	۱۷	۴۹
۰	۲۰	۱۶/۵	۴۷
۰	۲۰	۱۶	۴۵/۵
۰	۲۰	۱۵/۵	۴۴
۰	۲۰	۱۵	۴۲
۰	۲۰	۱۴/۵	۴۰
۰	۲۰	۱۴	۳۹
۰	۲۰	۱۳/۵	۳۷
۰	۲۰	۱۳	۳۶

۳-۶-۲-۲- زیر فشار با حضور یک پرده آب‌بند(طول سد ۷۸/۳)

در جدول ۴-۳ مقادیر زیر فشار با قرائت پیزومترهای کف در ۱۰ اختلاف هد ۲۲/۵، ۲۰/۵، ۱۹/۵، ۱۸/۵، ۱۷/۵، ۱۶/۵، ۱۵/۵، ۱۴/۵، ۱۳/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر نشان داده شده است. ردیف اول اختلاف هد بالادست و پایین دست و ستونهای زیرین مقدار فشار ۸ پیزومتر را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیزومتری با طول مدل سد ۷۸/۳ سانتی متر

اختلاف ارتفاع										شماره پیزومتر
ارتفاع پیزومتری										
۱۱/۲	۱۱/۴	۱۲	۱۲/۵	۱۲/۹	۱۳/۴	۱۴/۸	۱۴/۱	۱۵	۱۵/۸	
۱۰/۷	۱۱/۲	۱۱/۶	۱۲/۱	۱۲/۵	۱۳	۱۳/۵	۱۳/۷	۱۴/۲	۱۵	۲
۱۰/۴	۱۰/۸	۱۱/۲	۱۱/۷	۱۱/۹	۱۲/۴	۱۲/۹	۱۳	۱۳/۴	۱۴/۱	۳
۱۰	۱۰/۴	۱۰/۸	۱۱	۱۱/۴	۱۱/۹	۱۲/۳	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۳/۸	۴
۹/۶	۱۰	۱۰/۵	۱۰/۷	۱۱	۱۱/۵	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۲/۴	۱۳	۵
۹/۳	۹/۶	۱۰	۱۰/۳	۱۰/۸	۱۱/۳	۱۱/۵	۱۱/۳	۱۲	۱۲/۷	۶
۳/۹	۴/۳	۴/۷	۵	۵/۳	۵/۵	۵/۹	۶/۳	۶/۷	۷	۷
۳/۹	۴/۳	۴/۷	۵	۵/۳	۵/۵	۵/۹	۶/۳	۶/۷	۷	۸

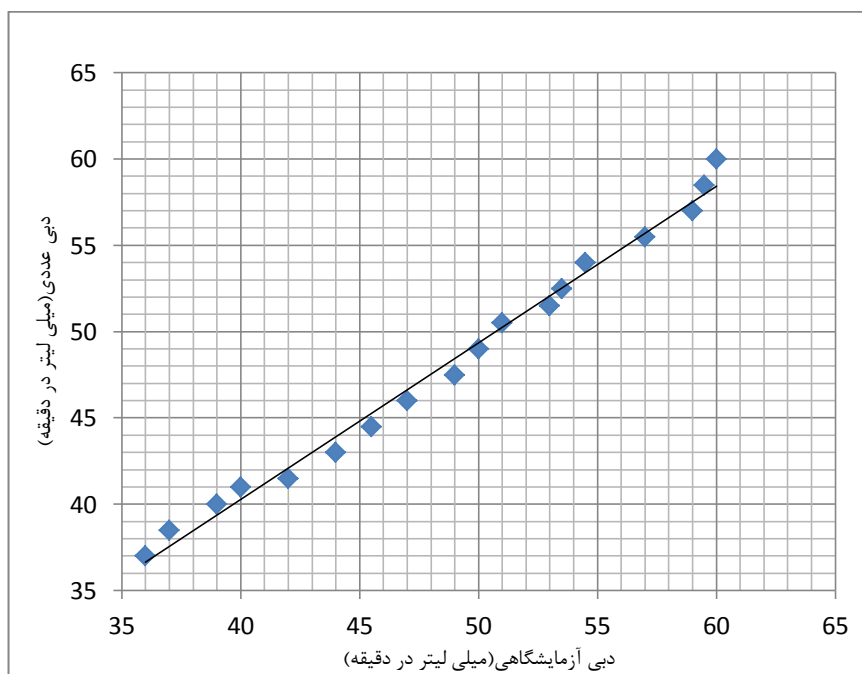
۳-۲-۶-۳- صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۷۸/۳ سانتی متر)

مطابق شکل ۳-۴۳ برای مقایسه کمی روش‌ها از ضریب همبستگی (RSQ) و مجذور میانگین

مربعات خطا (RMSE) به شرح زیر استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \hat{x}_i)}{x_i} \right)^2 \right]}$$

که در آن x_i = مقدار مشاهداتی، $\hat{x}_i$ = مقدار محاسبه شده و $\bar{x}$ = میانگین مقادیر مشاهداتی است.



شکل ۳-۴۳- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار عددی

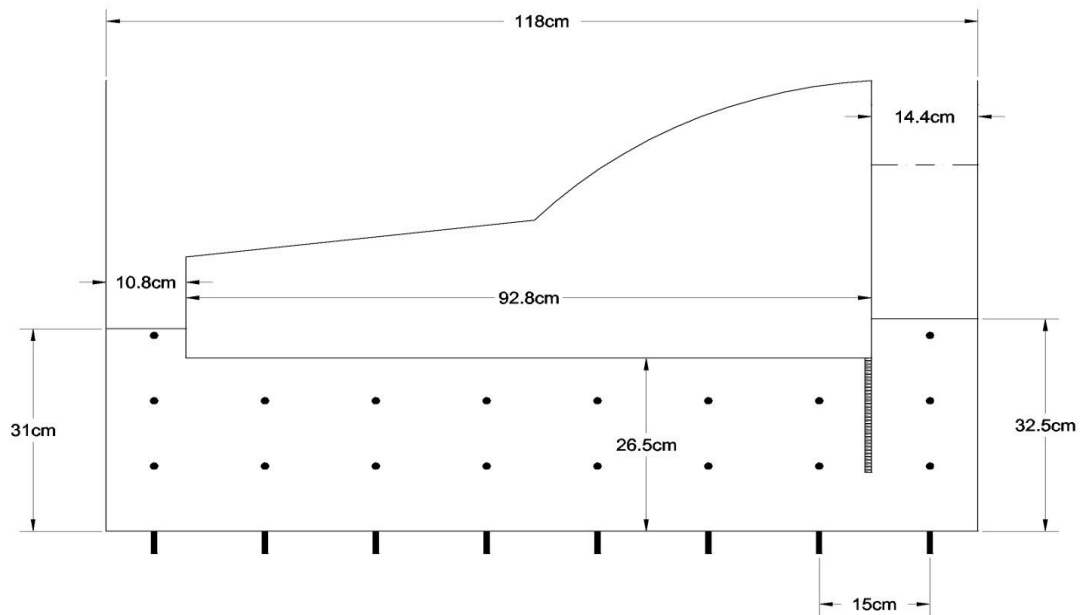
نتایج بدست آمده از روش آزمایشگاهی و مقایسه آن با روش عددی و محاسبه مجذور ضریب همبستگی

برابر $R^2 = 0.9867$ و $RSME = 0.03289$ نشان دهنده دقت قابل قبول روش عددی در محاسبه مقادیر

دبی نشت می باشد.

۳-۶-۳- کات آف ابتدای سد و طول سد ۹۲/۸ سانتی متر

شکل ۳-۴۴ نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی شامل پرده آببند به عمق ۲۰ سانتی متر نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۴- نمای مدل آزمایشگاه سد به طول ۷۸/۳ سانتیمتر

۳-۶-۳-۱- دبی نشت

جدول شماره ۳-۵ مشاهده‌های آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۹۲/۸ سانتی متر را نشان داده است. در ستون اول فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد بر حسب سانتی‌متر و در ستون دوم عمق پرده آب‌بند بر حسب سانتی متر و در ستون سوم اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست بر حسب سانتی متر و در ستون چهارم دبی نشت بر حسب میلی‌لیتر بر دقیقه نشان داده شده است. سری سوم آزمایشات برای نمونه سد به طول ۹۲/۸ سانتی متر شامل ۱۹ آزمایش با پارامترهای زیر می‌باشد:

- طول خاک بالادست ۱۴/۴ سانتی متر
- طول خاک پایین دست ۱۰/۸ سانتی متر
- عمق پرده آب‌بند ۲۰ سانتی متر و محل قرارگیری در ابتدای سد
- تعداد ۱۹ اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست
- مدت زمان اندازه‌گیری هر دبی نشت ۶۰ ثانیه

جدول ۳-۵- مشاهددهای آزمایشگاهی دبی نشت با طول مدل سد ۹۲/۸ سانتی متر

فاصله پرده از ابتدای سد	عمق پرده آببند بر حسب سانتی متر	اختلاف بار ابی بالادست و پایین دست	دبی نشت بر حسب میلی لیتر در دقیقه
.	۲۰	۲۲/۵	۵۱
.	۲۰	۲۲	۵۱
.	۲۰	۲۱/۵	۵۰
.	۲۰	۲۱	۴۸
.	۲۰	۲۰/۵	۴۶
.	۲۰	۲۰	۴۵
.	۲۰	۱۹/۵	۴۳
.	۲۰	۱۹	۴۲
.	۲۰	۱۸/۵	۴۱
.	۲۰	۱۸	۴۰
.	۲۰	۱۷/۵	۳۹
.	۲۰	۱۷	۳۸
.	۲۰	۱۶/۵	۳۶/۵
.	۲۰	۱۶	۳۵
.	۲۰	۱۵/۵	۳۴
.	۲۰	۱۵	۳۳
.	۲۰	۱۴/۵	۳۲
.	۲۰	۱۴	۳۱
.	۲۰	۱۳/۵	۳۰/۲

۳-۶-۲- زیر فشار با حضور یک پرده آب‌بند

در جدول ۳-۶ مقادیر زیر فشار با قرائت پیزومترهای کف در ۱۰ اختلاف هد ۲۲/۵، ۲۰/۵، ۱۹/۵،

۱۸/۵، ۱۷/۵، ۱۶/۵، ۱۵/۵، ۱۴/۵، ۱۳/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر بدست آمده است.

سری سوم آزمایش‌ها برای نمونه سد به طول ۹۲/۸ سانتی متر، خاک بالادست ۱۴/۴ سانتی متر، پایین

دست ۱۰/۸ سانتی متر، عمق پرده آب‌بند ۲۰ سانتی متر می‌باشد.

جدول ۳-۶- مشاهده‌های آزمایشگاهی فشار پیزومتری با طول مدل سد ۹۲/۸ سانتی متر

اختلاف ارتفاع											
ارتفاع پیزومتری											
۱۲/۵	۱۳/۵	۱۴/۵	۱۵/۵	۱۶/۵	۱۷/۵	۱۸/۵	۱۹/۵	۲۰/۵	۲۲/۵	۱	شماره پیزومتر
۱۱/۲	۱۱/۴	۱۲	۱۲/۵	۱۲/۹	۱۳/۴	۱۴/۸	۱۴/۱	۱۵	۱۵/۸	۲	
۱۰/۷	۱۱/۲	۱۱/۶	۱۲/۱	۱۲/۵	۱۳	۱۳/۵	۱۳/۷	۱۴/۲	۱۵	۳	
۱۰/۴	۱۰/۸	۱۱/۲	۱۱/۷	۱۱/۹	۱۲/۴	۱۲/۹	۱۳	۱۳/۴	۱۴/۱	۴	
۱۰	۱۰/۴	۱۰/۸	۱۱	۱۱/۴	۱۱/۹	۱۲/۳	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۳/۸	۵	
۹/۶	۱۰	۱۰/۵	۱۰/۷	۱۱	۱۱/۵	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۲/۴	۱۳	۶	
۹/۳	۹/۶	۱۰	۱۰/۳	۱۰/۸	۱۱/۳	۱۱/۵	۱۱/۳	۱۲	۱۲/۷	۷	
۳/۹	۴/۳	۴/۷	۵	۵/۳	۵/۵	۵/۹	۶/۳	۶/۷	۷	۸	

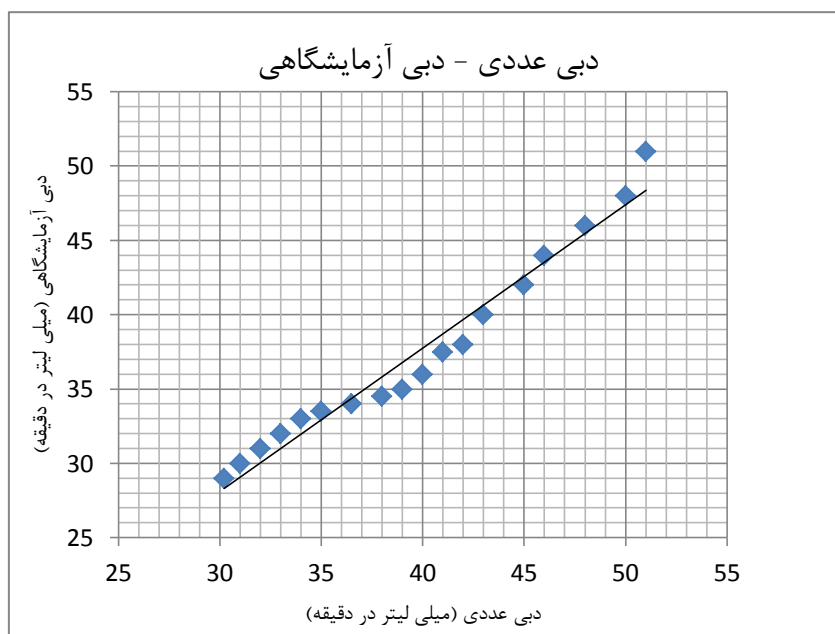
۳-۳-۶-۳- صحت سنجی مدل عددی (طول سد ۹۲/۸ سانتی متر)

مطابق شکل ۳-۴۵ برای مقایسه کمی روش‌ها از ضریب همبستگی (RSQ) و مجذور میانگین

مربعات خطا (RMSE) به شرح زیر استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \hat{x}_i)}{x_i} \right)^2 \right]}$$

که در آن x_i = مقدار مشاهداتی، $\hat{x}_i$ = مقدار محاسبه شده و $\bar{x}$ = میانگین مقادیر مشاهداتی است.



شکل ۳-۴۵- مقایسه مقادیر دبی نشت در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار عددی

نتایج بدست آمده از روش آزمایشگاهی و مقایسه آن با روش عددی و محاسبه مجذور ضریب همبستگی

برابر $R^2 = ۰/۹۱۱۲$ و $RSME = ۰/۰۶۸۷۵۱$ نشان دهنده دقت قابل قبول روش عددی در محاسبه مقادیر

دبی نشت می باشد.

فصل ۴

نتایج و بحث

در این فصل از پایان نامه نتایج بدست آمده از مدل عددی $seep/w$ به تعداد ۴۰۰۰ داده مورد تحلیل قرار گرفت. این تعداد داده در پنج فصل مجزا شامل موارد زیر بررسی گردید:

- وجود یک پرده آببند در یک لایه خاک

- وجود یک پرده آببند در یک لایه خاک ناهمسان ($K_x \neq K_y$)

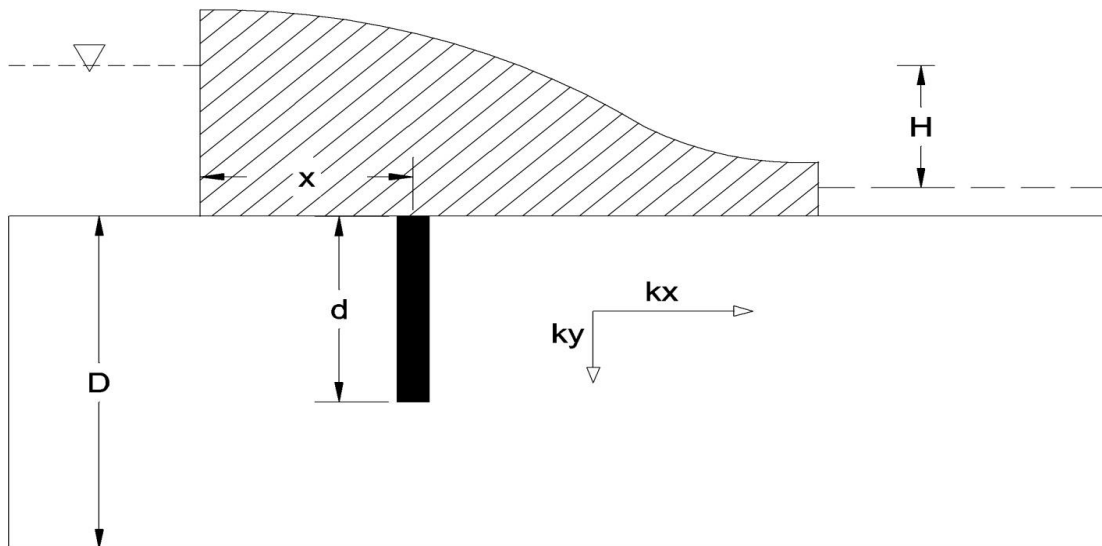
- وجود یک پرده آببند زاویه دار در یک لایه خاک

- وجود دو پرده آببند در یک لایه خاک

- وجود دو پرده آببند زاویه دار در یک لایه خاک

در نهایت با استفاده از داده‌های عددی و انجام تجزیه و تحلیل آماری روابط رگرسیونی، نمودار تغییرات دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی، طول مسیر جریان در مقابل پارامترهای مختلف خاک بدست آمده و مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- نتایج حل عددی با حضور یک پرده آب‌بند



شکل ۴-۱- پارامترهای مورد استفاده

پارامترهای مورد استفاده:

H: اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست

L: طول سد بر حسب متر

D: عمق پی بر حسب متر

d: عمق پرده آب‌بند بر حسب متر

X: فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد بر حسب متر

K_x : ضریب نفوذپذیری افقی خاک بر حسب متر بر ثانیه

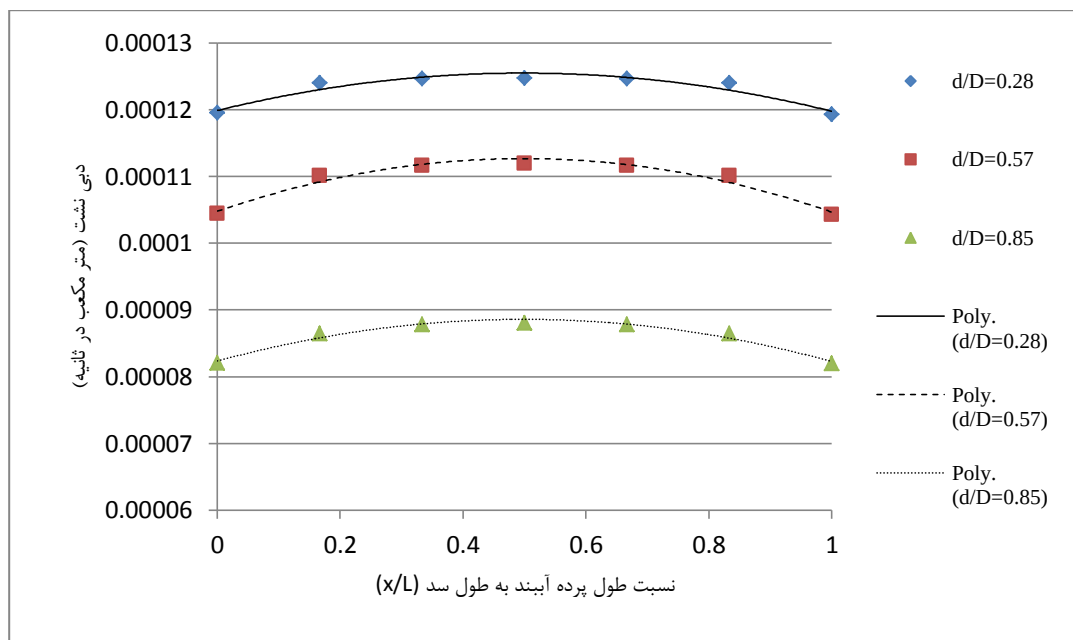
K_y : ضریب نفوذپذیری قائم خاک بر حسب متر بر ثانیه

x/L : فاکتور بدون بعد نسبت فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد به طول سد

d/D : فاکتور بدون بعد عمق پرده آب‌بند به عمق پی

۴-۲-۱- تغییرات دبی نشت با حضور یک پرده آب‌بند

در شکل ۴-۲ تغییرات دبی نشت در مقابل حضور پرده آب‌بند در مکانهای مختلف زیر سد نشان داده شده است. حضور پرده آب‌بند در ابتدای سد و انتهای سد باعث کاهش بیشتر دبی نشت می‌شود هرچه کات آف به سمت میان سد حرکت کند دبی نشت افزایش می‌یابد به‌طوری‌که حضور پرده آب‌بند در وسط سد کمترین تاثیر را بر روی کاهش دبی نشت دارد. عمق پرده آب‌بند نیز تاثیر زیادی بر کاهش دبی نشت دارد همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود هرچه عمق پرده آب‌بند بیشتر شود دبی نشت نیز به شدت کاهش می‌یابد لذا در حالتی که نسبت عمق پرده آب‌بند به عمق پی $d/D=0.85$ شود میزان دبی نشت ۲۳٪ کمتر از حالت بدون حضور دیوار سپری است.



