

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته‌ی سازه‌های آبی

عنوان

**بررسی آزمایشگاهی نشت آب از میان پی‌های**

**چندلایه**

نگارنده

محسن کریمی پوچ

اساتید راهنما

دکتر خلیل اژدری

دکتر سید حسین حسینی

اساتید مشاور

دکتر روزبه موذن زاده

مهندس حسن گلی

شهریور ۱۳۹۷

## شکروقدردانی

پاس بیگران پروردگار یکتا را که، مستی ام بخشید به طریق علم و دانش و به، همیشگی

رهروان دانش منمخرم نمود.

بدین وسیله از مساعدت های اساتید گرامتقدرم

جناب آقای دکتر اژدری، جناب آقای دکتر حسینی،

جناب آقای دکتر موزن زاده و جناب آقای مهندس گلگی

که با دقت نظر، راهنمایی های ارزنده ای در جهت بهبود کیفی این پایان نامه ارائه

فرمودند، سپاسگزارم.

از اساتید گرامی و شایسته، خانم دکتر کنجی نوروزی و جناب آقای دکتر دلفندی  
که زحمت دآوری پایان نامه را بر عهده داشتند، کمال تشکر را دارم. هم چنین از  
جناب آقای دکتر موحد نژاد نماینده شورای تحصیلات تکمیلی صمیمانه تشکر می‌کنم.  
از کمک های بی دریغ کارشناس آزمایشگاه هیدرولیک جناب آقای مهندس گل  
عزیز و سایر دوستانی که در این مسیر همراه و همگام من بودند کمال سپاس را دارم.

# تهدنامه

اینجانب محسن کریمی پوچ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی آزمایشگاهی نشت آب از میان پی‌های چندلایه تحت راهنمایی دکتر اژدری، دکتر حسینی متعهد می‌شوم.

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

## تاریخ

### 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .  
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

سدها سازه‌هایی هستند که به منظور تنظیم سطح آب در مسیر جریان رودخانه‌ها ساخته می‌شوند. آزمایش‌ها بر روی سه نوع خاک ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر در داخل دستگاه تانک نشت و نفوذ انجام شد. با توجه به دانه بندی‌ها، آرایش‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه در نظر گرفته شد و پارامترهای پتانسیل هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای آرایش دولایه با حضور پرده آب‌بند بهترین عملکرد در کنترل جوشش آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر بود به طوری که به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. در آرایش سه لایه با پرده آب‌بند، آرایش‌های صعودی ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و نزولی ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشتند که به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۹۰ و ۴۸۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. برای آرایش دولایه در حالت بدون پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی در آرایش ۰/۶-۱/۲ و ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، به ترتیب در حدود ۰/۰۰۱۹ و ۰/۰۰۱ بود. برای آرایش سه لایه در حالت بدون پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی به ترتیب مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۲-۰/۶ و ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود به طوری که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، در حدود ۰/۰۰۲۴ و ۰/۰۰۳۴ بود. برای آرایش دولایه در حالت بدون پرده آب‌بند و با حضور پرده آب‌بند، بهترین عملکرد به لحاظ کنترل دبی نشت به ترتیب مربوط به آرایش‌های ۰/۶-۰/۲ و ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود. برای آرایش سه لایه در حالت بدون پرده آب‌بند و با حضور پرده آب‌بند، بهترین عملکرد به لحاظ کنترل دبی نشت به ترتیب مربوط به آرایش‌های ۰/۶-۱/۲-۰/۲ و ۰/۲-۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود. بررسی نتایج پی‌های تک لایه و چندلایه نشان داد که استفاده از پی‌های چندلایه می‌تواند راهکاری موثر در کنترل پدیده جوشش، کاهش گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت باشد.

**کلمات کلیدی:** پتانسیل هیدرولیکی، پدیده زیرشویی، پرده آب‌بند، پی‌های چندلایه، دبی نشت، سد، گرادیان هیدرولیکی.

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- کریمی پوچ م، اژدری خ، حسینی س ح، موذن زاده ر، (۱۳۹۷)، تاثیر آرایش‌های مختلف پی مطبق سه لایه بر روی پتانسیل هیدرولیکی در لایه‌های مختلف، هفدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.

# فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۳-۱- هدف از انجام تحقیق.....	۳
فصل دوم.....	۵
کلیات و پیشینه تحقیق.....	۵
۱-۲- کلیات.....	۶
۲-۲- تعریف سد.....	۶
۲-۲-۱- اهداف مورد نظر در ساخت سد.....	۶
۳-۲- پدیده نشست از پی سد.....	۶
۳-۲-۱- اثرات نامطلوب نشست در داخل سدها.....	۷
۴-۲- روش‌های آب‌بندی و کنترل تراوش در سدها.....	۷
۵-۲- طول خزش.....	۱۰
۵-۲-۱- روش بلای.....	۱۰
۵-۲-۲- روش لین.....	۱۱
۶-۲- مروری بر مطالعات انجام شده.....	۱۱
فصل سوم.....	۲۱
مواد و روش‌ها.....	۲۱
۱-۳- مقدمه.....	۲۲
۲-۳- آزمایش دانه‌بندی خاک.....	۲۲



۳-۳- ضریب نفوذپذیری (ضریب هدایت هیدرولیکی).....	۲۵
۳-۴- مواد و مصالح.....	۲۶
۳-۵- بدنه سد و پرده آببند.....	۲۷
۳-۶- مخزن نشت و نفوذ.....	۲۷
۳-۷- آماده‌سازی مخزن نشت و نفوذ.....	۲۹
۳-۸- نحوه انجام آزمایش با تانک نشت و نفوذ.....	۳۰
۳-۹- نحوه قرارگیری لایه‌های خاک در پی سد.....	۳۱
۳-۱۰- انواع آزمایش‌های انجام‌شده با مخزن نشت و نفوذ.....	۳۲
۳-۱۱- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های یک لایه.....	۳۳
۳-۱۲- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های دولایه.....	۳۴
۳-۱۳- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های سه لایه.....	۳۵
فصل چهارم.....	۳۷
نتایج و بحث.....	۳۷
۴-۱- مقدمه.....	۳۸
۴-۲- پتانسیل هیدرولیکی.....	۳۸
۴-۲-۱- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های یک‌لایه.....	۳۸
۴-۲-۲- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های دولایه.....	۴۰
۴-۲-۳- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های سه لایه.....	۴۵
۴-۲-۴- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در انواع آرایش با پرده آببند.....	۴۹
۴-۳- مقایسه تغییرات پتانسیل در آرایش‌های یک‌لایه، دولایه و سه لایه.....	۵۵
۴-۴- تاثیر هد پایین‌دست بر روی پتانسیل جریان.....	۵۷
۴-۵- گرادیان خروجی.....	۶۰
۴-۵-۱- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آببند بر روی گرادیان خروجی در آرایش‌های یک‌لایه.....	۶۰
۴-۵-۲- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آببند بر روی گرادیان خروجی در آرایش‌های دولایه.....	۶۲
۴-۵-۳- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آببند بر روی گرادیان خروجی در آرایش‌های سه لایه.....	۶۷
۴-۶- دبی نشت.....	۷۳
۴-۶-۱- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های یک‌لایه.....	۷۳

۷۵	.....	۴-۶-۲- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های دولایه
۸۰	.....	۴-۶-۳- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های سه لایه
۸۹	.....	فصل پنجم
۸۹	.....	نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۳	.....	پیشنهادها
۹۵	.....	منابع و مأخذ

# فهرست شکل ها

- شکل ۲-۱- ترانشه آببند با نفوذ کامل..... ۷
- شکل ۲-۲- ترانشه آببند با نفوذ ناقص..... ۸
- شکل ۲-۳- بلانکت رسی..... ۸
- شکل ۲-۴- دیوار آببند..... ۹
- شکل ۲-۵- پرده تزریق..... ۹
- شکل ۲-۶- ترکیب ترانشه رسی، بلانکت رسی و دیوار آببند..... ۱۰
- شکل ۲-۷- تعیین پارامترهای تئوری خزش..... ۱۱
- شکل ۳-۱- الکهای استاندارد..... ۲۳
- شکل ۳-۲- دستگاه شیکر..... ۲۳
- شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر..... ۲۴
- شکل ۳-۴- منحنی دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر..... ۲۴
- شکل ۳-۵- منحنی دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر..... ۲۵
- شکل ۳-۶- نمایی از مدل آزمایشگاهی ضریب نفوذپذیری با بار ثابت..... ۲۶
- شکل ۳-۷- مخزن نشت و تابلو پیزومتری استفاده شده برای آزمایش‌های مختلف..... ۲۸
- شکل ۳-۸- تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و تابلوی پیزومتری..... ۲۹
- شکل ۳-۹- نمایی از پیزومترها بر روی تابلو پیزومتری..... ۳۱
- شکل ۳-۱۰- نمایی از تخریب پی در پایین دست سد بر اثر پدیده زیرشویی..... ۳۱
- شکل ۳-۱۱- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش یک‌لایه بدون پرده آببند..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش دو‌لایه بدون پرده آببند..... ۳۴
- شکل ۳-۱۳- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش سه‌لایه بدون پرده آببند..... ۳۵
- شکل ۴-۱- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۲ میلی‌متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۳۹
- شکل ۴-۲- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۶ میلی‌متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۳۹
- شکل ۴-۳- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲ میلی‌متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۴۰
- شکل ۴-۴- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۴۱
- شکل ۴-۵- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲ - ۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۴۱
- شکل ۴-۶- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۴۲
- شکل ۴-۷- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲ - ۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آببند..... ۴۳