شکل ۴-۲- تغییرات دبی نشت با حضور کات آف در طول زیر سد

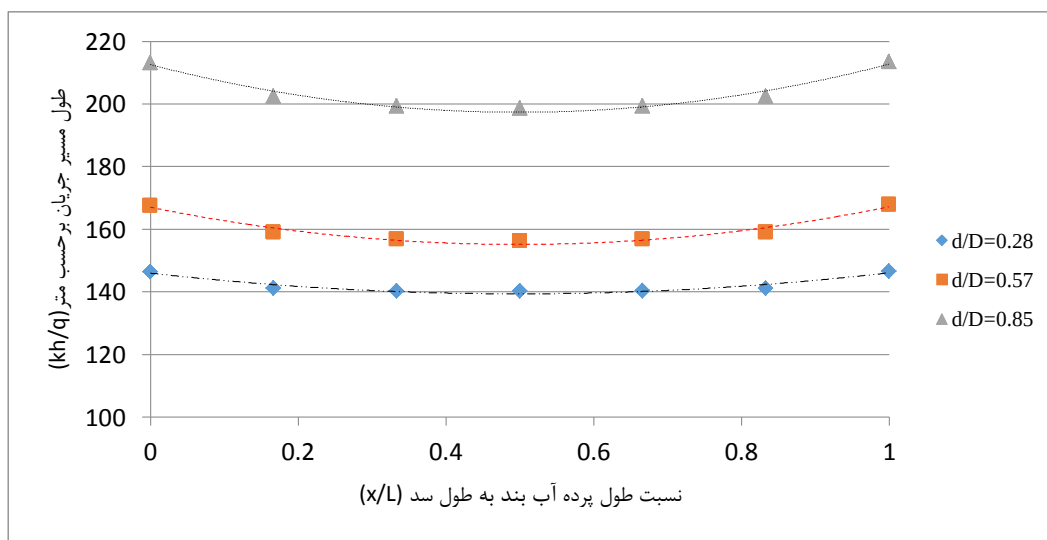
۲-۲-۴- تغییرات طول خزش جریان آب در زیر سد

طبق قانون دارسی داریم:

$$v = ki \xrightarrow{i = \frac{\Delta h}{\Delta L}} v = k \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (۱-۴)$$

$$\Delta L = \frac{kh}{q}$$

مقدار $\frac{kh}{q}$ برابر طول معادلی برای مسیر جریان می باشد که وابسته به اختلاف ارتفاع آب بالادست و پایین دست و ضریب نفوذپذیری خاک می باشد. در شکل ۳-۴ تغییرات طول خزش در مقابل x/L با حضور سه عمق متفاوت پرده آببند ترسیم شده است. حضور پرده آببند باعث افزایش طول معادل در نتیجه افزایش افت مسیر و کاهش دبی جریان می گردد. بیشترین تاثیر مکانی دیوار در ابتدای بالادست یا انتهای پایین دست سد می باشد.



شکل ۳-۴- تغییرات kh/q با حضور پرده آببند در طول زیر سد

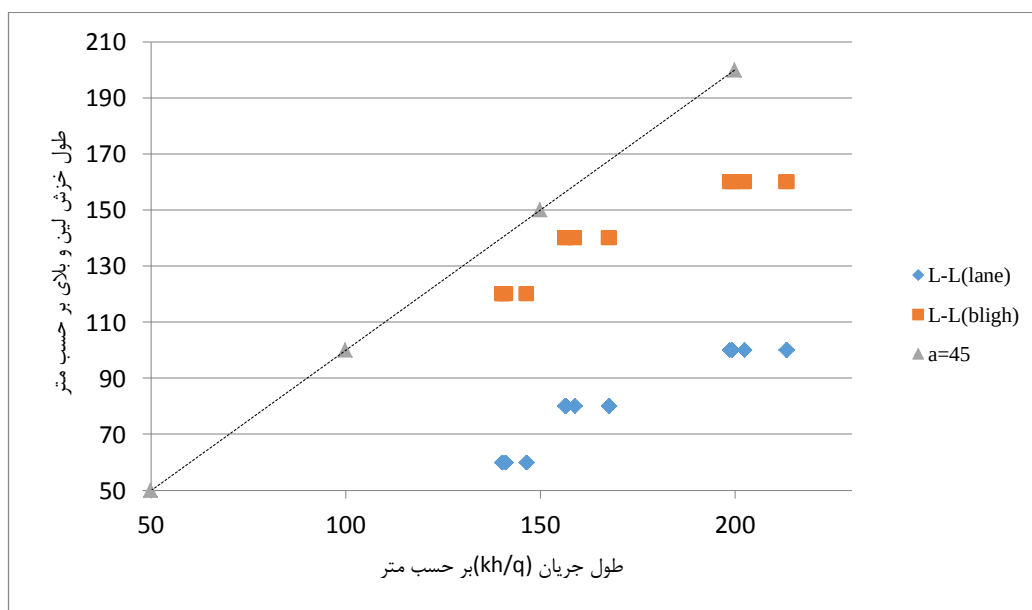
۳-۲-۴- ارزیابی طول معادل مسیر لین و بلای

در شکل ۴-۴ تغییرات طول خزش لین و بلای در مقابل طول خزش واقعی $\frac{kh}{q}$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود معادلات لین و بلای موقعیت مکانی پرده‌های آب‌بند، عمق پی و طول خاک بالادست و پایین دست را در نظر نمی‌گیرد، ولیکن مقادیر بدست آمده از معادله بلای به مقادیر حل عددی نزدیک‌تر است.

برای تعیین ضرایب تصحیح مقادیر لین و بلای برای خاک‌های یک لایه در حضور یک پرده آب‌بند می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$\frac{kh}{q} = 1.5445L_{bligh} - 47.234 \quad (۲-۴)$$

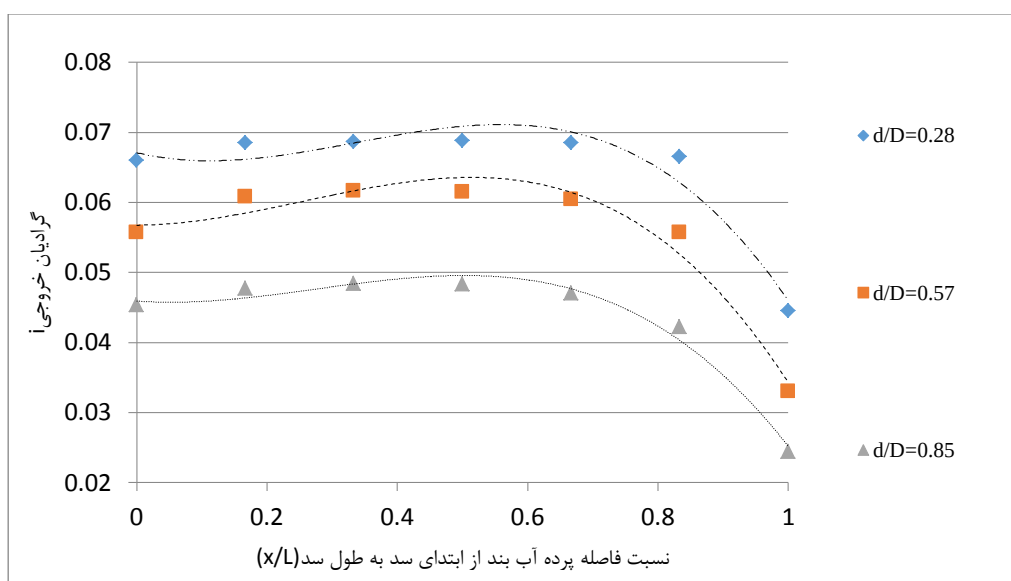
$$\frac{kh}{q} = 1.5445L_{lane} + 45.439 \quad (۳-۴)$$



شکل ۴-۴- تغییرات طول مسیر لین و بلای نسبت به طول واقعی kh/q

۴-۲-۴- تاثیر یک پرده آب‌بند بر گرادیان خروجی

در شکل ۴-۵ تغییرات گرادیان خروجی نسبت به حضور دیوار سپری در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. حضور پرده آب‌بند در انتهای سد بیشترین تاثیر را در کاهش گرادیان خروجی ایفا می‌کند. هرچه مکان پرده‌های آب‌بند از انتهای سد به سمت بالادست تغییر کند گرادیان خروجی افزایش می‌یابد بنابراین می‌توان گفت بهترین مکان حضور یک پرده آب‌بند در زیر سد جهت کاهش دبی نشت، کاهش گرادیان خروجی و افزایش افت مسیر انتهای پایین دست سد می‌باشد.

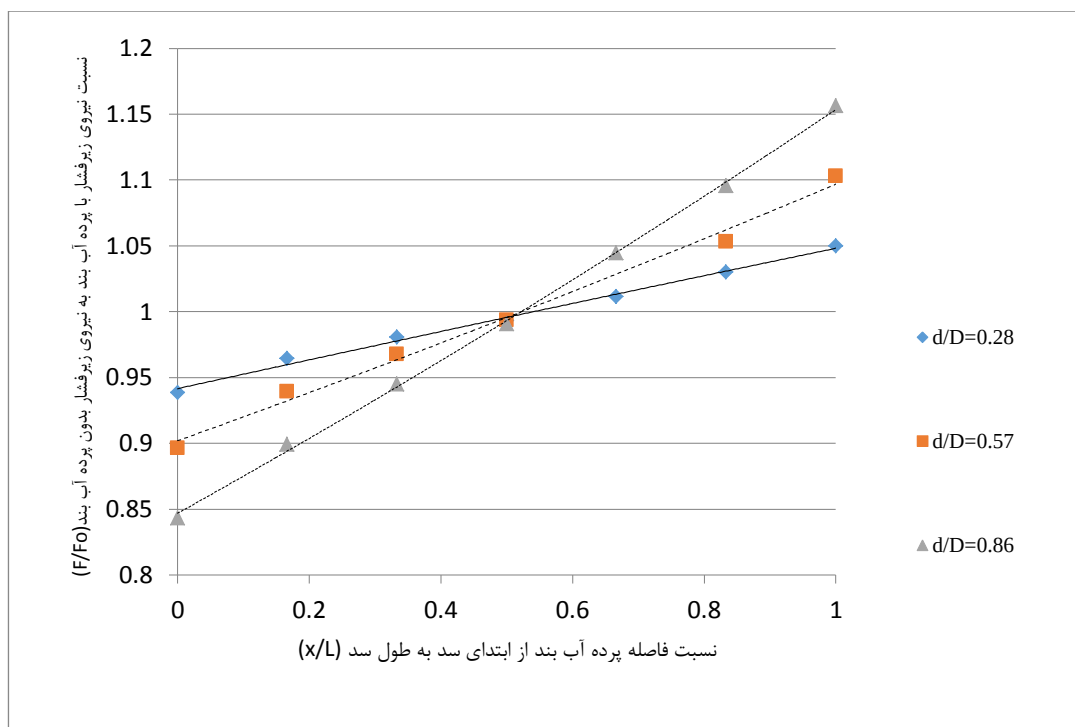


شکل ۴-۵- تغییرات گرادیان خروجی با حضور پرده آب‌بند در طول زیر سد

۴-۲-۵- تاثیر پرده آب‌بند بر نیروی زیر فشار

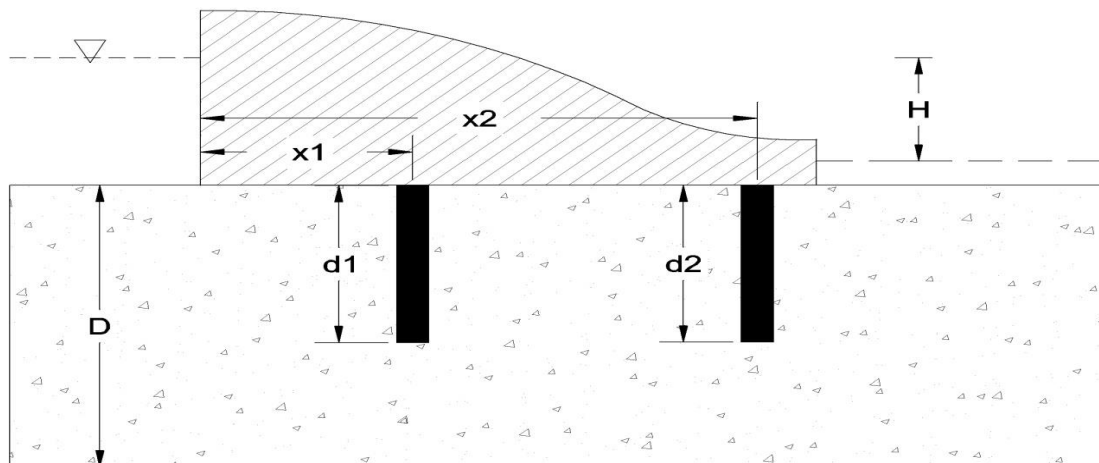
به منظور بررسی اثرات عمق و موقعیت پرده‌های آب‌بند قائم بر مقدار نیروی زیر فشار، مقادیر قرائت شده از شبکه پیزومتری مورد استفاده قرار گرفت. فرم بی‌بعد تغییرات نیروی زیر فشار با موقعیت دیواره

سپری به ازای عمق‌های مختلف دیواره در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. مقدار نیروی زیر فشار با انتگرال گیری از سطح زیر فشار (با استفاده از قاعده سیمپسون) در هر حالت قرارگیری پرده آب‌بند محاسبه گردید. مشاهده شد که با افزایش فاصله پرده آب‌بند از بالادست کف بند، همواره نیروی زیر فشار افزایش می‌یابد به طوری که حداقل و حداکثر مقدار نیروی زیر فشار به ترتیب در حالت قرارگیری دیواره سپری در انتهای بالادست و پایین دست کف بند حاصل می‌شود.



شکل ۴-۶- تغییرات نیروی زیر فشار با حضور دیوار سپری در طول زیر سد

۳-۴- نتایج حل عددی با حضور دو پرده آببند زیر سد



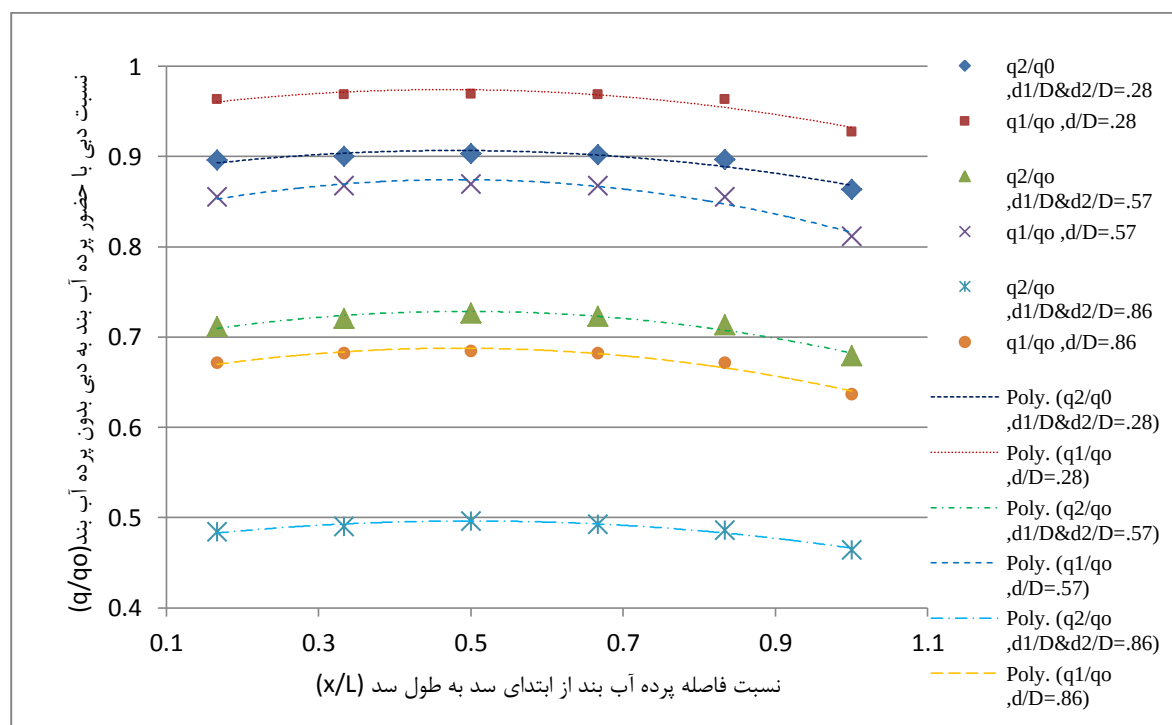
شکل ۴-۷- پارامترهای مورد استفاده در دو دیوار آببند قائم

پارامترهای مورد استفاده:

- H : اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست
- L : طول سد بر حسب متر
- D : عمق پی بر حسب متر
- D_1 : عمق پرده آببند اول بر حسب متر
- D_2 : عمق پرده آببند دوم بر حسب متر
- X_1 : فاصله پرده آببند اول از ابتدای سد بر حسب متر X_2 : فاصله آببند دوم از ابتدای سد بر حسب متر
- K_x : ضریب نفوذپذیری افقی خاک بر حسب متر بر ثانیه
- K_y : ضریب نفوذپذیری قائم خاک بر حسب متر بر ثانیه
- X_1/L : فاکتور بدون بعد نسبت فاصله پرده آببند اول از ابتدای سد به طول سد
- X_2/L : فاکتور بدون بعد نسبت فاصله پرده آببند دوم از ابتدای سد به طول سد
- d_1/D : فاکتور بدون بعد عمق پرده آببند اول به عمق پی
- d_2/D : فاکتور بدون بعد عمق پرده آببند دوم به عمق پی

۴-۳-۱- تغییرات دبی نشت با حضور دو پرده آببند

در نمودار شکل ۴-۸ نسبت تغییرات دبی نشت با حضور ۲ پرده آببند نسبت به عدم وجود آن (q_2/q_0) و نسبت تغییرات دبی نشت با حضور ۱ پرده آببند نسبت به عدم وجود پرده آببند (q_1/q_0) ترسیم شده است همانطور که در نمودار مشخص است عمق پرده‌های آببند تاثیر محسوسی در کاهش دبی نشت ایفا می‌کند همچنین وجود دو پرده آببند نسبت به یک پرده آببند می‌تواند دبی نشت را تا ۲۸٪ کاهش دهد، بالاترین کاهش دبی نشت برای موقعیت مکانی پرده آببند زمانی اتفاق می‌افتد که آببند ابتدایی در ابتدای بالادست سد و آببند انتهایی در انتهای پایین دست سد قرار گیرد.