- شکل ۴-۸- تغییرات پتانسیل آرایش  $0/2-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۴
- شکل ۴-۹- تغییرات پتانسیل آرایش  $0/6-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۴
- شکل ۴-۱۰- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/2-0/6-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۵
- شکل ۴-۱۱- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-1/2-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۶
- شکل ۴-۱۲- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/2-0/6-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۷
- شکل ۴-۱۳- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-1/2-0/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۷
- شکل ۴-۱۴- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-0/2-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۸
- شکل ۴-۱۵- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/2-0/6-1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند..... ۴۸
- شکل ۴-۱۶- تغییرات پتانسیل آرایش یک‌لایه  $0/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۴۹
- شکل ۴-۱۷- تغییرات پتانسیل آرایش یک‌لایه  $0/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $9$  سانتی‌متر..... ۵۰
- شکل ۴-۱۸- تغییرات پتانسیل آرایش یک‌لایه  $0/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۵۰
- شکل ۴-۱۹- تغییرات پتانسیل آرایش دو لایه  $0/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۵۱
- شکل ۴-۲۰- تغییرات پتانسیل آرایش دو لایه  $0/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $9$  سانتی‌متر..... ۵۲
- شکل ۴-۲۱- تغییرات پتانسیل آرایش دو لایه  $0/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۵۲
- شکل ۴-۲۲- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-1/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۵۳
- شکل ۴-۲۳- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-1/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $9$  سانتی‌متر..... ۵۴
- شکل ۴-۲۴- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه  $0/6-1/2-1/2$  میلی‌متر با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۵۴
- شکل ۴-۲۵- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی  $0/2$  میلی‌متر..... ۵۵
- شکل ۴-۲۶- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی  $0/6$  میلی‌متر..... ۵۶
- شکل ۴-۲۷- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی  $1/2$  میلی‌متر..... ۵۷
- شکل ۴-۲۸- تغییرات پتانسیل آرایش‌های  $0/2$  میلی‌متر با هد پایین دست  $135$  میلی‌متر..... ۵۸
- شکل ۴-۲۹- تغییرات پتانسیل آرایش‌های  $0/2$  میلی‌متر با هد پایین دست  $255$  میلی‌متر..... ۵۸
- شکل ۴-۳۰- تغییرات پتانسیل آرایش‌های  $0/2$  میلی‌متر با هد پایین دست  $390$  میلی‌متر..... ۵۹
- شکل ۴-۳۱- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک‌لایه، بدون پرده آب‌بند..... ۶۰
- شکل ۴-۳۲- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک‌لایه، با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۶۱
- شکل ۴-۳۳- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دو لایه، بدون پرده آب‌بند..... ۶۲
- شکل ۴-۳۴- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دو لایه، با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۶۴
- شکل ۴-۳۵- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دو لایه، با پرده آب‌بند  $9$  سانتی‌متر..... ۶۵
- شکل ۴-۳۶- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دو لایه، با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۶۶
- شکل ۴-۳۷- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، بدون پرده آب‌بند..... ۶۸
- شکل ۴-۳۸- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۶۹
- شکل ۴-۳۹- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند  $9$  سانتی‌متر..... ۷۱
- شکل ۴-۴۰- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۷۲

- شکل ۴-۴۱- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک‌لایه..... ۷۴
- شکل ۴-۴۲- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، بدون پرده آب‌بند..... ۷۶
- شکل ۴-۴۳- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر..... ۷۷
- شکل ۴-۴۴- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۷۷
- شکل ۴-۴۵- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر..... ۷۹
- شکل ۴-۴۶- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، بدون پرده آب‌بند..... ۸۱
- شکل ۴-۴۷- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر..... ۸۲
- شکل ۴-۴۸- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۸۳
- شکل ۴-۴۹- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر ۸۵

# فهرست جداول

- جدول ۳-۱- ضریب هدایت هیدرولیکی سه لایه خاک..... ۲۶
- جدول ۳-۲- آزمایش‌های انجام شده برای پی همگن در آرایش‌های یک لایه..... ۳۲
- جدول ۳-۳- آزمایش‌های انجام شده برای پی غیر همگن در آرایش‌های دو لایه و سه لایه..... ۳۳
- جدول ۴-۱- مقدار افت پتانسیل برای آرایش‌های  $0/2$  میلی‌متر با هد پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر..... ۵۹
- جدول ۴-۲- مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های یک لایه..... ۶۱
- جدول ۴-۳- عملکرد گرادیان هیدرولیکی آرایش  $1/2-0/6$  میلی‌متر بدون پرده آب‌بند..... ۶۳
- جدول ۴-۴- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۶۴
- جدول ۴-۵- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۶۵
- جدول ۴-۶- مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۶۷
- جدول ۴-۷- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند..... ۶۸
- جدول ۴-۸- گرادیان هیدرولیکی آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۷۰
- جدول ۴-۹- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۷۱
- جدول ۴-۱۰- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۷۳
- جدول ۴-۱۱- دبی نشت آرایش‌های یک لایه بدون پرده آب‌بند..... ۷۴
- جدول ۴-۱۲- دبی نشت آرایش‌های یک‌لایه با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۷۵
- جدول ۴-۱۳- دبی نشت و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه بدون پرده آب‌بند..... ۷۶
- جدول ۴-۱۴- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۷۸
- جدول ۴-۱۵- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۷۸
- جدول ۴-۱۶- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۸۰
- جدول ۴-۱۷- دبی نشت آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند..... ۸۱
- جدول ۴-۱۸- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند  $4/5$  سانتی‌متر..... ۸۳
- جدول ۴-۱۹- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر..... ۸۳
- جدول ۴-۲۰- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند  $13/5$  سانتی‌متر..... ۸۵
- جدول ۴-۲۱- تراز بالادست بحرانی در آرایش‌های یک‌لایه و چندلایه..... ۸۶

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

یکی از ضروری‌ترین و حیاتی‌ترین نیازهای بشر آب است که به‌خصوص با افزایش جمعیت و ضرورت رشد کشاورزی و صنعت از یک طرف و محدودیت مخازن و منابع آبی از طرف دیگر، حساسیت آن روز به روز بیشتر شده و پیش‌بینی می‌گردد در آینده‌ای نه‌چندان دور بحران کمبود آب مهم‌ترین مسئله کشورها، به‌خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک گردد.

تاریخچه اولیه احداث سد به زمانی که اولین بار بشر توانست خاک زمین را جابه‌جا کند، برمی‌گردد. بیشتر تمدن‌ها، به‌واسطه نیازهای اولیه برای فعالیت کشاورزی و تامین آب شرب، در کنار رودخانه‌ها و دریاها و به‌طور کلی در مناطقی که منابع آب به‌اندازه کافی موجود بود، شکل گرفته‌اند. پس از گذشت سال‌ها، بشر به فکر ذخیره این منابع افتاد که موجب ظهور صنعت سدسازی گردید (بازیار و عسگری، ۱۳۹۵).

در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به‌عنوان ماده‌ای بسیار ارزشمند و استراتژیک مدنظر بوده است به‌طوری‌که این موضوع سبب گردیده است تا بندسازی، سدسازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره‌سازی و انتقال آب در آثار به‌جامانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد. پادشاهان هخامنشی به‌واسطه نیاز جغرافیایی کشور ایران و علاقه‌ای که در گسترش و آبادانی سرزمین تحت فرمانروایی از خود نشان می‌دادند، 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 برطرف نمایند و آثار و شواهد آن را نیز می‌توان در نقاط مختلف ایران درک نمود. علاوه بر آن بسیاری از آثار به‌جامانده از این دوران‌ها در سرزمین‌های تابعه حکومت‌های ایران باستان نیز قابل مشاهده است (افشار، ۱۳۷۳).



## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

از جمله مکان‌هایی که بررسی پدیده نشست در آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است پی سدها می‌باشد. به علت اختلاف بار آبی که در دو طرف سازه‌های آبی احداث شده روی پی‌های نفوذپذیر وجود دارد، همواره نشست آب از پی این‌گونه سازه‌ها وجود دارد. اثرات تراوش از خاک زیر این سازه‌ها را می‌توان در سه بخش ایجاد نیروی زیر فشار، دبی نشست و گرادیان خروجی طبقه‌بندی کرد. (خلیلی شایان و امیری تکلدانی، ۱۳۹۱). یکی از نیروهای مخربی که در جهت عدم پایداری سدها و بندهای انحرافی عمل می‌کند نیروی زیر فشار است که ناشی از جریان آب در محیط متخلخل پی سدها و بندهای انحرافی می‌باشد. گرادیان خروجی نیز مهم‌ترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیر شویی می‌باشد. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیر فشار، کاهش شیب خروجی و همچنین بده نشست از زیر سازه‌های آبی صورت می‌گیرد، احداث دیواره‌های آب‌بند می‌باشد. دیواره‌های آب‌بند که غالباً نفوذناپذیر می‌باشند و یا خیلی کم نفوذپذیرند باعث کند کردن و کم کردن حرکت آب زیر سازه آبی می‌شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می‌کنند (عابدی کویایی، ۱۳۸۰). از جمله پی‌های سدها می‌توان به پی‌های چندلایه اشاره کرد که بررسی فاکتورهای نشست در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۱-۳- هدف از انجام تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی نشست آب از میان پی‌های چندلایه است. برای این منظور مدل فیزیکی یک سد بتنی در داخل دستگاه مخزن نشست و نفوذ در نظر گرفته شده، و با توجه به مصالح پی آرایش‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه تاثیر پتانسیل هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و دبی نشست مورد بررسی قرار گرفت.