شکل ۴-۸- نسبت تغییرات دبی نشت در حالت وجود یک و دو پرده آببند به عدم حضور پرده آببند

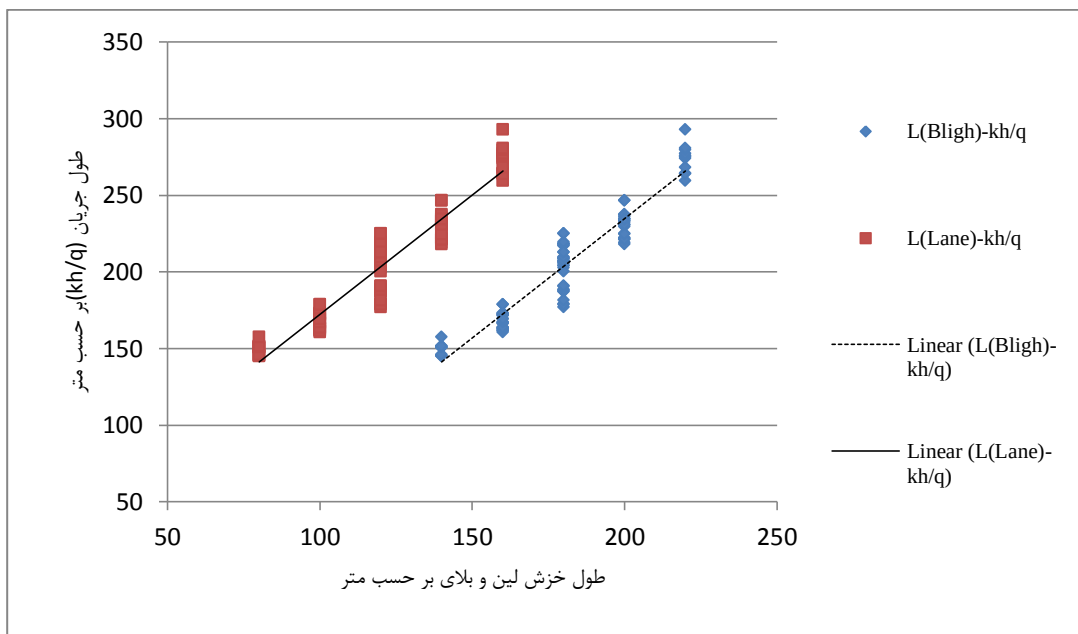
۴-۳-۲- تغییرات طول معادل جریان آب با حضور دو پرده آببند در زیر سد

همان طور که در شکل ۴-۹ ملاحظه می شود مقادیر لین و بلای در مقابل طول خزش ترسیم شده است، مقادیر بلای به داده های عددی نزدیکتر و دقت بالاتری دارند ولی باز هم این مقادیر همان طور که در شکل های ۴-۱۰ و ۴-۱۱ دیده می شود موقعیت مکانی پرده های آببند را در نظر نمی گیرد در این دو شکل با فرض یکسان بودن عمق پرده های آببند مقدار طول خزش با تغییر موقعیت مکانی برای دو آببند ترسیم شده است. در شکل ۴-۱۰ موقعیت آببند اول ثابت و در $x/L=0$ (ابتدای بالادست سد) قرار دارد هرچه آببند دوم به سمت انتهای سد حرکت کند طول خزش بیشتر شده و دبی نشت کمتر می شود که در نتیجه موقعیت بهینه آببند در ابتدا و انتهای سد برای به حداقل رساندن دبی نشت می باشد. در شکل ۴-۱۱ نیز دیده می شود وقتی آببند انتهایی ثابت و در پاشنه سد ($x/L=1$) قرار گیرد با حرکت آببند ابتدایی به سمت انتها طول خزش کاهش یافته در نتیجه دبی نشت افزایش می یابد. بر اساس شکل ۴-۹ که تغییرات مقادیر لین و بلای در مقابل $\frac{kh}{q}$ با حضور دو پرده آببند قائم ترسیم شده است،

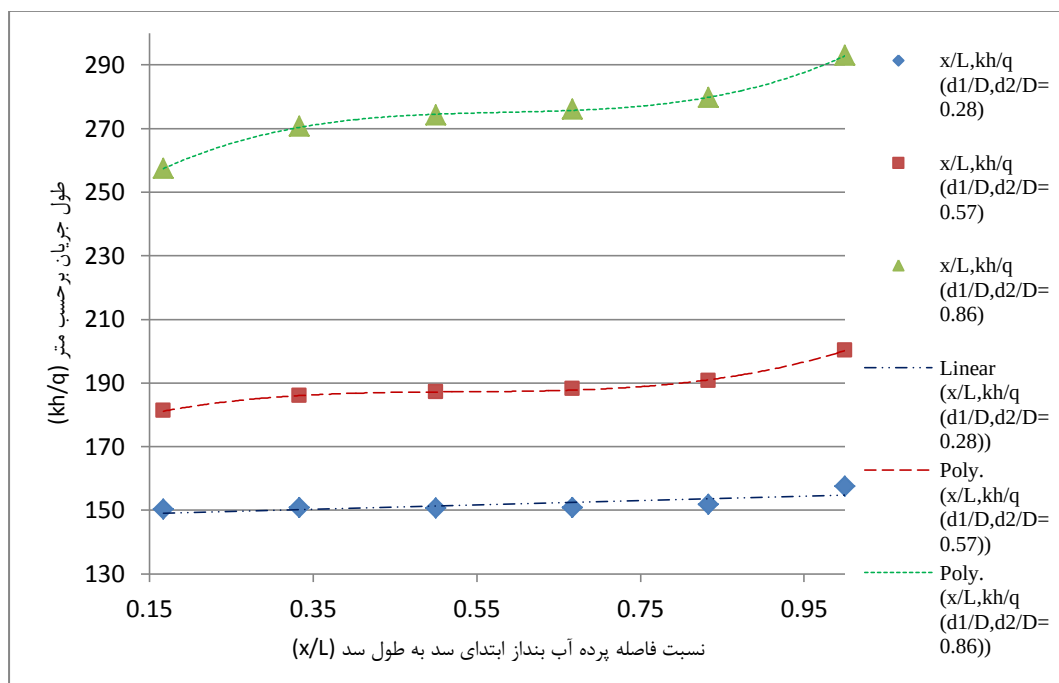
برای تعدیل مقادیر لین و بلای می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{kh}{q} = 1.5553L_{bligh} - 76.44 \quad (4-4)$$

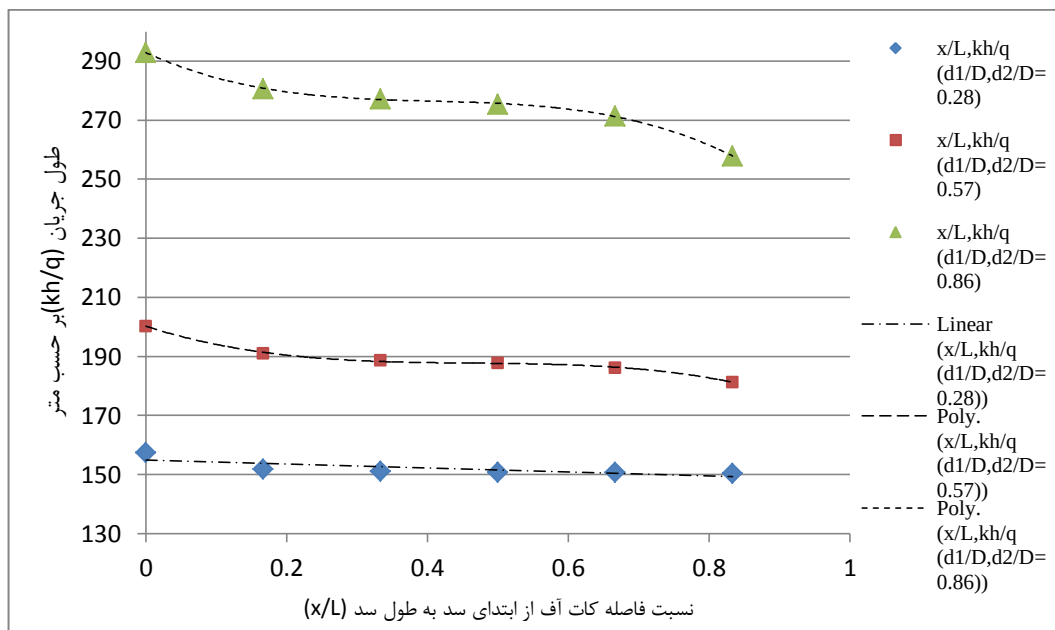
$$\frac{kh}{q} = 1.5553L_{lane} + 16.881 \quad (5-4)$$



شکل ۴-۹- تغییرات مقادیر لین و بلای در مقابل $\frac{kh}{q}$ با حضور دو پرده آببند قائم



شکل ۴-۱۰- تغییرات طول خزش با ثابت بودن آببند ابتدایی و تغییر مکان آببند انتهایی



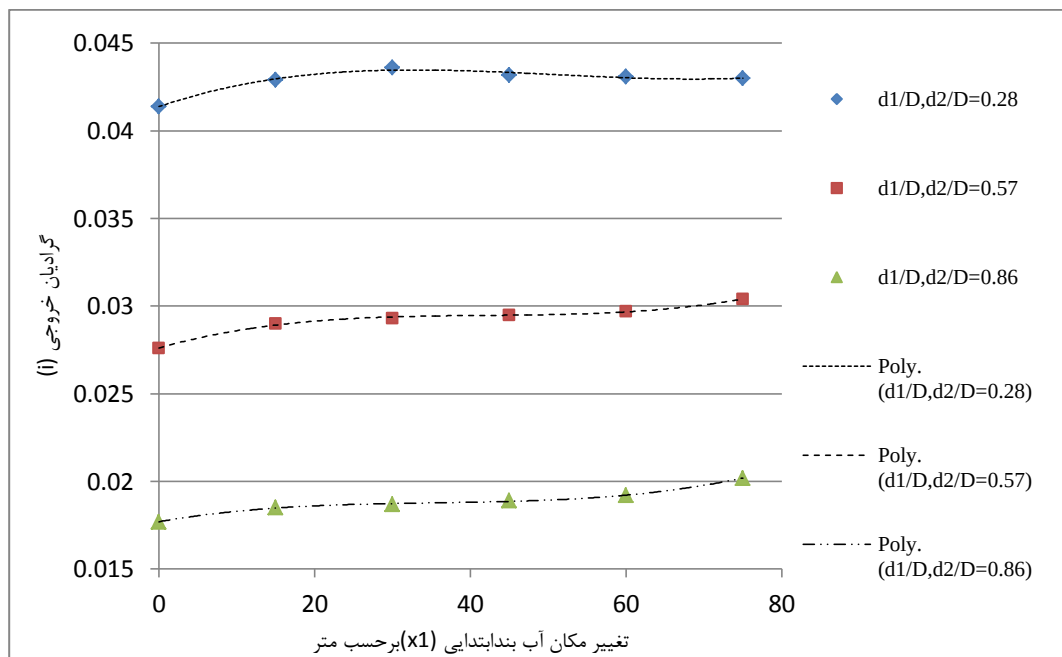
شکل ۴-۱۱- تغییرات طول خزش با ثابت بودن آببند انتهایی و تغییر مکان آببند ابتدایی

۴-۳-۳- تاثیر دو پرده آببند بر گرادیان خروجی

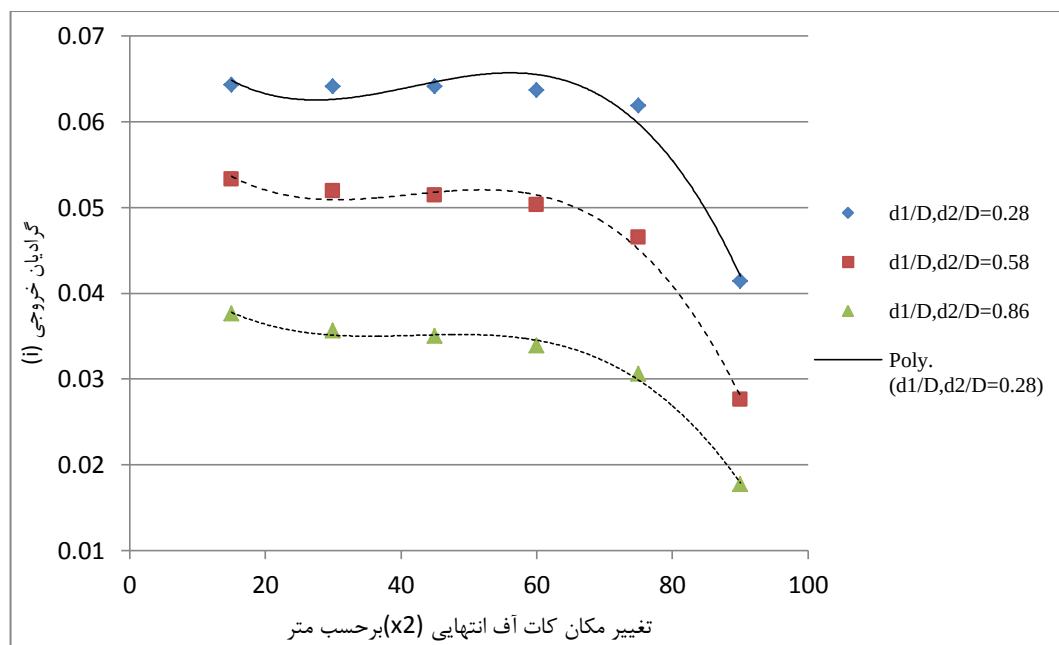
جهت تعیین اثر عمق و مکان دو پرده آببند قائم بر روی گرادیان خروجی نمودارهای ۴-۱۲ و ۴-۱۳

ارائه گردید که نتایج زیر حاصل می گردد :

گرادیان هیدرولیکی خروجی با تغییر عمق پرده آببند تغییر می یابد. تاثیر آببند ابتدایی کم و وجود آببند انتهایی تاثیر زیادی روی کاهش گرادیان خروجی دارد. هر چه آببند ابتدایی از بالادست سد به سمت پایین حرکت کند مقدار شیب هیدرولیکی افزایش یافته و هرچه آببند ثانویه از پایین دست به سمت بالادست حرکت کند مقدار گرادیان هیدرولیکی افزایش می یابد. بیشترین تاثیر پرده های آببند زمانی است که موقعیت مکانی آببند اول در ابتدای بالادست سد و آببند دوم در انتهای پایین دست سد قرار گیرد .