# فصل دوم

## کلیات و پیشینه تحقیق

## ۲-۱- کلیات

در این فصل به تشریح مفاهیم اولیه مورد بحث اعم از سد، اهداف مورد نظر در ساخت سد، پدیده نشست از پی سد، اثرات نامطلوب نشست در داخل سدها، روش‌های آب بندی و کنترل تراوش در سدها، طول خزش و روش‌های آن پرداخته، سپس مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه نشست ارائه شده است.

## ۲-۲- تعریف سد

سد عبارت است از بنایی که بخشی را از بخش دیگر جدا می‌کند و غالباً به مفهوم دیوار یا سازه‌ای است که از حرکت آب جلوگیری نماید، تا آب ذخیره گردد یا انحراف بیابد (وفائیان، ۱۳۹۱).

## ۲-۲-۱- اهداف مورد نظر در ساخت سد

مهم‌ترین هدف در احداث سد یکی از سه مورد تامین آب شرب، تامین آب کشاورزی و تولید برق است. علاوه بر این، اهداف فرعی دیگری از قبیل کنترل سیلاب‌های فصلی، اهداف تفریحی، اشتغال زایی، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و موارد مشابه هم گاهی در شمار اهداف احداث سدها نام‌برده می‌شود (قنبری، ۱۳۹۳).

علل شکست سد، نشست و زیرشویی (۳۵٪)، سرریز آب از روی بدنه سد (۲۵٪)، فرسایش سرریز (۱۴٪)، تغییر شکل بیش از حد (۱۱٪)، لغزش (۱۰٪)، شکست درپچه (۱۲٪)، ساخت ناقص (۲٪) و ناپایداری در برابر زلزله (۲٪) می‌باشند (لوکمن و همکاران، ۲۰۱۱).

## ۲-۳- پدیده نشست از پی سد

اساس کار زه آب بدین‌صورت است که مولکول‌های آب به دلیل وجود انرژی پتانسیل در محیط متخلخل خاک جریان می‌یابند و با طی مسیر کم‌کم انرژی خود را به‌واسطه اصطکاک از دست می‌دهند. این پدیده نشست نام داشته است (میشرا و سینگ، ۲۰۰۵).

## ۲-۳-۱- اثرات نامطلوب نشت در داخل سدها

۱. به حرکت درآوردن ذرات خاک و تغییر آرایش آن‌ها و رسوب‌گذاری در میان خلل و فرج ذرات بزرگ‌تر

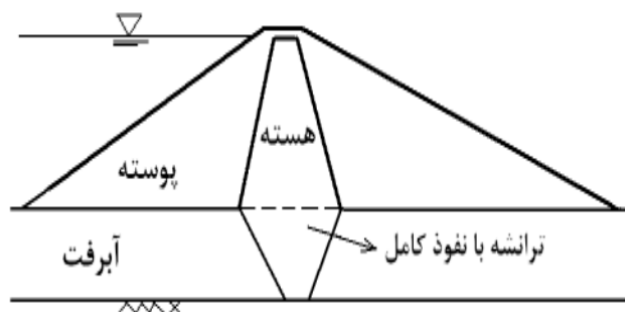
۲. ایجاد فشار آب منفذی که موجب شناور شدن ذرات و سرانجام ایجاد پدیده جوشش ذرات خاک و خروج آن‌ها از محل خود می‌شود.

۳. انجام فرسایش داخلی خاک، ایجاد حفره پیش‌رونده به سمت عقب و درنهایت تخریب سد

۴. ایجاد فشار آب منفذی که موجب کاهش فشار اعمال‌شده بین ذرات خاک شده و درنتیجه سبب از بین رفتن قسمتی از مقاومت خاک ناشی از اصطکاک داخلی بین ذرات می‌شود (رحیمی، ۱۳۹۲).

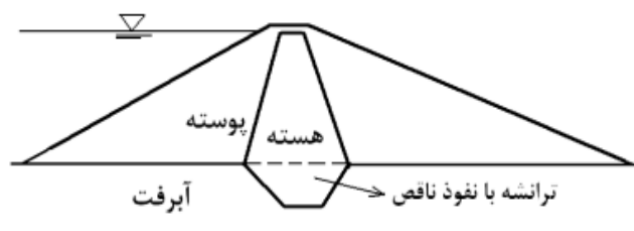
## ۲-۴- روش‌های آب‌بندی و کنترل تراوش در سدها

(۱) ترانشه آب‌بند با نفوذ کامل: گودالی است که با شیب خاصی در پی حفاری شده و با مصالح نفوذناپذیر پر می‌شود. این ترانشه به هسته وصل می‌شود و معمولاً با همان مصالحی ساخته می‌شود که برای ساخت هسته سد به کار گرفته خواهد شد (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱- ترانشه آب‌بند با نفوذ کامل

(۲) ترانشه آب‌بند با نفوذ ناقص: در طراحی و اجرا مشابه ترانشه با نفوذ کامل است با این تفاوت که در اینجا ترانشه به سنگ بستر دوخته نمی‌شود. بنابراین درصدی از نشت از زیر ترانشه عبور می‌کند. ترانشه ناقص درجایی اجرا می‌شود که عمق سنگ بستر زیاد باشد و یا این‌که لایه‌های خاک زیر ترانشه نسبتاً نفوذناپذیر باشند (شکل ۲-۲).