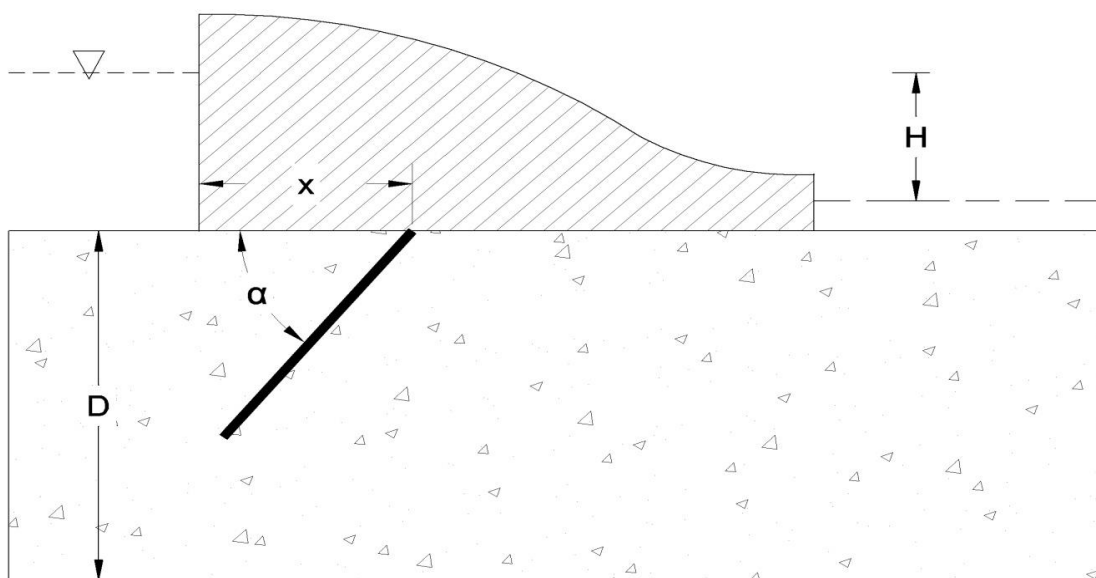


شکل ۴-۱۲- تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به تغییر مکان پرده آب بند اول



شکل ۴-۱۳- تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به تغییر مکان آب بند دوم

۴-۴- نتایج حل عددی با حضور یک پرده آببند زاویه دار زیر سد



شکل ۴-۱۴- پارامترهای مورد استفاده

پارامترهای مورد استفاده:

H : اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست L : طول سد بر حسب متر

D : عمق پی بر حسب متر d : عمق پرده آببند بر حسب متر

X : فاصله پرده آببند از ابتدای سد بر حسب متر

K_x, K_y : ضریب نفوذپذیری افقی و قائم خاک بر حسب متر بر ثانیه

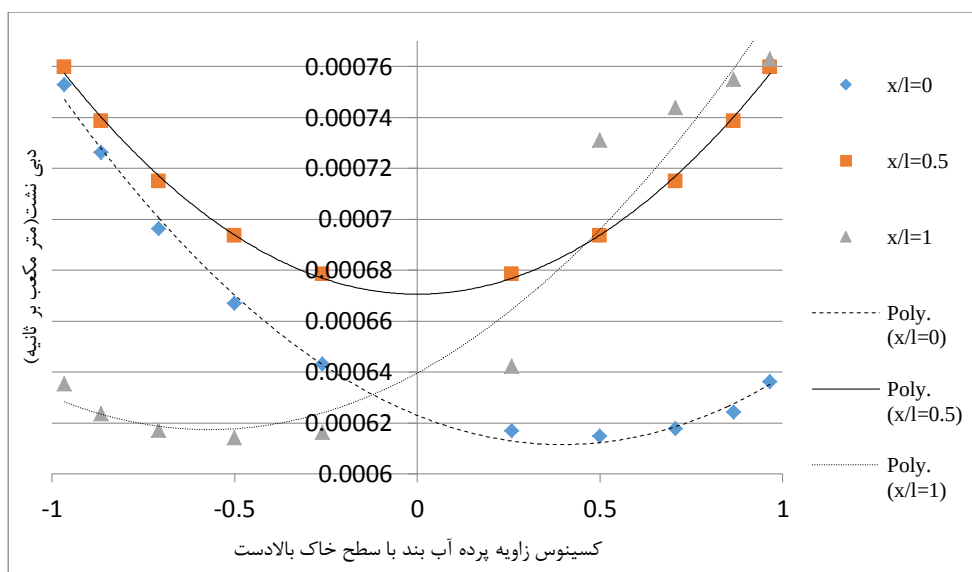
x/L : فاکتور بدون بعد نسبت فاصله پرده آببند از ابتدای سد به طول سد

d/D : فاکتور بدون بعد عمق پرده آببند به عمق پی

α : زاویه پرده آببند با سطح خاک بالادست

۱-۴-۴- تغییرات دبی نشت با حضور یک پرده آب‌بند زاویه دار

در شکل ۱۵-۴ تغییرات دبی نشت با تغییر زاویه پرده آب‌بند در سه مکان مختلف نشان داده شده است. غیر از مکان ابتدا و انتهای سد در بقیه نقاط بیشترین کاهش دبی نشت با زاویه قائم آب‌بند اتفاق می‌افتد ولی در آب‌بند ابتدایی در $\cos\alpha=0/5$ یعنی زاویه 60° درجه با سطح خاک بالادست بیشترین مقدار کاهش دبی اتفاق می‌افتد. در آب‌بند انتهایی بیشترین کاهش برای زمانی اتفاق می‌افتد که $\cos\alpha=-0/5$ یعنی پرده آب‌بند با سطح خاک بالادست زاویه 120° درجه بسازد.



شکل ۱۵-۴- تغییرات دبی نشت با تغییر زاویه پرده آب‌بند

۴-۴-۲- تغییرات طول خزش با تغییر زاویه کات آف

در قوانین لین و بلای دیواره های با زاویه کمتر از ۴۵ درجه به عنوان طول های افقی و بالاتر از ۴۵ درجه به عنوان طول های قائم در نظر گرفته می شود در شکل شماره ۴-۱۸ نشان داده شده که در یک عمق ثابت آببند مقادیر طول خزش با تغییر زاویه تغییر می یابد، مطابق شکل ۴-۱۷ مقادیر بلای و لین برای زوایای ۱۶۵، ۱۵۰، ۱۳۰، ۱۵ نسبت به سطح خاک بالادست، پرده آببند را بصورت افقی در نظر می گیرند که باعث ایجاد خطا در تعیین واقعی تر طول خزش می گردد درحالی که در حل عددی معادله لاپلاس زوایای کمتر از ۴۵ درجه نیز بر روی افزایش طول خزش و در نهایت کاهش دبی نشت تاثیر دارند. بنابراین نمی توان گفت صرفا زوایای کمتر از ۴۵ درجه به عنوان طول های افقی و زوایای بالاتر از ۴۵ به عنوان طول های قائم در نظر گرفته شوند. در شکل ۴-۱۶ تغییرات طول خزش لین و بلای در مقابل $\frac{kh}{q}$ با حضور یک دیوار سپری زاویه دار نشان داده شده است که با استفاده از این شکل می توان از روابط زیر برای تصحیح مقادیر لین و بلای استفاده کرد:

$$\frac{kh}{q} = 0.5829L_{lane} + 107.99 \quad (۴-۶)$$

$$\frac{kh}{q} = 0.5829L_{bligh} + 73.02 \quad (۴-۷)$$

طبق مقادیر عددی بدست آمده برای یک عمق پرده آببند مشخص $\frac{d}{D} = 0.57$ (نسبت عمق

آببند به عمق پی) با تغییر زاویه آببند نسبت به سطح خاک بالادست (α) مقادیر طول خزش با تقریب بالا بر روی یک منحنی درجه ۲ تغییر می کنند:

الف- پرده آببند در ابتدای بالا دست:

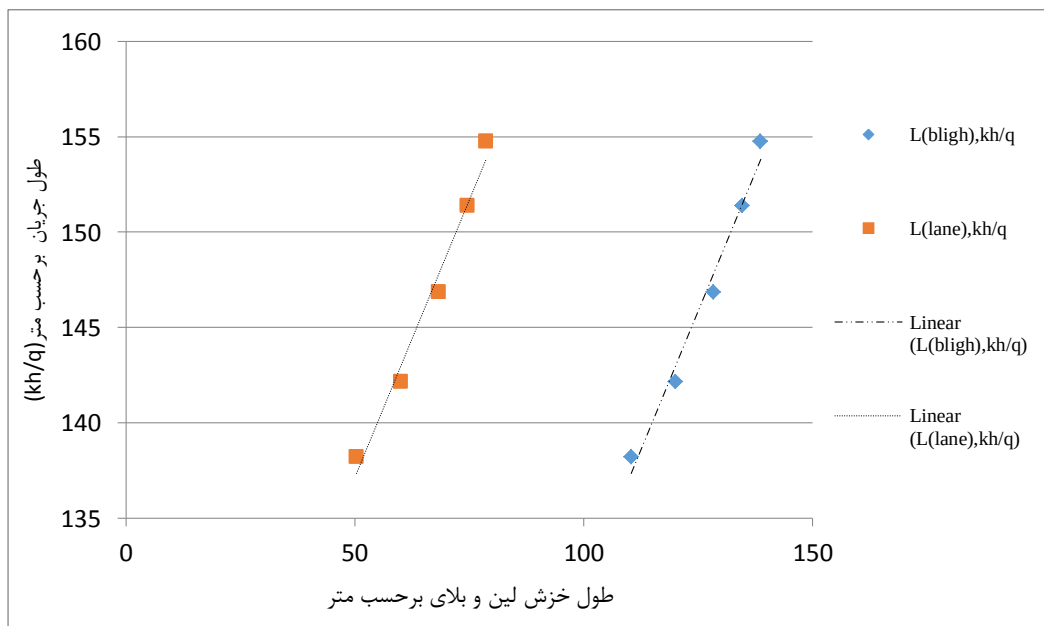
$$\frac{kh}{q} = -16.384 \cos^2 \alpha + 13.44 \cos \alpha + 168.18 \quad (R^2 = 0.9983) \quad (۸-۴)$$

ب- پرده آببند در وسط سد:

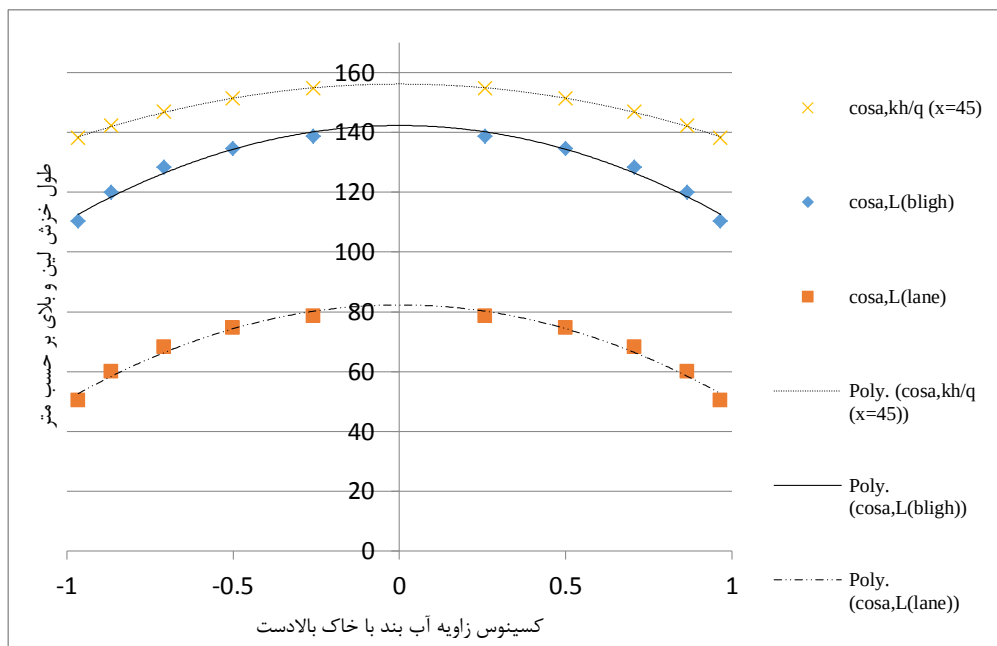
$$\frac{kh}{q} = -18.949 \cos^2 \alpha - 0.0008 \cos \alpha + 156.16 \quad (R^2 = 0.9991) \quad (۹-۴)$$

ج- پرده آببند در انتهای سد:

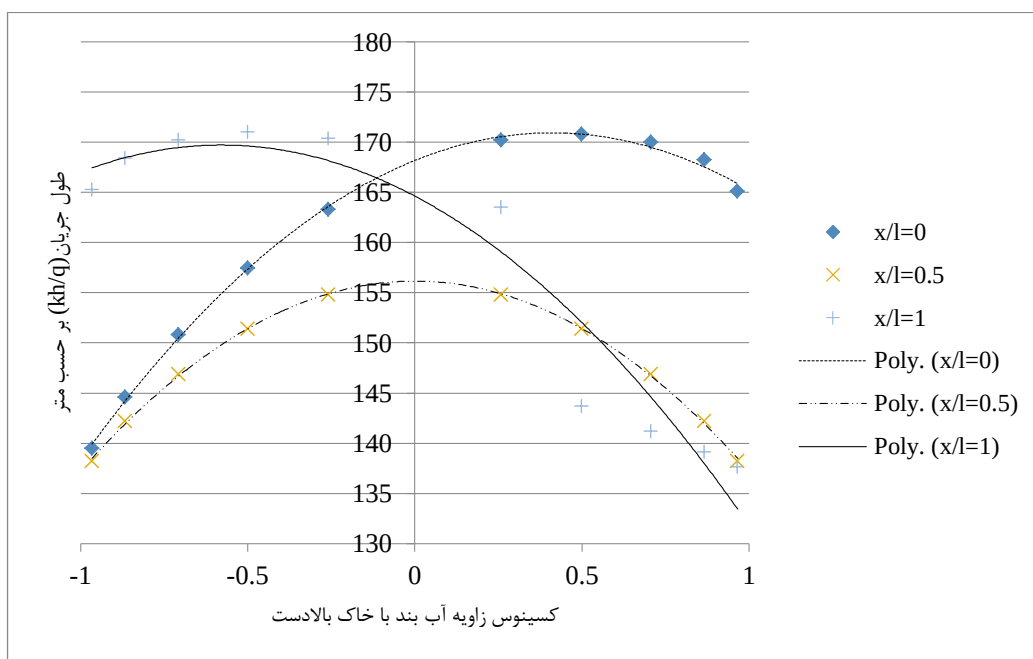
$$\frac{kh}{q} = -15.211 \cos^2 \alpha - 17.604 \cos \alpha + 164.62 \quad (R^2 = 0.9309) \quad (۱۰-۴)$$



شکل ۴-۱۶- نسبت تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل طول خزش لین و بالای با حضور یک پرده آببند زاویه دار

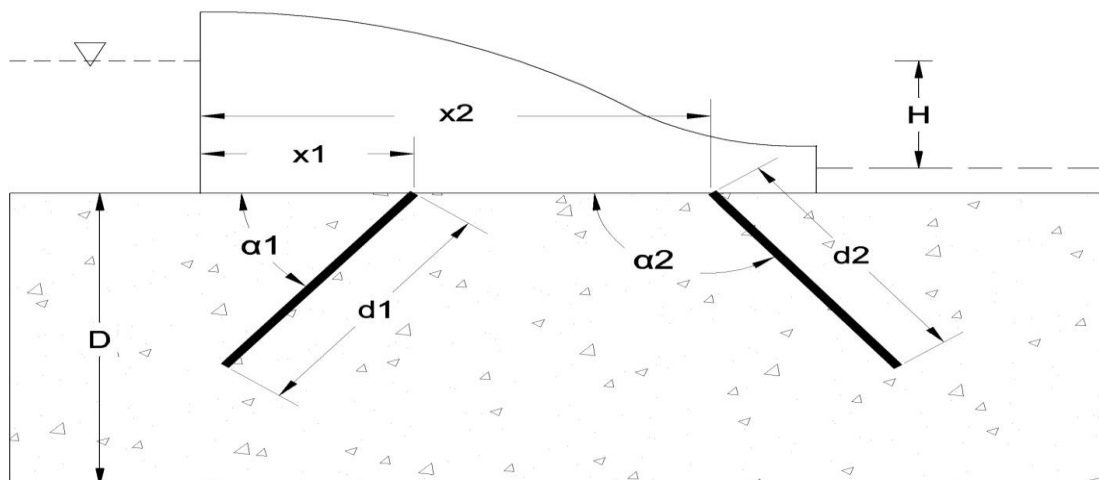


شکل ۴-۱۷- تغییرات مقادیر لین و بالای در مقابل تغییر زاویه کات آف



شکل ۴-۱۸- تغییرات $\frac{kh}{q}$ نسبت به کسینوس زاویه پرده آب بند

۴-۵- نتایج حل عددی با حضور دو پرده آببند زاویه دار



شکل ۴-۱۹- پارامترهای مورد استفاده جهت دو پرده آببند زاویه دار

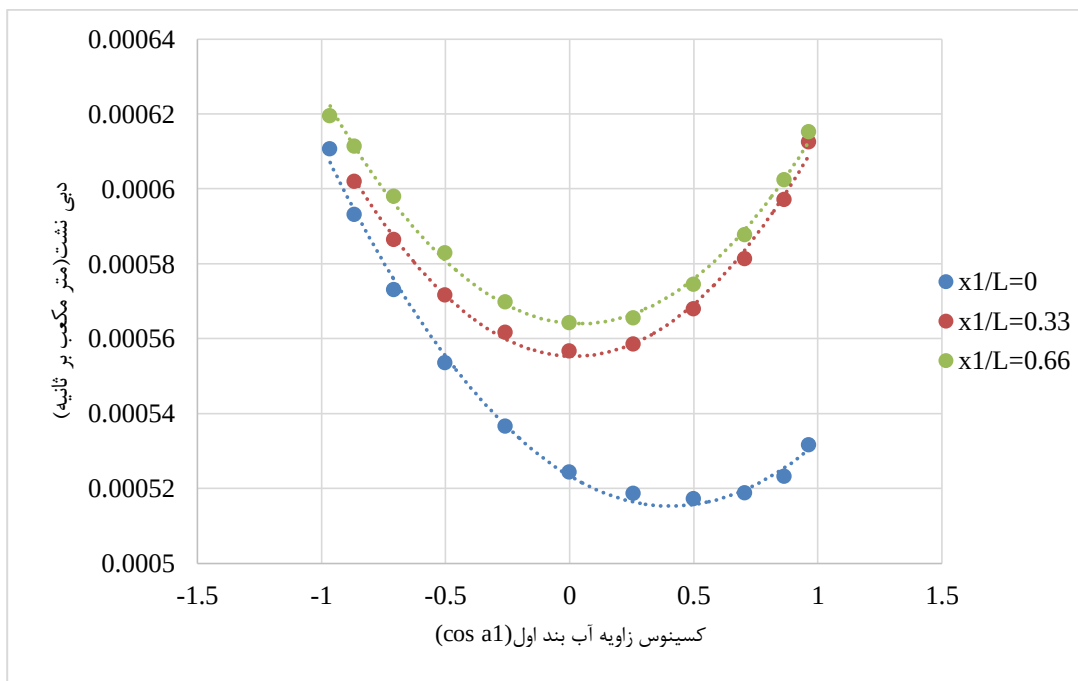
پارامترهای مورد استفاده:

- H: اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست
- D: عمق پی بر حسب متر
- d_۱: عمق پرده آببند اول بر حسب متر
- d_۲: عمق آببند دوم بر حسب متر
- X_۱: فاصله آببند اول از ابتدای سد بر حسب متر
- X_۲: فاصله آببند دوم از ابتدای سد بر حسب متر
- K: ضریب نفوذپذیری خاک بر حسب متر بر ثانیه
- X_۱/L: فاکتور بدون بعد نسبت فاصله آببند اول از ابتدای سد به طول سد
- X_۲/L: فاکتور بدون بعد نسبت فاصله آببند دوم از ابتدای سد به طول سد
- d_۱/D: فاکتور بدون بعد عمق آببند اول به عمق پی
- d_۲/D: فاکتور بدون بعد عمق آببند دوم به عمق پی
- α_۱: زاویه پرده آببند اول با سطح خاک بالادست
- α_۲: زاویه پرده آببند دوم با سطح خاک بالادست

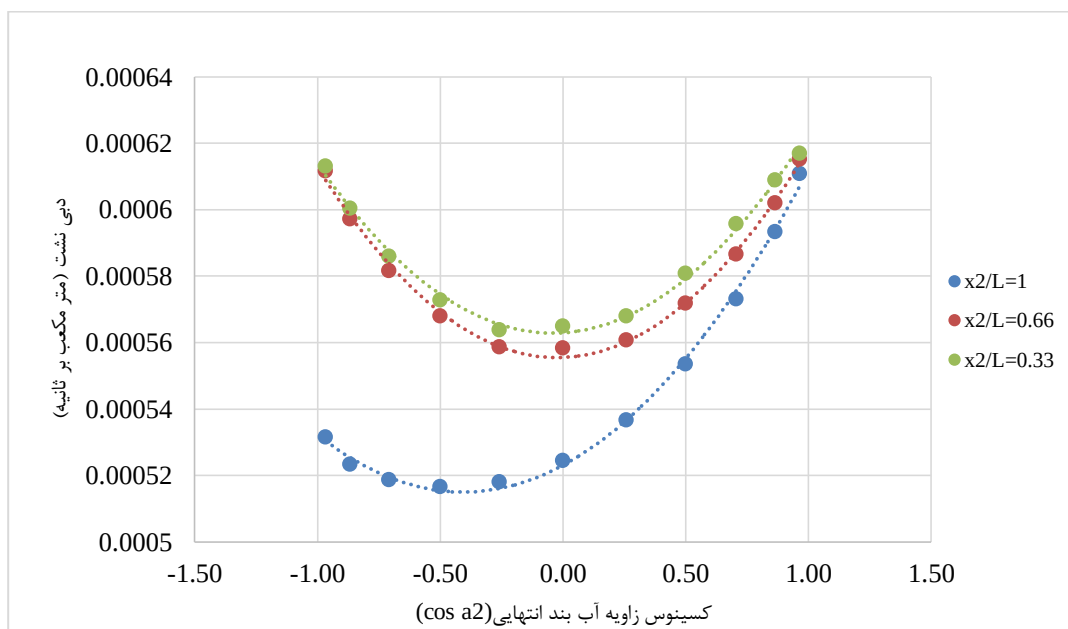
۴-۵-۱- تغییرات دبی نشت با حضور دو پرده آببند زاویه دار

جهت تعیین اثر زوایای دو پرده آببند بر روی دبی نشت نمودارهای ۴-۲۰ و ۴-۲۱ ارائه گردید که نتایج زیر حاصل می گردد :

تغییرات دبی نشت نسبت به تغییر زوایای آببندهای اول و دوم تغییر می یابد به نحوی که بیشترین کاهش دبی نشت زمانی بوقوع می پیوندد که آببند اول در ابتدای سد و کسینوس زاویه آن $0/5$ باشد یعنی با زاویه 30 درجه از حالت قائم به سمت بالادست باشد و همچنین آببند دوم در انتهای سد با کسینوس زاویه $0/5$ - یا 120 درجه یعنی با زاویه 30 درجه از حالت قائم به سمت پایین دست قرار گیرد. هر چه آببند ابتدایی به سمت پایین دست حرکت کند تاثیر زاویه آن نیز بر دبی نشت تغییر می یابد به نحوی که زاویه قائم برای پرده های آببند در موقعیت وسط سد بیشترین کاهش دبی نشت را در پی دارد. هرچه آببند دوم از پایین دست به سمت بالادست حرکت کند مانند آببند اول زاویه قائم بیشترین تاثیر را روی کاهش دبی نشت دارد .



شکل ۴-۲۰- تغییرات دبی بر اساس تغییرات کسینوس زاویه در مکان های مختلف کات آف ابتدایی ($\cos(a_1)$)



شکل ۴-۲۱- تغییرات دبی بر اساس تغییرات کسینوس زاویه در مکان های مختلف کات آف انتهایی ($\cos(a_2)$)

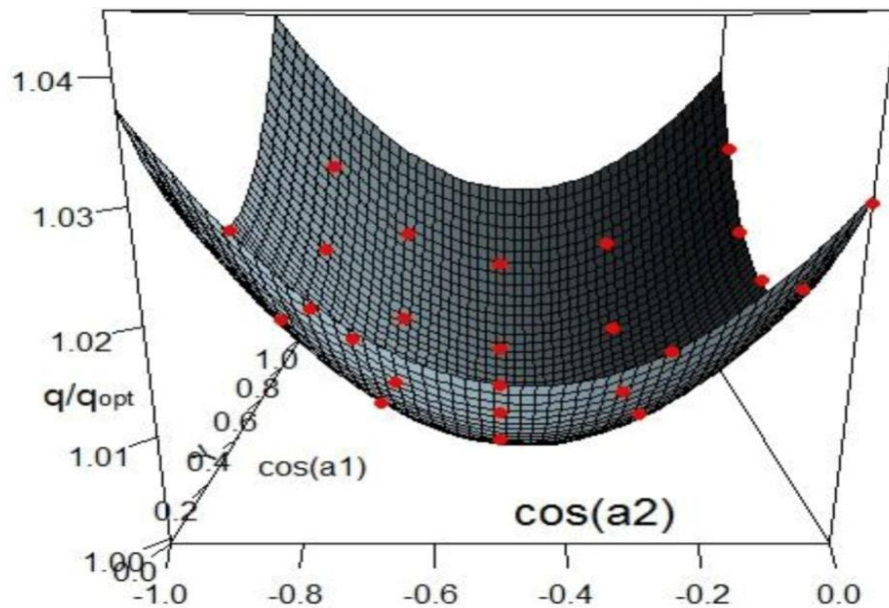
جهت برازش تاثیر زاویه پرده آببند بر روی دبی نشت رابطه زیر ارائه گردید :

$$\frac{q}{q_{opt}} = 0.078 \cos^2 a_1 + 0.074 \cos^2 a_2 - 0.00045 \cos a_1 \cdot \cos a_2 + 0.071 \cos a_1 - 0.067 \cos a_2 + 1.031 \quad (4-11)$$

در این رابطه $\frac{q}{q_{opt}}$ برابر نسبت دبی با هر هد آبی و عمق آببند به دبی با همان عمق آببند و بار

آبی و زوایای بهینه کات آف یعنی ۶۰ و ۱۲۰ نسبت به سطح بالادست، a_1 زاویه آببند بالادست و a_2 زاویه آببند پایین دست می باشد. این رابطه با $R^2=0.999$ دقت بالایی در تعیین میزان تاثیر زاویه پرده‌های آببند ابتدایی و انتهایی دارد.

با استفاده از نرم افزار R می توان تغییرات کسینوس زوایای آببند ابتدایی و انتهایی بر روی دبی نشت را بصورت شکل ۴-۲۲ ارائه نمود در این شکل مشاهده می شود که کمترین مقدار دبی نشت در زوایای مذکور اتفاق می افتد.

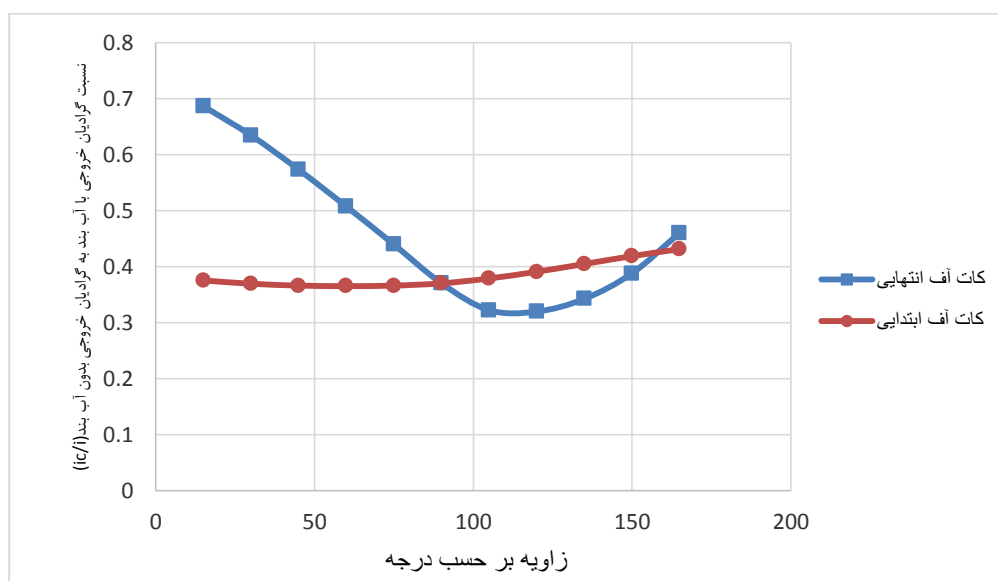


شکل ۴-۲۲- تاثیر سه بعدی زوایای دو پرده آببند بر روی دبی نشت

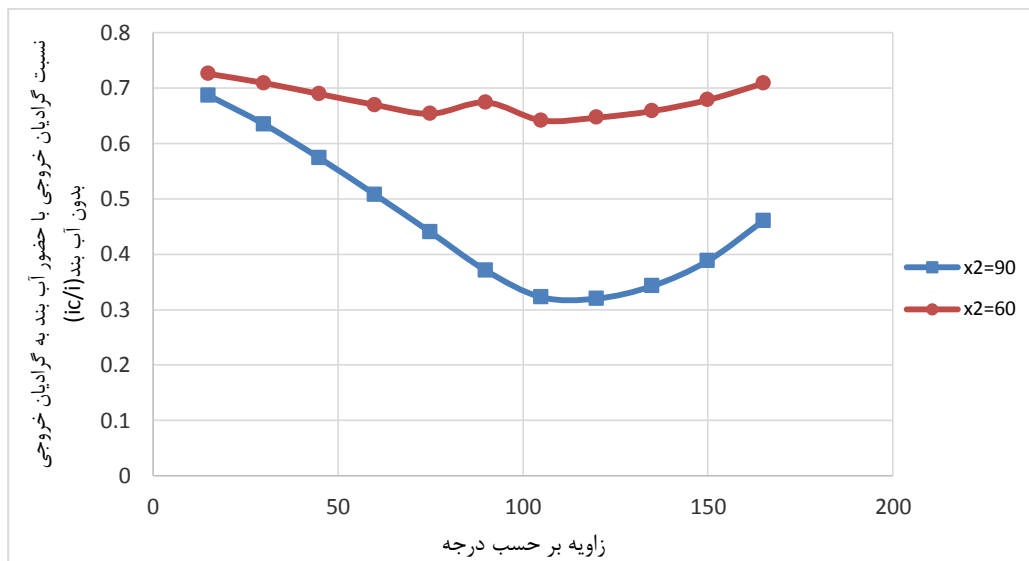
۴-۵-۲- تغییرات گرادیان خروجی نسبت به زوایای آببندهای ابتدایی و انتهایی

جهت تعیین اثر زوایای دو آببند بر روی گرادیان خروجی نمودارهای ۴-۳۰ و ۴-۳۱ ارائه گردید که نتایج زیر حاصل می گردد :

در این نمودارها i/i_c نسبت گرادیان خروجی با حضور دو آببند به گرادیان خروجی در حالت بحرانی بدون آببند می باشد. همان طور که مشاهده می شود زاویه آببند ابتدایی هیچ تاثیری بر روی گرادیان خروجی ندارد اما در آببند انتهایی تغییرات زاویه باعث تغییر در گرادیان خروجی می گردد به نحوی که زاویه ۱۲۰ درجه یا همان زاویه ۳۰ درجه نسبت به قائم بطرف پایین دست بیشترین تاثیر را روی کاهش گرادیان خروجی دارد. هر چه پرده آببند انتهایی به سمت بالادست یا وسط سد حرکت کند تاثیر زاویه آن روی گرادیان خروجی از بین می رود یعنی می توان گفت فقط در موقعیت پرده آببند پاشنه سد تغییر زاویه بر گرادیان خروجی موثر است.



شکل ۴-۲۳- تاثیر زوایای پرده آببند بر گرادیان خروجی

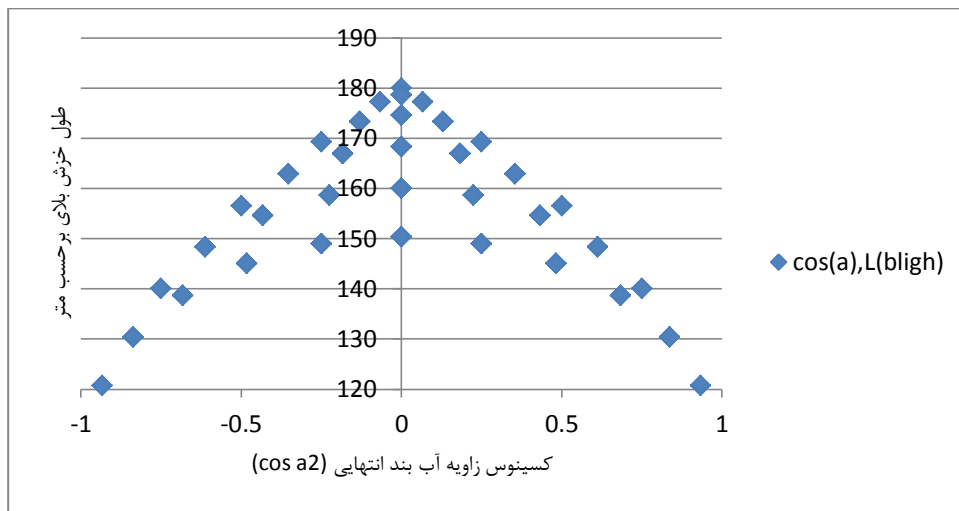


شکل ۴-۲۴- تاثیر موقعیت مکانی و زاویه آب بند انتهایی بر گرادیان

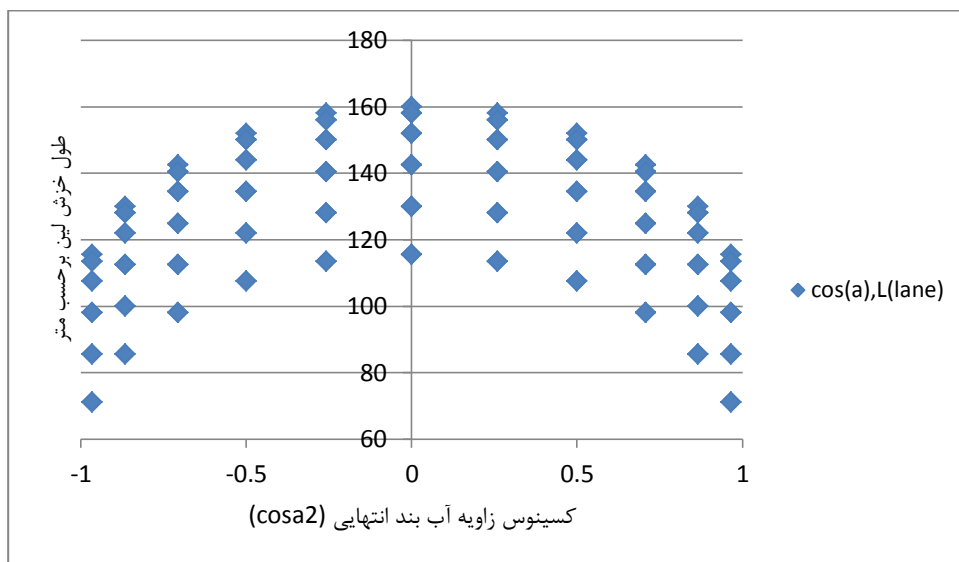
۴-۵-۳- طول معادل خزش در پی هایی با دو پرده آب بند زاویه دار

در شکل‌های ۴-۲۷ و ۴-۲۸ مشاهده می شود مقادیر $\frac{kh}{q}$ با تغییر زاویه پرده‌های آب بند تغییر می‌یابد، در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده اگر زاویه آب بند انتهایی قائم باشد با تغییر زاویه آب بند ابتدایی مقدار $\frac{kh}{q}$ تغییر می‌یابد. در پرده‌های آب بند وسطی غیر از آب بندهای ابتدایی و انتهایی زاویه قائم آب بند بیشترین تاثیر را در افزایش طول خزش و در نتیجه کاهش دبی دارد ولی در آب بند ابتدایی زاویه ۶۰ درجه از سطح خاک بالادست بیشترین تاثیر را در افزایش طول خزش ایفا می کنند. در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده اگر زاویه آب بند ابتدایی قائم باشد با تغییر زاویه آب بند انتهایی مقدار $\frac{kh}{q}$ تغییر می‌یابد و آب بند انتهایی با زاویه ۱۲۰ درجه از سطح خاک بالادست بیشترین تاثیر را در افزایش طول خزش ایفا می کنند. در شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۶ مقادیر طول بلای و لین با قائم بودن آب بند دوم (پایین دست) و تغییرات

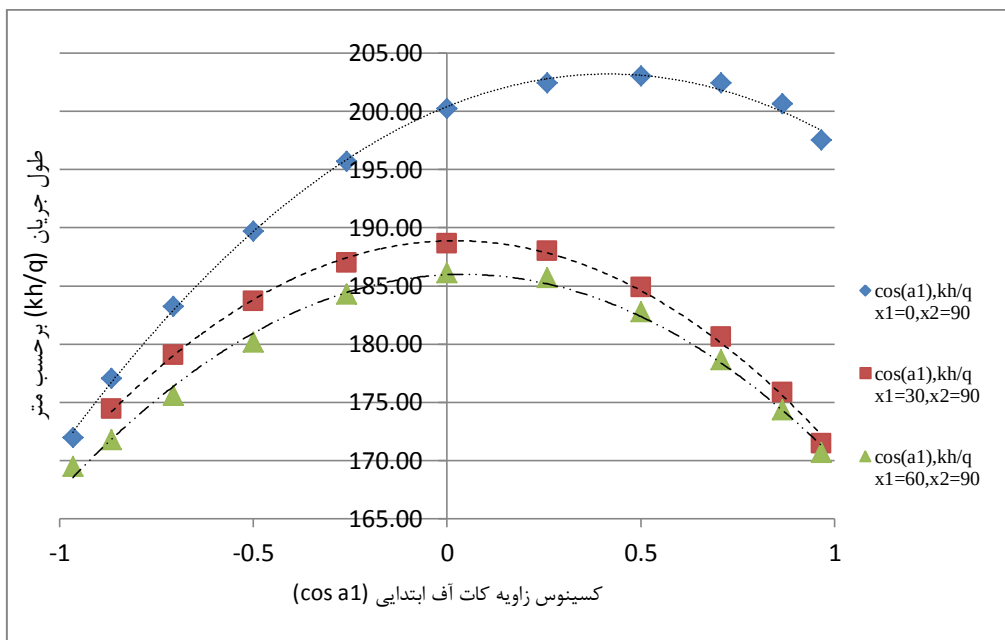
زاویه آب‌بند اول ترسیم شده است. طبق این تئوری زاویه قائم با $\cos(a)=0$ بالاترین طول خزش را دارند درحالی‌که در روش اجزای محدود زاویه ۶۰ درجه نسبت به خاک بالادست حداکثر طول خزش را دارد.