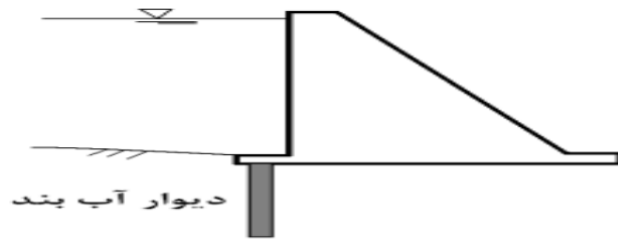
شکل ۲-۲- ترانشه آببند با نفوذ ناقص

۳) بلانکت (پتوی) رسی: یک لایه از خاک ریزدانه است که به ضخامت نیم تا یک متر در بالادست سد اجرا می‌گردد. این لایه باید به هسته سد وصل گردد، و گرنه از بین هسته و بلانکت آب به پی نشت می‌کند. در واقع اصلی‌ترین کار بلانکت آن است که با طولانی کردن مسیر زه‌گرادیان آن را کاهش می‌دهد و لذا در مجموع نشت کاهش می‌یابد. گاهی بلانکت رسی در پایین دست سد هم اجرا می‌شود، ولی بلانکت بالادست عملکرد مناسب‌تری دارد (شکل ۲-۳).



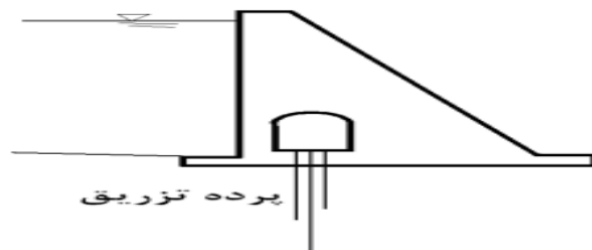
شکل ۲-۳- بلانکت رسی

۴) دیوار آببند با بتن سخت (بتن پلاستیک): دیواری از بتن پلاستیک به ضخامت ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر است که می‌تواند نظیر ترانشه رسی به دو روش دیوار بانفوذ کامل و دیوار بانفوذ ناقص اجرا شود. مصالح دیوار شامل سیمان، بنتونیت، شن، ماسه و آب است (شکل ۲-۴).



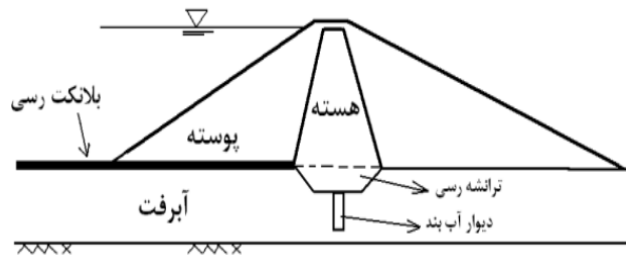
شکل ۲-۴- دیوار آب بتن

۵) پرده تزریق: روشی است که به وسیله آن مصالح دوغابی با فشار به داخل منافذ و ترک‌ها و حفرات موجود در توده خاک و سنگ تزریق می‌شود. دوغاب تزریق از ترکیب آب و سیمان و مواد دیگر ساخته می‌شود. در مواردی که بازشدگی درزه‌ها زیاد است می‌توان ماسه را هم به ترکیب اضافه کرد. در هر صورت تزریق نمی‌تواند نفوذپذیری توده را به صفر برساند، زیرا دوغاب در درزه‌های بسیار ریز با بازشدگی کمتر از یک‌دهم میلی‌متر اصلاً نفوذ نمی‌کند، در حالی که آب می‌تواند در این درزه‌ها هم نفوذ کند (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵- پرده تزریق

۶) روش‌های ترکیبی شامل ترانشه آب‌بند با نفوذ کامل، ترانشه آب‌بند با نفوذ ناقص، بلانکت رسی، دیوار آب‌بند با بتن پلاستیک و پرده تزریق می‌تواند راهکاری موثر در آب‌بندی سد و کاهش تراوش باشد. شکل ۲-۶ نمای شماتیک روش آب‌بندی سد با ترکیب ترانشه رسی، بلانکت رسی و دیوار آب‌بند را نشان می‌دهد (قنبری، ۱۳۹۳).