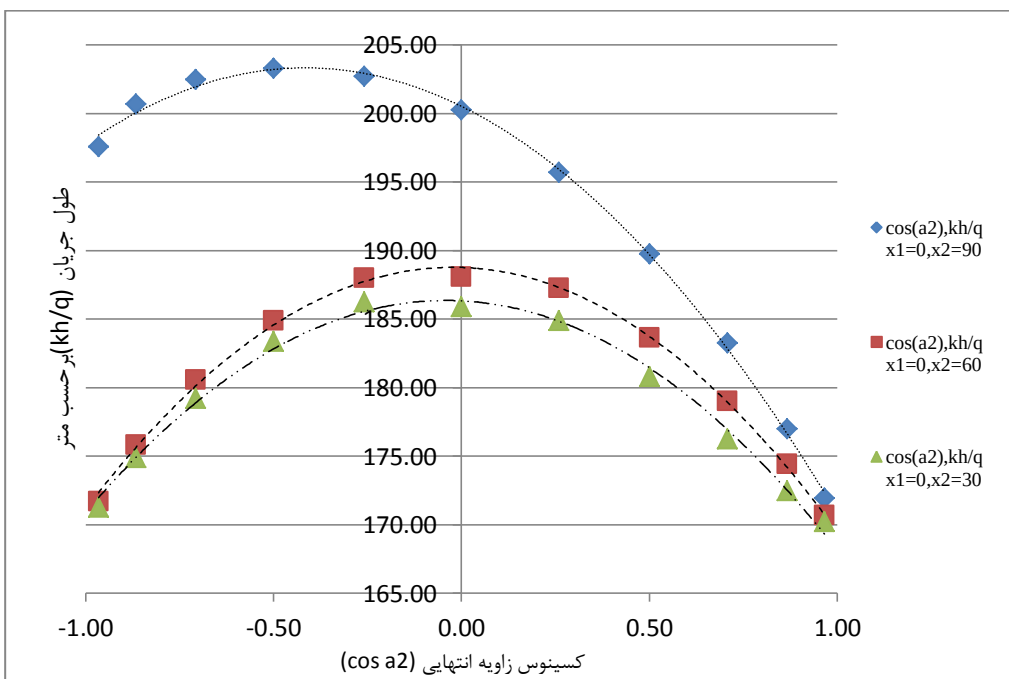
شکل ۴-۲۵- تغییرات طول خزش بلای با تغییر زاویه آب‌بند بالادست و قائم بودن آب‌بند پایین دست



شکل ۴-۲۶- تغییرات طول خزش لین با تغییر زاویه آب‌بند پایین دست و قائم بودن آب‌بند بالادست

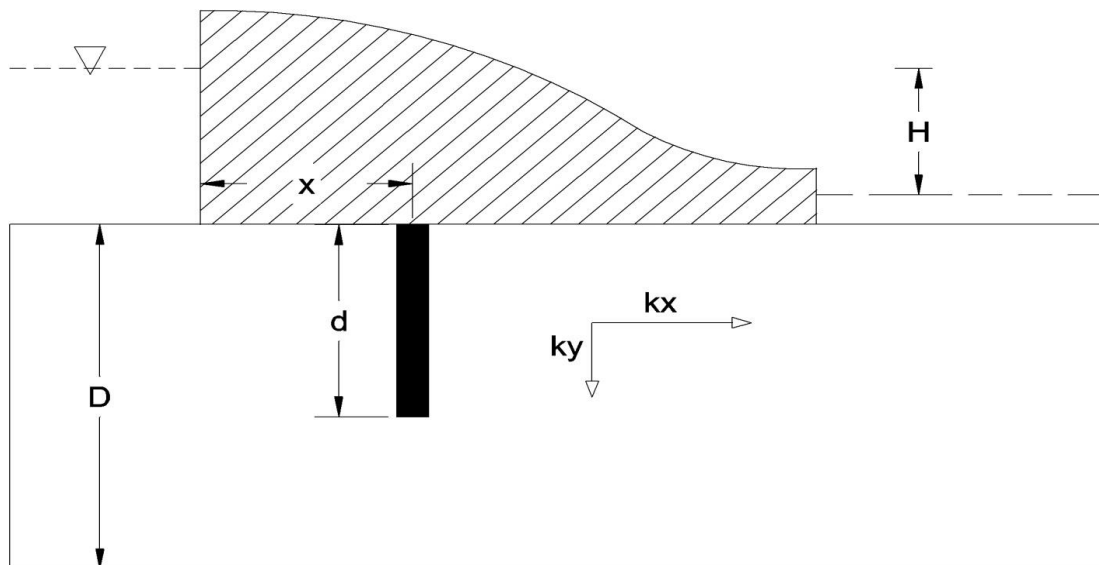


شکل ۴-۲۷- تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل $\cos(a_1)$



شکل ۴-۲۸- تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل $\cos(a_2)$

۴-۶- نتایج حل عددی با حضور یک پرده آب‌بند در پی ناهمسان $k_x \neq k_y$



شکل ۴-۲۹- پارامترهای مورد استفاده جهت یک پرده آب‌بند در پی غیر ایزوتروپ

پارامترهای مورد استفاده:

H : اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست

L : طول سد بر حسب متر

D : عمق پی بر حسب متر

d : عمق پرده آب‌بند بر حسب متر

X : فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد بر حسب متر

K_x : ضریب نفوذپذیری افقی خاک بر حسب متر بر ثانیه

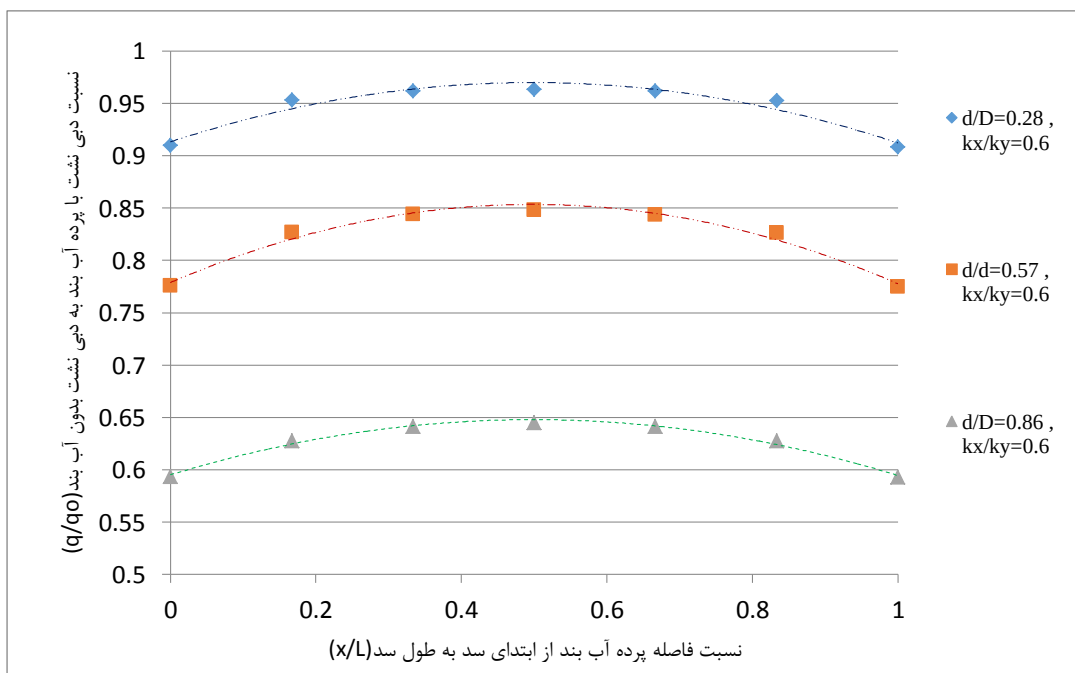
K_y : ضریب نفوذپذیری قائم خاک بر حسب متر بر ثانیه

x/L : فاکتور بدون بعد نسبت فاصله پرده آب‌بند از ابتدای سد به طول سد

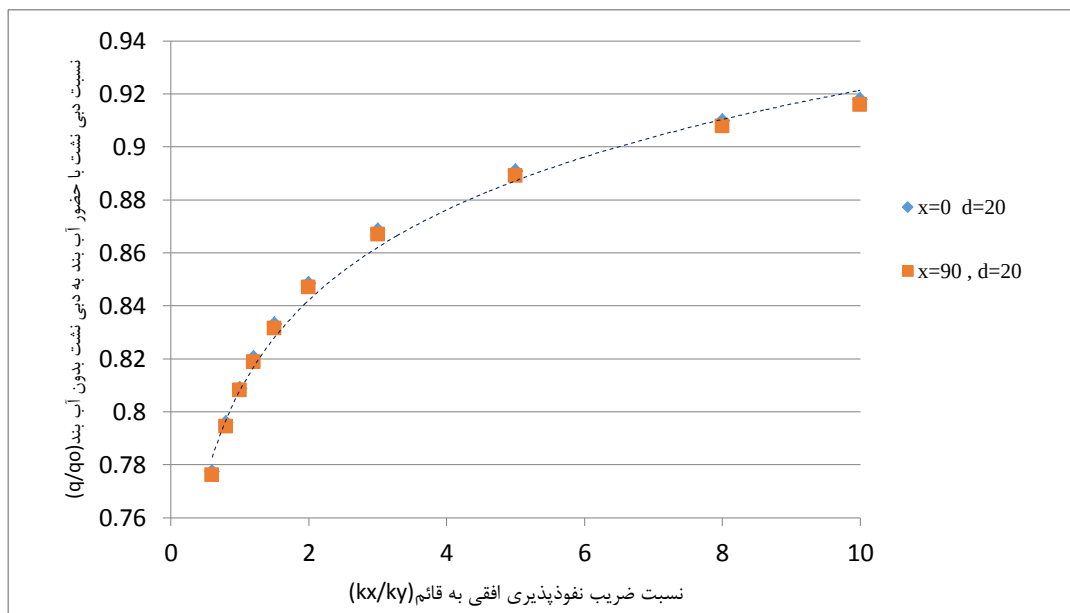
d/D : فاکتور بدون بعد عمق پرده آب‌بند به عمق پی

۴-۶-۱- تعیین موقعیت بهینه مکانی پرده آب‌بند

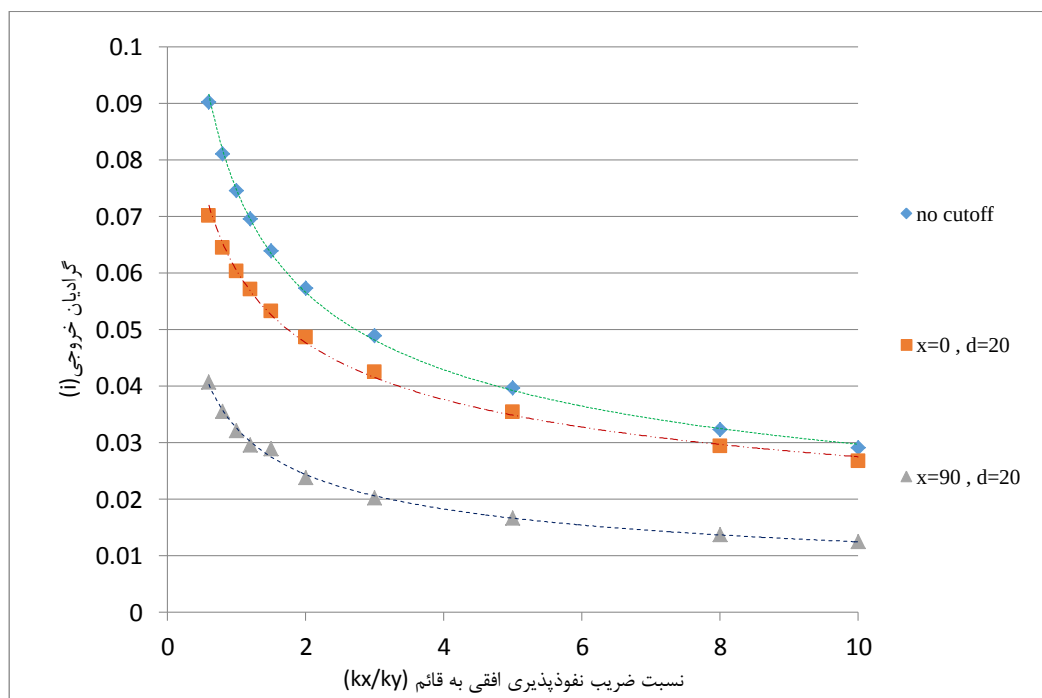
در نمودار شماره ۴-۳۰ تغییرات دبی نشت با یک پرده آب‌بند با یک عمق در طول مسیر پی مشخص شده است. حضور پرده آب‌بند در ابتدا و انتهای سازه آبی بیشترین تاثیر را روی کاهش دبی نشت ایفا می‌کند. در شکل شماره ۴-۳۱ تغییرات دبی (q/q_0) با پرده آب‌بند در ابتدا و انتهای سازه در مقابل k_x/k_y نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود حضور پرده آب‌بند در این دو نقطه تقریباً بطور یکسان دبی نشت را با مقادیر متفاوت نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به قائم کاهش می‌دهد. در شکل شماره ۴-۳۲ تغییرات گرادیان خروجی در ابتدا و انتهای سد با حضور پرده آب‌بند نسبت به مقادیر متفاوت k_x/k_y نشان داده شده است همان‌طور که ملاحظه می‌شود بهترین موقعیت برای کاهش گرادیان خروجی انتهای پایین دست سد می‌باشد.



شکل ۴-۳۰- تغییرات q/q_0 در طول زیر سد با حضور پرده آب‌بند در k_x/k_y مشخص



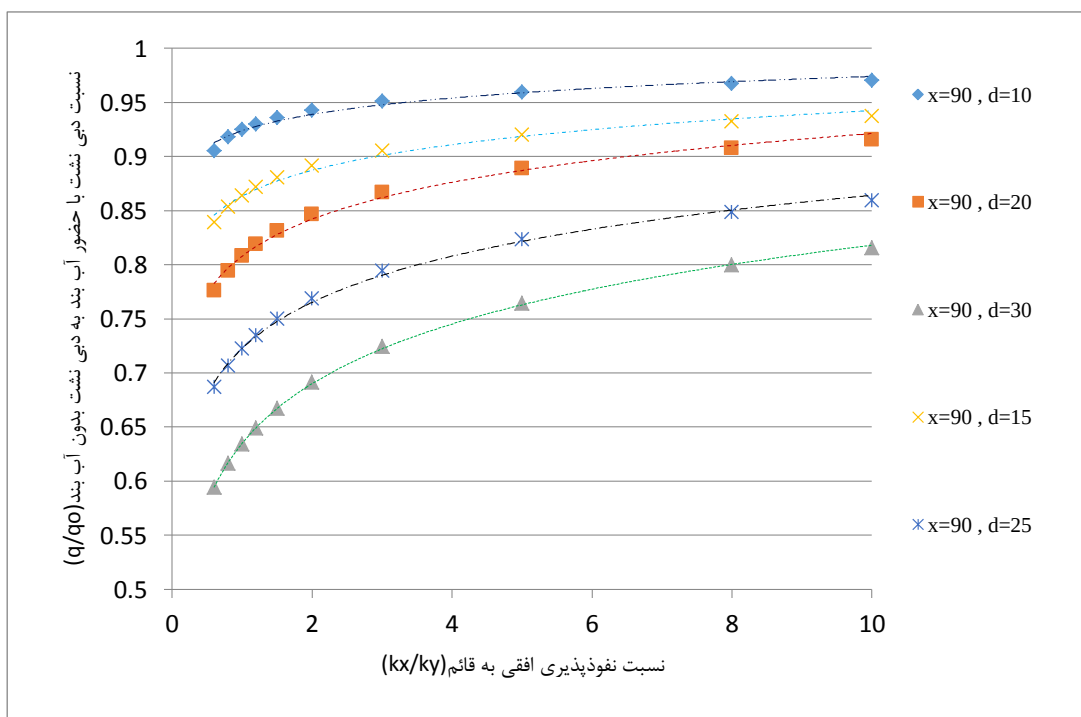
شکل ۳۱-۴- تغییرات q/q_0 در طول زیر سد با حضور پرده آب‌بند در خاک ناهمسان



شکل ۳۲-۴- تغییرات گرادینان هیدرولیکی در پنجه و پاشنه سد با حضور پرده آب‌بند

۴-۶-۲- تعیین اثر نسبت ضریب نفوذ پذیری افقی به قائم (k_x/k_y) بر دبی نشت

در نمودار شکل ۴-۳۳ نسبت تغییرات دبی نشت با حضور پرده آب‌بند نسبت به عدم وجود آن (q/q_0) در مقابل k_x/k_y ترسیم شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است عمق پرده‌های آب‌بند تاثیر محسوسی در کاهش دبی نشت ایفا می‌کند همچنین هر چه میزان نسبت نفوذپذیری افقی k_x به قائم k_y افزایش یابد مقدار دبی نشت بیشتر می‌شود، بالاترین کاهش دبی نشت برای موقعیت مکانی پرده‌های آب‌بند زمانی اتفاق می‌افتد که پرده آب‌بند در ابتدای بالادست یا انتهای پایین دست سد قرار گیرد.



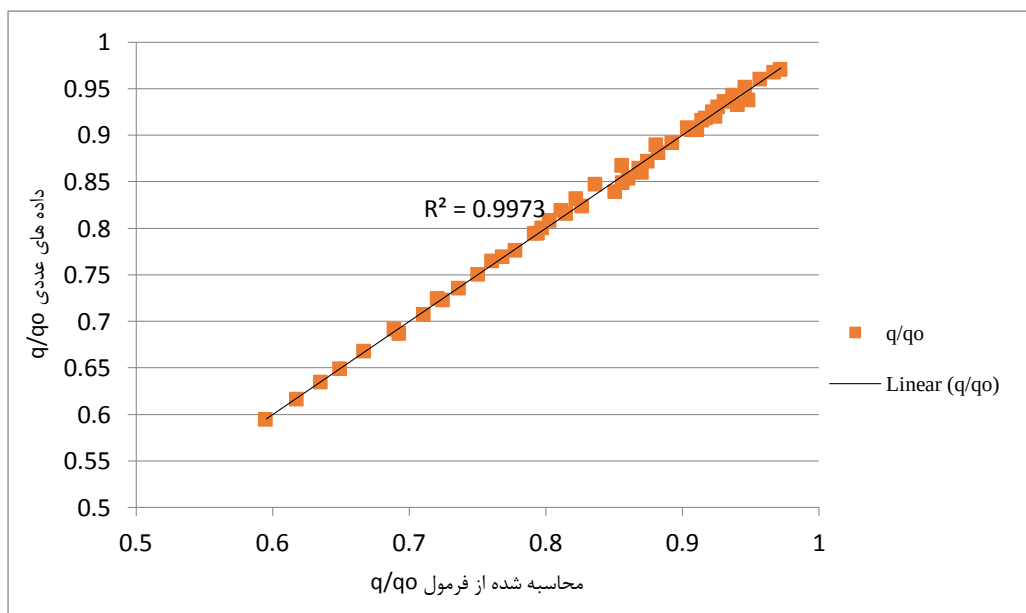
شکل ۴-۳۳- تغییرات q/q_0 نسبت به k_x/k_y با عمق مختلف پرده آب‌بند در پاشنه سد

جهت تعیین مقدار q/q_0 در حالت پی ناهمسان ($k_x \neq k_y$) با حضور پرده آب‌بند در پاشنه سد می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\frac{q}{q_0} = 0.0935 \left(\frac{d}{D}\right)^{1.168} \ln\left(\frac{k_x}{k_y}\right) - 0.294 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0.1663 \left(\frac{d}{D}\right) + 0.9938 \quad (12-4)$$

$$(R^2 = 0.9973)$$

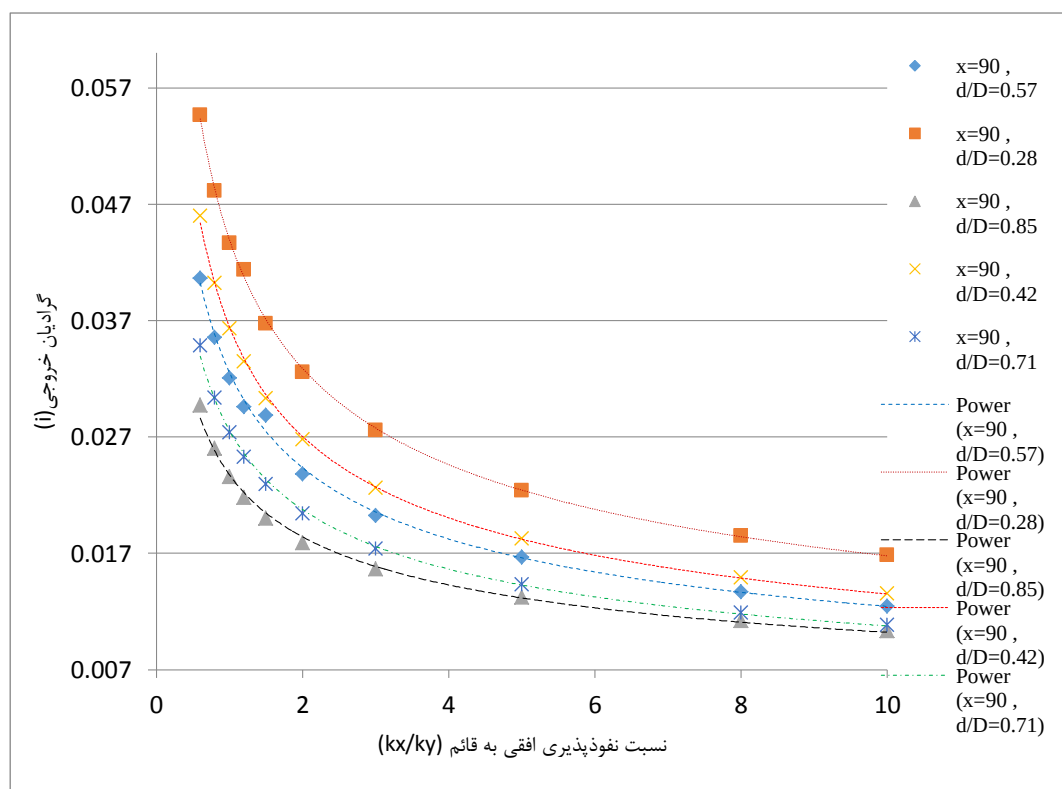
در این معادله $\frac{q}{q_0}$ نسبت دبی با حضور دیوار سپری به عدم حضور آن، $\frac{d}{D}$ نسبت عمق پرده آب‌بند به عمق پی و $\frac{k_x}{k_y}$ نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به قائم است.



شکل ۴-۳۴- صحت سنجی مقادیر q/q_0 بدست آمده از فرمول در مقابل محاسبات عددی

۴-۶-۳- تعیین اثر نسبت ضریب نفوذ پذیری افقی به قائم (k_x/k_y) بر گرادیان هیدرولیکی

در نمودار شماره ۴-۴۲ تغییرات گرادیان خروجی نسبت به k_x/k_y با حضور یک پرده آببند با عمق متفاوت در انتهای سد ترسیم شده است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار ضریب نفوذپذیری افقی نسبت به قائم میزان گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد همچنین عمق پرده آببند نیز تاثیر زیادی روی کاهش گرادیان خروجی دارد. در مقادیر $k_x/k_y < 1$ به علت جریانهای عمودی در انتهای مسیر مقدار گرادیان خروجی زیاد و خطر پدیده آبشستگی بیشتر می‌باشد. ولی در مقادیر $k_x \gg k_y$ گرادیان خروجی به علت افزایش ضریب نفوذپذیری افقی و ایجاد جریانهای افقی کاهش یافته و تاثیر عمق پرده آببند روی آن کمتر می‌شود.



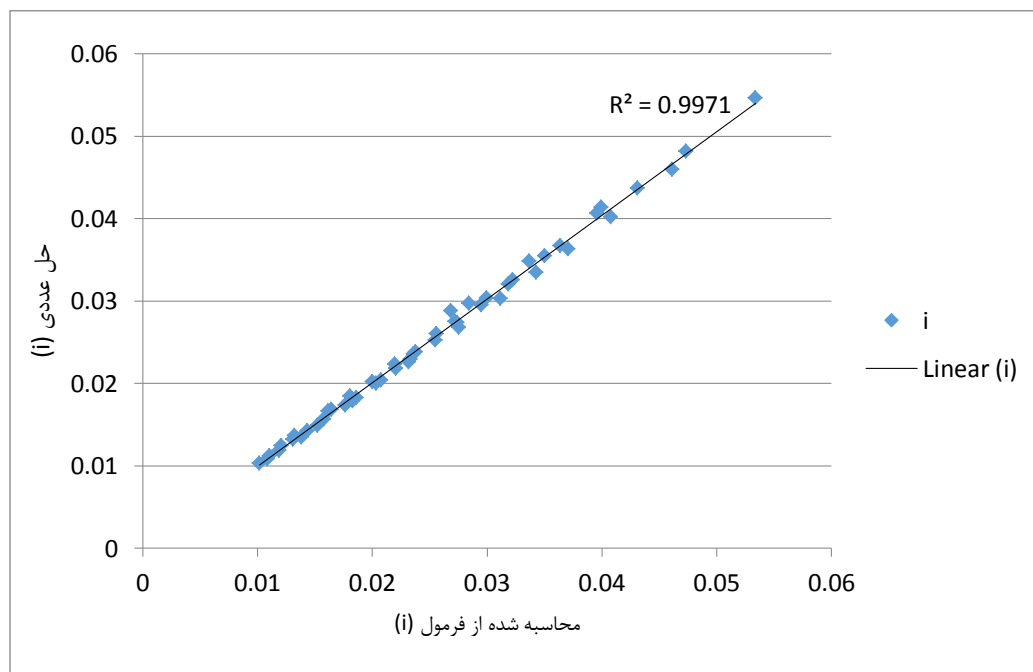
شکل ۴-۳۵- تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به تغییرات k_x/k_y با پرده آببند در انتهای سد

جهت تعیین مقدار گرادیان خروجی در حالت پی ناهمسان ($k_x \neq k_y$) با حضور پرده آببند در پاشنه سد می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$i = 0.0583 e^{-1.057\left(\frac{d}{D}\right)} \cdot \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{0.3735\left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0.3331\left(\frac{d}{D}\right) - 0.3544} \quad (13-4)$$

$$(R^2 = 0.9971)$$

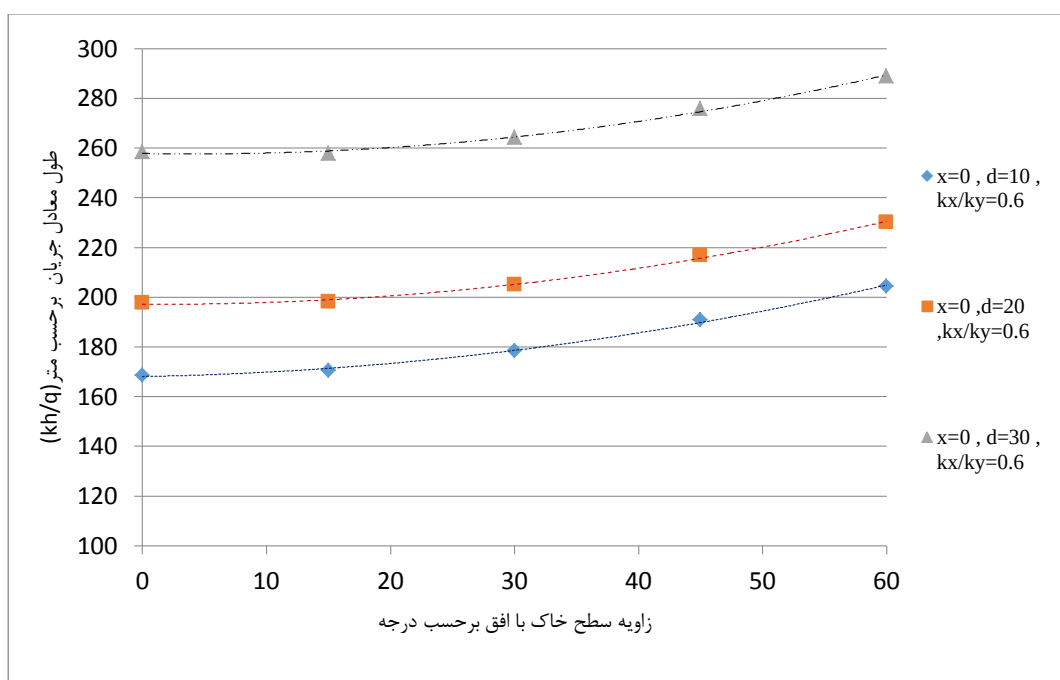
در این معادله i گرادیان هیدرولیکی خروجی، $\frac{d}{D}$ نسبت عمق آببند به عمق پی و $\frac{k_x}{k_y}$ نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به قائم است.



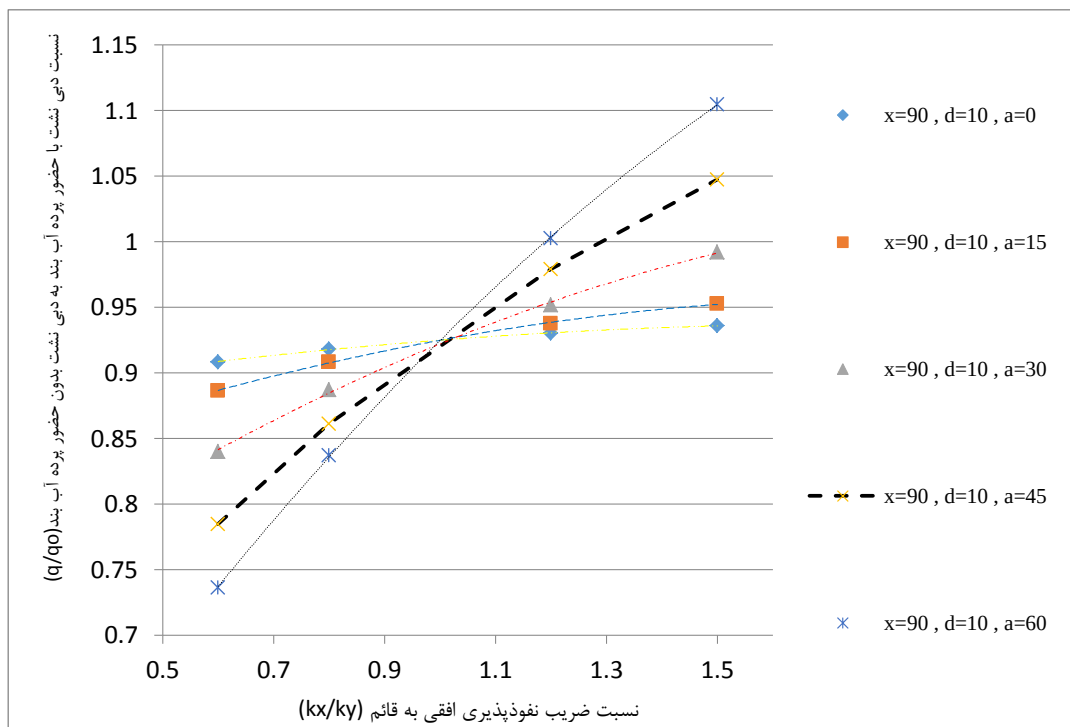
شکل ۴-۳۶- صحت سنجی مقادیر i بدست آمده از فرمول در مقابل محاسبات عددی

۴-۶-۴- تغییرات دبی نشت با زاویه دار شدن خاک ناهمسان

در شکل ۴-۳۷ تغییرات دبی نشت نسبت به افزایش زاویه پی نسبت به افق ترسیم شده است هرچه زاویه خاک بیشتر شود دبی نشت کمتر می شود. در شکل ۴-۳۸ تغییرات دبی نشت در مقابل k_x/k_y برای زمانی که لایه خاک پی زاویه دار باشد نشان داده شده است. در این گراف زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود در نقطه $k_y=k_x$ تمام خطوط از یک نقطه عبور می کنند که نشان می دهد در این نقطه زاویه دار بودن خاک نسبت به افق تاثیری بر میزان دبی نشت ندارد ولی در مقادیر $k_x < k_y$ که جریان بصورت قائم به سمت پایین می باشد هرچه زاویه خاک نسبت به افق بیشتر شود دبی نشت کاهش می یابد و بالعکس در مقادیر $k_x > k_y$ که جریان بصورت افقی است هرچه زاویه خاک با افق بیشتر شود دبی نشت افزایش می یابد.



شکل ۴-۳۷- تغییرات دبی نشت در مقابل افزایش زاویه خاک پی نسبت به افق



شکل ۴-۳ تغییرات q/q_0 نسبت به k_x/k_y با عمق ثابت آب‌بند در پاشنه سد با زاویه پی نسبت به افق

جهت تصحیح معادله (۴-۱۲) در صورتیکه خاک با افق زاویه α بسازد از معادله زیر استفاده می شود:

$$\frac{q}{q_{0\alpha}} = a \cdot \frac{q}{q_{0(1)}} + b \quad (۴-۱۴)$$

$$a = -30.174 \cos^2(\alpha) + 11.231 \cos(\alpha) + 20.484$$

$$b = 27.881 \cos^2(\alpha) - 10.459 \cos(\alpha) - 17.919$$

در این معادله $\frac{q}{qo_{\alpha}}$ نسبت دبی به دبی نشت با حضور پرده آب‌بند به عمق‌های مختلف در پاشنه سد با زاویه (α) پی نسبت به افق و نسبت k_x/k_y مختلف، a و b ضرایب تصحیح و $\frac{q}{qo_{(1)}}$ مقدار بدست آمده از فرمول (۴-۱۲) می باشد. این رابطه با $R^2=0.9845$ دقت قابل قبولی در تعیین میزان دبی نشت در خاک‌های زاویه دار دارد.

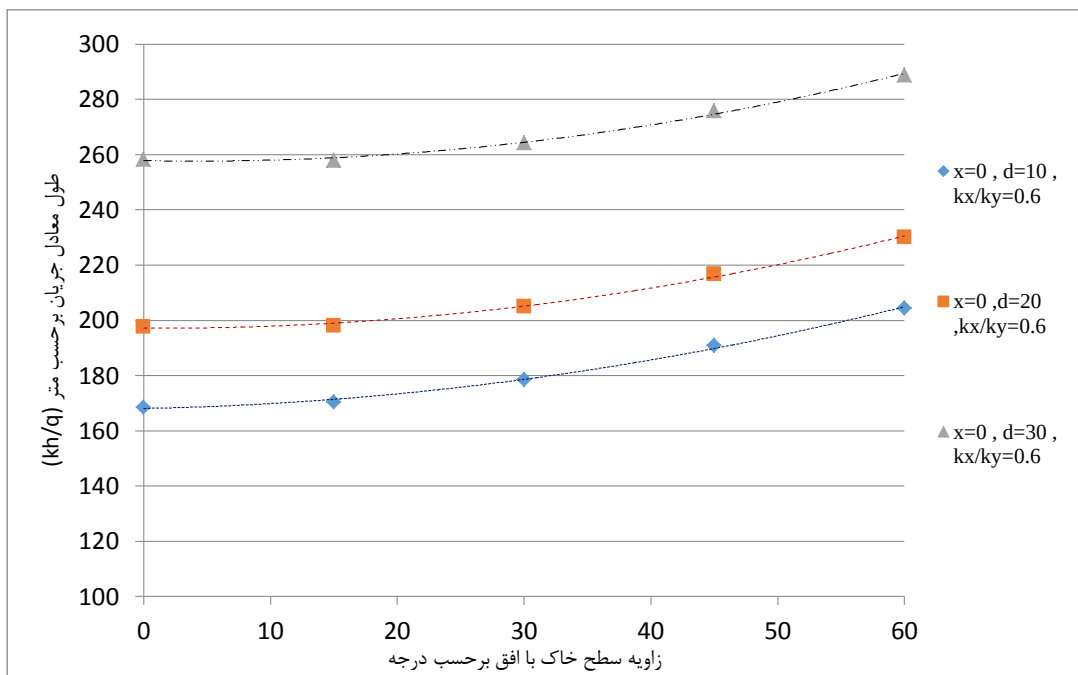
۴-۵- تغییرات kh/q (طول معادل مسیر جریان) با زاویه دار شدن خاک غیر همگن

در شکل ۴-۳۹ تغییرات طول معادل مسیر جریان نسبت به افزایش زاویه خاک پی در یک نقطه مشخص زیر سازه آبی و با نسبت k افقی به قائم ثابت ترسیم شده است. هرچه زاویه خاک بیشتر شود طول مسیر جریان بیشتر و بالطبع دبی نشت کاهش می‌یابد. در شکل ۴-۴۰ تغییرات kh/q نسبت به k_x/k_y در زوایای مختلف خاک پی نسبت به سطح افق نشان داده شده است. مشاهد می‌شود در نقطه $k_x/k_y=1$ یعنی زمانی که ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی با هم برابرند تغییرات زاویه خاک پی با سطح افق بر روی طول معادل مسیر جریان بی تاثیر است ولی برای مقادیر $k_x < k_y$ داریم:

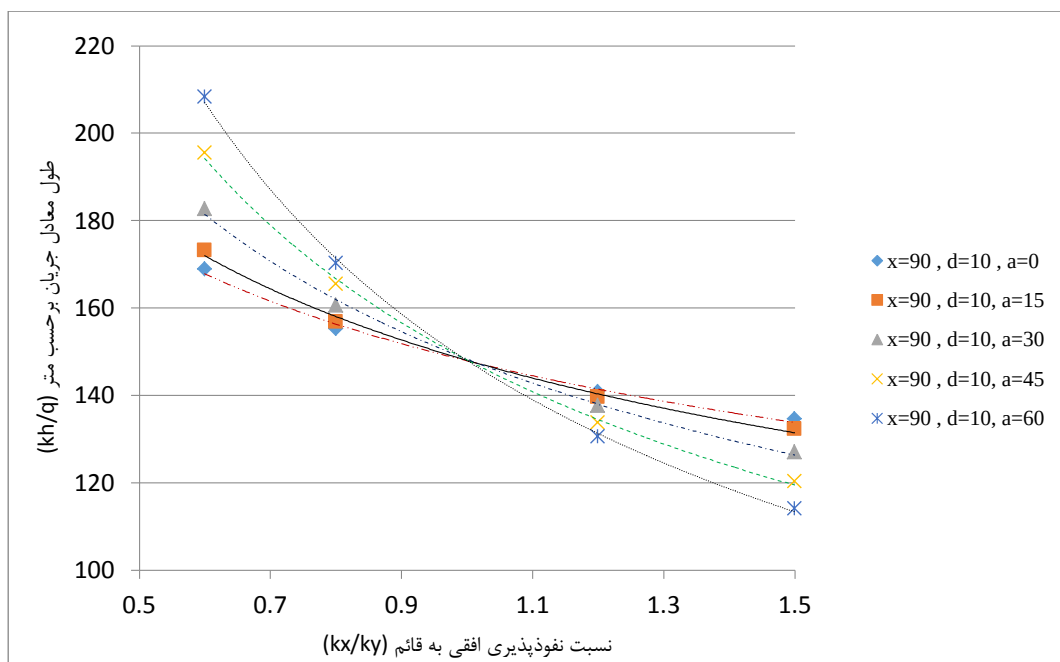
$$\frac{kh}{q}_{a=60} > \frac{kh}{q}_{a=45} > \frac{kh}{q}_{a=30} > \frac{kh}{q}_{a=15} > \frac{kh}{q}_{a=0}$$

و برای مقادیر $k_x > k_y$ داریم:

$$\frac{kh}{q}_{a=60} < \frac{kh}{q}_{a=45} < \frac{kh}{q}_{a=30} < \frac{kh}{q}_{a=15} < \frac{kh}{q}_{a=0}$$



شکل ۴-۳۹- تغییرات $\frac{kh}{q}$ در مقابل افزایش زاویه خاک پی نسبت به افق



شکل ۴-۴۰- تغییرات $\frac{kh}{q}$ نسبت به k_x/k_y با عمق ثابت پرده آب‌بند در پاشنه سد با زاویه پی نسبت به افق

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتایج

در این پایان نامه به بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آببند بر روی دبی نشت، گرادیان خروجی و طول خزش در زیر سدهای خاکی پرداخته شده است. ابتدا مقادیر ۶۲ داده آزمایشگاهی در مدل نشت و نفوذ جهت صحت سنجی مدل عددی بدست آمد و پس از تایید مقادیر عددی تعداد ۴۰۰۰ داده از اجرای نرم افزار عددی بدست آمد که پس از تحلیل این داده ها نتایج به شرح زیر می باشد:

۱- در صورت وجود یک پرده آببند با تغییر مکان افقی آن در زیر سد از ابتدای بالادست به سمت وسط دبی نشت افزایش می یابد بطوریکه حداکثر دبی نشت در حضور پرده در وسط سد می باشد سپس با حرکت پرده به سمت پایین دست مجدداً دبی نشت کاهش می یابد بطوریکه حضور پرده آببند در انتهای پایین دست باعث حداکثر کاهش دبی نشت می گردد.