شکل ۲-۶- ترکیب ترانشه رسی، بلانکت رسی و دیوار آب بند

## ۲-۵- طول خزش

از جمله نتایج پدیده نشست وقوع جوشش است که اثرات نامطلوبی به دنبال دارد. به منظور بررسی پدیده جوشش محاسبه‌ی طول خزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی طول خزش وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش بلای و لین اشاره کرد، که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۵-۱- روش بلای<sup>۱</sup>

بلای (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 به‌طور 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 مطابق شکل (۲-۷) در شرایط حضور دیواره سپری در بالادست به‌عنوان حالت نمونه، از تئوری بلای عبارت است از:

$$L_x = \begin{cases} X, & 0 \leq X \leq x \\ X + 2l, & X > x \end{cases} \quad (1-2)$$

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

<sup>۱</sup> - Bligh



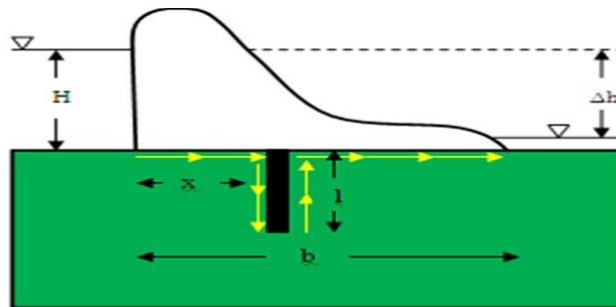
که در آن،  $H$  ارتفاع آب در بالادست،  $l$  عمق پرده آب بند،  $b$  عرض کف بند،  $x$  موقعیت طولی هر نقطه از ابتدای کف بند،  $L_x$  فاصله خزشی هر نقطه در طول مسیر خزش و  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع سطح آب در طرفین می‌باشد.

## ۲-۵-۲- روش لین<sup>۱</sup>

لین (۱۹۳۵) اعتقاد به تفاوت تاثیر حرکت افقی و حرکت قائم آب در خاک داشت و لذا بر اساس تئوری خزشی وزنی خود با اختصاص ضریب  $0.33$  به مجموع طول‌های افقی و ضریب  $1$  به مجموع طول‌های قائم، طول معادل را به صورت زیر تعریف کرد:

$$L_{eq} = \frac{1}{3} \sum L_H + \sum L_V \quad (2-2)$$

که در آن،  $\sum L_H$  طول مسیر خزش افقی (دیواره‌های کم شیب‌تر از  $45^\circ$  درجه) و  $\sum L_V$  طول مسیر خزش قائم (دیواره‌های پرشیب‌تر از  $45^\circ$  درجه) در نظر گرفته می‌شود. در این روش نیز مشابه تئوری خزشی بلای، توزیع زیر فشار در زیر سد خطی فرض می‌شود.



شکل ۲-۷- تعیین پارامترهای تئوری خزش

## ۲-۶- مروری بر مطالعات انجام شده

با توجه به اهمیت مسئله نشت از پی سدها و مشکلات ناشی از آن بررسی این پدیده و پارامترهای مرتبط با آن همواره مورد توجه محققین قرار داشته است. علی رغم مطالعات زیادی که در این زمینه

<sup>۱</sup>-Lane

انجام شده و با توجه به اهمیت مسئله، بررسی پدیده نشت هنوز هم مورد توجه محققین قرار دارد. در ادامه به برخی از مطالعات اشاره خواهد شد.

▪ قبادیان (۱۳۹۰)، اثر دیواره آببند بر موقعیت خط نشت آزاد و دبی تراوش در سدهای خاکی را با استفاده از روش عددی احجام محدود مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد تحت هر شرایطی وجود دیواره آببند دبی نشت را کاهش می‌دهد. زمانی که دیواره آببند در زیر وسط قاعده سد قرار دارد بیشترین دبی تراوش مشاهده می‌شود. با جابجا کردن موقعیت دیواره آببند می‌توان دبی نشت را در مقایسه با دیوار آببند در مرکز تا ۲۰ درصد کاهش دهد. هر چه دیواره آببند از پاشنه به طرف پنجه جابجا شود خط تراوش آزاد در موقعیت بالاتری قرار می‌گیرد. با تغییر موقعیت پرده آببند از مرکز قاعده تا پنجه سد حجم توده اشباع سد ۴۹ درصد افزایش می‌یابد در صورتی که اگر دیواره آببند در پاشنه احداث گردد حجم توده اشباع تنها ۱۷/۹ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین تاثیر دیواره آببند زمانی است که طول آن بیشتر از ۹۰ درصد ضخامت پی نفوذپذیر باشد.

▪ صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۴)، اثر موقعیت بهینه پرده آببند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی را با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند و با مقایسه کارگذاری پرده آببند در موقعیت‌های مختلف طول قاعده سد، نشان دادند که بهترین موقعیت پرده آببند برای کاهش نشت پنجه یا پاشنه سد می‌باشد. از این نتیجه می‌توان دریافت که بهترین راه کنترل زیرشویی، نصب پرده آببند در پنجه سد می‌باشد. نتیجه نهایی اینکه برای استفاده عملی، بهتر است دو عدد پرده آببند یکی برای کنترل دبی نشت در بالادست سد (پاشنه) و یکی برای کنترل زیرشویی در پایین دست سد (پنجه)، نصب گردد.