۲- تاثیر پرده آببند واحد بر گرادیان خروجی فقط در $\frac{1}{3}$ پایین دست سد قابل مشاهده است و حضور پرده در نیمه بالایی سد تاثیری بر کاهش گرادیان خروجی ندارد در نتیجه بیشترین کاهش دبی نشت در صورت حضور پرده در انتهای پایین دست سد می باشد.

۳- حضور پرده آببند در نیمه بالایی سد باعث کاهش مقدار زیر فشار و در نیمه پایین سد باعث افزایش نیروی زیر فشار می شود به طوری که حداقل و حداکثر مقدار نیروی زیر فشار به ترتیب در حال قرارگیری پرده آببند در ابتدای بالادست و انتهای پایین دست سد می باشد.

۴- افزایش عمق پرده آببند باعث کاهش دبی نشت در تمامی نقاط زیر سد می شود ولی افزایش عمق آن در انتهای پایین دست سد بیشترین تاثیر را روی کاهش دبی نشت و گرادیان خروجی دارد.

۵- معادلات لین و بلای موقعیت مکانی، عمق پی و طول خاک بالادست و پایین دست را در نظر نمی‌گیرد لذا مقادیر آن از مقادیر محاسبات عددی کمتر است لیکن مقادیر بلای به محاسبات عددی نزدیکتر می‌باشد. جهت تصحیح مقادیر لین و بلای می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{kh}{q} = 1.5445L_{lane} + 45.439 \quad (۱-۵)$$

$$\frac{kh}{q} = 1.5445L_{bligh} - 47.234 \quad (۲-۵)$$

۶- حضور دو پرده آب‌بند می‌تواند دبی نشت را نسبت به حضور یک پرده تا ۲۸٪ کاهش دهد.

۷- در حضور دو پرده آب‌بند مقادیر لین و بلای کمتر از مقادیر عددی می‌باشند لیکن مقادیر بلای به مقادیر عددی نزدیکتر می‌باشد. جهت تصحیح مقادیر لین و بلای با حضور دو دیوار سپری می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{kh}{q} = 1.5553L_{bligh} - 76.44 \quad (۳-۵)$$

$$\frac{kh}{q} = 1.5553L_{lane} + 16.881 \quad (۴-۵)$$

۸- موقعیت بهینه دو پرده آب‌بند در زیر سد خاکی اولی در ابتدای بالادست سد و دومی در انتهای پایین‌دست سد می‌باشد.

۹- زوایای کمتر از ۴۵ درجه در تئوری‌های لین و بلای به عنوان طول‌های افقی و زوایای بالاتر از ۴۵ درجه به عنوان طول‌های قائم در نظر گرفته می‌شود در حالیکه در مقادیر عددی هر زاویه‌ای تاثیر متفاوت بر طول خزش دارد. برای یک عمق پرده آب‌بند ثابت روابط زیر جهت تغییر طول خزش با تغییر زاویه پرده آب‌بند واحد در زیر سد می‌باشد:

الف- آببند در ابتدای بالا دست:

$$\frac{kh}{q} = -16.384 \cos^2 \alpha + 13.44 \cos \alpha + 168.18 \quad (R^2 = 0.9983) \quad (5-5)$$

ب- آببند در وسط سد:

$$\frac{kh}{q} = -18.949 \cos^2 \alpha - 0.0008 \cos \alpha + 156.16 \quad (R^2 = 0.9991) \quad (6-5)$$

ج- آببند در انتهای سد:

$$\frac{kh}{q} = -15.211 \cos^2 \alpha - 17.604 \cos \alpha + 164.62 \quad (R^2 = 0.9309) \quad (7-5)$$

جهت تصحیح معادلات لین و بلای می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{kh}{q} = 0.5829 L_{lane} + 107.99 \quad (8-5)$$

$$\frac{kh}{q} = 0.5829 L_{bligh} + 73.02 \quad (9-5)$$

۱۰- جهت برآزش تاثیر زاویه پرده آببند بر روی دبی نشت رابطه زیر ارائه گردید که در این رابطه

$\frac{q}{q_{opt}}$ برابر نسبت دبی با هر هد آبی و عمق پرده آببند به دبی با همان عمق آببند و بار آبی و

زوایای بهینه آببند یعنی ۶۰ و ۱۲۰ نسبت به سطح بالادست، a_1 زاویه آببند بالادست و a_2

زاویه آببند پایین دست می باشد:

$$\frac{q}{q_{opt}} = 0.078 \cos^2 a_1 + 0.074 \cos^2 a_2 - 0.00045 \cos a_1 \cos a_2 + 0.071 \cos a_1 - 0.067 \cos a_2 + 1.031 \quad (10-5)$$

۱۱- با حضور دو پرده آببند گرادیان خروجی فقط با تغییر زاویه پرده انتهایی پایین دست تغییر می‌کند ولی آببندهای ابتدایی و وسطی تغییر محسوسی بر گرادیان خروجی ندارند.

۱۲- در خاکهای غیرایزوتروپ که ضرایب نفوذپذیری افقی و قائم یکسان نیستند تاثیر حضور پرده آببند متفاوت خواهد بود به طوری که با افزایش نسبت نفوذپذیری افقی به قائم تاثیر حضور پرده پایین می‌آید و افزایش عمق آببند تاثیر کمتری بر دبی نشت و گرادیان خروجی دارد.

۱۳- جهت تعیین مقدار دبی نشت در خاک غیر ایزوتروپ با مقادیر متفاوت عمق پرده آببند می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\frac{q}{q_0} = 0.0935 \left(\frac{d}{D}\right)^{1.168} \ln\left(\frac{k_x}{k_y}\right) - 0.294 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0.1663 \left(\frac{d}{D}\right) + 0.9938 \quad (11-5)$$

۱۴- گرادیان خروجی در خاکهای غیرایزوتروپ با افزایش نسبت k_x/k_y کاهش می‌یابد تاثیر عمق پرده آببند در مقادیر $k_x=k_y$ زیاد بوده و با افزایش k_x/k_y تاثیر این عمق کمتر می‌شود.

۱۵- جهت تعیین گرادیان خروجی در پی‌های ناهمسان با حضور یک دیوار آببند در انتهای پایین دست سد می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$i = 0.0583 e^{-1.057\left(\frac{d}{D}\right)} \cdot \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{0.3735\left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0.3331\left(\frac{d}{D}\right) - 0.3544} \quad (12-5)$$

۱۶- در صورتی که لایه خاک پی با افق زاویه α بسازد در اینصورت جهت تعیین دبی نشت می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\frac{q}{qo_{\alpha}} = a. \frac{q}{qo_{(1)}} + b \quad (13-5)$$

$$a = -30.174 \cos^2(\alpha) + 11.231 \cos(\alpha) + 20.484$$

$$b = 27.881 \cos^2(\alpha) - 10.459 \cos(\alpha) - 17.919$$

۵-۲- پیشنهادها

با مطالعه تحقیقات گذشته در جهت کاهش دبی نشت و گرادیان خروجی در زیر سدها و سازه‌های آبی، پرده‌های آب‌بند به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌ها شناخته شده است. در این پایان‌نامه عوامل موثر بر کاهش پدیده رگاب از طریق پرده آب‌بند نظیر مکان حضور، زاویه و تعداد آنها مورد بحث قرار گرفت. برای اینکه بتوان از نتایج موثرتری در این راستا بهره جست موارد زیر به عنوان موضوعاتی برای تحقیقات آینده توصیه می‌شود:

۱- در پایان نامه حاضر به بررسی حضور یک پرده آب‌بند در خاک‌های غیرایزوتروپ ناهمسان پرداخته شده است که توصیه می‌گردد حضور دو پرده آب‌بند در این نوع خاک‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

۲- در این پایان نامه پرده‌های آب‌بند به عنوان اجزای صلب و غیرقابل نفوذ مانند بتن در نظر گرفته شده است که می‌توان برای طرح‌های آینده نوع این پرده‌های آب‌بند از لحاظ مصالح ارزانتر و با طول عمر بالاتر مورد بررسی قرار گیرد.

- ۳- در پایان نامه حاضر به بررسی جریان آب در خاک بر اساس قانون داریسی (سرعت کم جریان آب در خاک) پرداخته شد درحالی که می توان در بررسی های دیگر از قوانین غیر داریسی و سرعت زیاد حرکت آب در خاک مانند جریان درون زهکش ها مورد بررسی قرار گیرد.
- ۴- در پایان نامه حاضر تمام سطح بالادست و پایین دست به عنوان مصالح نفوذپذیر در نظر گرفته شده که می توان حضور بلانکت و پتوهای رسی را نیز مورد بررسی قرار داد.
- ۵- در این پایان نامه طول سطوح خاک بالادست و پایین دست جهت نفوذ آب ثابت در نظر گرفته شده است که می توان در بررسی های دیگر این طول ها متغیر شوند.
- ۶- در این پایان نامه به بررسی جریان در پی سد پرداخته شده که می توان در طرح های دیگر نشت در بدنه و پی سد مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع و منابع

۱. ابول پور ب، (۱۳۷۳)، پایان نامه ارشد: "روشهای برآورد تراوش، زیر فشار و زیرشویی در سازه های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
۲. افشار حرب ع، (۱۳۷۳)، "زمین شناسی کپه داغ"، چاپ اول، انتشارات سازمان زمین شناسی، شماره ۱۱، ص ۲۷۵-۲۸۶
۳. پوراسکندری س، (۱۳۹۱)، "بررسی آزمایشگاهی و عددی پرده آببند بر روی نشت از پی های مطبق در سدها"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۴. حبیبی م، (۱۳۷۴)، "مدلهای فیزیکی و هیدرولیکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ص ۲۱۰
۵. حیدری نژاد ق، (۱۳۷۶)، "مدلهای هیدرولیکی و فیزیکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۸۰-۱۵
۶. 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.
۷. ساعتی ع.م، (۱۳۸۵)، "تزریق در سنگ با تاکید بر ساختگاه سد"، چاپ اول، انتشارات سیمای دانش، تهران، ص ۲۷۵-۳۱۰.
۸. شجاعی فرد م.ح،، هشتروندی ع.ن، (۱۳۸۶)، "مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران.
۹. شرکت مهتاب قدس، (۱۳۷۴)، "مجموعه گزارشهای سد علویان"، انتشارات سازمان آب منطقه ای آذربایجان و اردبیل، ص ۴۹۷-۶۸۰.

۱۰. شفاعی بجستانی م، (۱۳۹۰)، "مدلهای فیزیکی و هیدرولیکی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۱۱۰.
۱۱. شمسایی ا، (۱۳۸۴)، "آشکارسازی و مقابله با نشت از سدها"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ص ۱۸۴.
۱۲. شمسی ط، (۱۳۷۹)، "هیدرولیک محاسباتی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.
۱۳. صدقی اصل م، رحیمی ح، خالقی ح، (۱۳۸۴)، "اثر موقیت بهینه پرده آببند 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.
۱۴. 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.
۱۵. صیادزاده ف، زمردیان م، (۱۳۸۶)، "آنالیز نشت از پی خاکهای لایه داربا استفاده از روش المان محدود"، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
۱۶. طاحونی ش، (۱۳۷۶)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک خاک"، جلد اول، چاپ پنجم، انتشارات فروزش، تهران.
۱۷. قبادیان ر، خدایی ک، (۱۳۸۸)، "تاثیرات دیوار آببند 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.
۱۸. 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.

۱۹. عباسی م، غفوری م، (۱۳۸۵)، "تزریق پذیری و نفوذپذیری ساختگاه سد اراک"، دهمین همایش انجمن زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲۰. عظیمیان ا، (۱۳۷۷)، "دینامیک سیالات محاسباتی"، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
۲۱. معماریان ح، (۱۳۸۱)، "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۱۵-۳۱۴.
۲۲. معاونت برنامه ریزی و راهبردی جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۷۸)، "استانداردهای مهندسی آب کشور، راهنمای تزریق در سازه های آبی"، نشریه شماره ۱۸۶.
۲۳. ملک زاده ا، کاشانی م.ح، (۱۳۷۰)، "مکانیک سیالات"، چاپ اول، انتشارات فرید مشهد، ص ۱۴۰-۱۶۸.
۲۴. موحد دانش ع.ا، (۱۳۷۶)، "مقدمه ای بر مدل های ریاضی آب های زیرزمینی"، چاپ اول، انتشارات گلباد، تهران.

۲۵. Bligh W.G. (۱۹۱۰), "dams barrages and wiers on porous foundations", engineering news, ۶۴ (dec), ۷۰۸.
۲۶. Lane E.W. (۱۹۳۵), "security from underseepage masonry dams on earth foundations", trans. **ASCE**, ۱۲۳۵ - ۱۲۷۲.
۲۷. Khosla A.N., Bise N.K., MC Kenizie E.T., (۱۹۳۶), "disine of wiers on previous foundations", publication number ۱۲ of the central board of irrigation, simla, india.
۲۸. Chanson H. (۱۹۹۹), "**the hydrolics of open channel flow**", chap ۱۱.

۲۹. Dasilva j.f. (۲۰۰۶), “optimization of concrete gravity dams foundation systems”, ۲۲nd international congress of large dams – ICOLD, Barcelona, Spain.
۳۰. Wong i.h. (۲۰۰۱), “methods of resisting hydrostatic uplift in substructures”, **jurnal of tunneling and underground space teq.** Vol ۱۶. pp ۷۷-۸۶.
۳۱. Opyrachal L. (۲۰۰۳), “application of fuzzy sets idenyify seepage path through dams”, **jornal of hydrolic engineering** (ASCE), vol. ۱۲۹. pp ۵۴۶-۵۴۸.
۳۲. Jie y. (۲۰۰۴), “seepage analysis based on boundary-fitted coordinate transformation method”, **computer and geotechnics**. Vol ۳۱, ۲, pp ۲۷۹-۲۸۳.
۳۳. Sadeghi-asl M. rahimi H. khaleghi H. (۲۰۱۱), “laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes”, **experimental techniques**, (inpress). doi: ۱۰.۱۱۱۱/j.۱۷۴۷-۱۵۶۷.۲۰۱۰.۰۰۶۹۲.
۳۴. Krahn j. (۲۰۰۲), “**seep/w version ۲ manual**”, alberta, Canada.
۳۵. Pakbaz m.s. (۲۰۰۹), “evalution of performance of plastic concert cutoff wall in Karkhe dam using ۳-D seepage analysis and measurement”, **jornal of applied sciences**, ۹, ۴, pp ۷۲۴-۷۳۰.
۳۶. Yifeng C. and chuangbing z. (۲۰۰۸), “a numerical solution to seepage problems with complex drainage system”, **computers and geotechniques**. ۳۵, ۳, pp ۳۸۳-۳۹۳.
۳۷. Harr, M. E., (۱۹۶۲), “**Groundwater and Seepage**”, McGraw-Hill, New York.

۳۸. Li, B., and V. K., Garga, and M. H., Davies, (۱۹۹۸), "Relationships for Non- Darcy Flow in Rockfill", **J. of Hydro. Engng. Div. ASCE**, ۱۲۴, ۲, ۲۰۶- ۲۱۲.
۳۹. Samani, H. M. V., and Samani, J. M. V., and Shaiannejad, M., (۲۰۰۳), "Reservoir Routing Using Steady and Unsteady Flow Through Rockfill dams", **ASCE, J. of Hydro. Engng**, Vol. ۱۲۹, ۶, pp. ۴۴۸- ۴۵۴.

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

Abstract

Today's the issues related to the safety and stability of earth dams with hefty fees to have the operation, are of particular importance. Many dams are built with problems caused by seepage, that This seepage may occur from the foundation or dam. Construction of cutoff wall beneath the water structures is the most effective methods for increasing the creepage and reduce the seepage rate. The purpose of this research is to find relationships to influence the location and angle for cutoff wall in foundation of dams. . In this study, using an in lab model of seepage and drainage tank to found The amount of seepage rate and piezometric pressure For a total of 20 different heads and three different lengths of the dam with and one soil with an one cutoff. The results were compared with results of numerical modeling and numerical model showed acceptable fit with the experimental data. seepage and hydraulic gradient of numerical values given in 400 for a cutoff wall for two cut-off, 4 different depths of cutoff, 3 locations, 11 angle, 4 different heads upstream and downstream of the software was extracted. The results showed that the best place to reduce the seepage rate and hydraulic gradient in the Beginning and end of the dam. that no-dimensional Relation to the effect of depth, angle and location of the cut-off rate of seepage, and hydraulic gradient and creepage were presented. The results showed that creepage of the Line and Blighs theory can be extracted only suitable for laboratory environments and in Below dams Richards and Laplace equations, numerical finite element method of high accuracy. To study the numerical method of measurement software seep/w of the package was used GeoStudio 2007.

KEY WORDS: Cutoff wall, Earth dams, Hydraulic Gradient, Seepage, seep/w.



Shahrood University

Faculty of Agricultural

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

Abdolsaleh Hojati

Supervisor(s):

Dr. Khalil Azhdary

Dr. seyed hosein Ghoreishi

Advisor:

Dr. samad Emamgholizadeh

February ۲۰۱۵