▪ صیاد زاده و زمردیان (۱۳۸۶)، آنالیز نشت از پی خاک‌های لایه دار با استفاده از روش المان محدود را مورد بررسی قرار دادند و خصوصیات جریان (مقدار نشت و گرادیان خروجی) را در

سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده سپر در عمق‌های مختلف پنجه، روی سیستم‌های خاک دولایه و سه لایه بررسی کردند و نتایج به دست آمده را به صورت نمودارهای بی‌بعدی به نام منحنی‌های اپسیلون ارائه دادند. به ازای عرض سد به ضخامت لایه‌های خاک  $(\frac{B}{T})$ ، با ثابت بودن اپسیلون‌ها و به ازای افزایش عمق پرده سپری به ضخامت لایه‌های خاک  $(\frac{S}{T})$ ، مسیر جریان افزایش و مقدار گرادیان خروجی و دبی نشت در خاک دولایه کاهش می‌یابد و در نتیجه خطر آبشستگی ذرات و خالی شدن تدریجی خاک زیر پی تقلیل می‌یابد.

- افتخار افضلی و بارانی (۱۳۹۱)، اثر دیواره‌ی آب‌بند بر نیروی زیر فشار و شیب خروجی زیر سازه‌های آبی را با استفاده از نرم‌افزار ۲D Seep بررسی کردند. نتایج نشان داد که دیواره‌ی آب‌بند بالادست سد باعث کاهش مقدار نشت، زیر فشار و شیب آبی خروجی از سد می‌شود، که هر سه، مورد نظر طراح، و از نقطه نظر پایداری سد، مثبت می‌باشند. دیواره‌ی آب‌بند در پایین دست سد باعث کاهش مقدار نشت و شیب آبی خروجی از سد می‌گردد، اما زیر فشار را که عامل ناپایداری است افزایش می‌دهد همچنین، تاثیر ناشی از افزایش ژرفای عمق سپر ورقه‌ای در بالادست یا پایین دست سد، در کاهش مقدار نشت و شیب خروجی، با افزایش عرض سد نسبت به ضخامت لایه نفوذپذیر به سرعت کاهش می‌یابد.

- پور اسکندر و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پرده آب‌بند بر روی نشت از پی‌های مطبق در سدها پرداختند و رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند با عمق‌های نفوذ مختلف را برای خاک‌هایی با سه نوع ضریب آب‌گذری و دولایه بندی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که با افزایش عمق دیواره آب‌بند میزان نشت از خاک کاهش یافت. همچنین مدل‌هایی که در لایه بندی خاک آن‌ها درصد رس بیشتر باشد نشت آن کم‌تر است.

- قبادیان و خدایی (۱۳۸۸)، به بررسی تاثیرات دیواره آب‌بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش

احجام محدود پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با احداث یک دیواره آببند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیوار آببند) کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آببند در پایین‌دست احداث شود، دیده می‌شود. علاوه بر این با افزایش طول پرده آببند بالادست در مقایسه با پرده آببند پایین‌دست مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد شدت این کاهش برای پرده آببند پایین‌دست با طول کوتاه‌تر مشهودتر می‌باشد.

▪ صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۹)، به کنترل نشت از پی‌های آبرفتی با بهره‌گیری از مدل آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت طول بهینه بلانکت و عمق پرده آببند به عمق آب مخزن و ضخامت پی به‌منظور حداقل نمودن دبی نشت و کنترل فرسایش درونی، به ترتیب برابر ۸ و ۰/۸ می‌باشد و کاربرد مجزای هر یک از اجزای آببندی کننده در بهترین حالت منجر به کاهش ۶۰ درصدی جریان نشتی از پی سازه گردید.

▪ محرمی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، دیواره‌های آببند را در زیر سازه‌های آبی در مقابل پدیده زیر فشار و زیرشویی اجرا کردند. نتایج نشان داد استفاده از دیوار آببند بالادست با زاویه ۷۰ درجه زیر سازه آبی حداکثر گرادیان خروجی را کاهش می‌دهد و ایمنی سازه آبی را در برابر پدیده زیرشویی افزایش می‌دهد. همچنین دیوار آببند با زاویه ۹۰ درجه زیر فشار کل را کاهش می‌دهد و ایمنی سازه آبی را در برابر زیر فشار افزایش می‌دهد. استفاده از دیوار آببند پایین‌دست زیر فشار کل را افزایش داده و ایمنی در برابر زیر فشار را کاهش می‌دهد. بهترین زاویه دیوار آببند در پنجه سازه آبی جهت کاهش حداکثر گرادیان خروجی و افزایش ایمنی در برابر پدیده زیرشویی ۱۳۰ درجه است. افزایش طول دیوار آببند بالادست

---

<sup>۱</sup>-Moharrami

زیر فشار کل و حداکثر گرادیان خروجی را کاهش می‌دهد و ایمنی در برابر زیر فشار و پدیده زیرشویی را افزایش می‌دهد.

■ آلنیلی<sup>۱</sup> (۲۰۱۵)، تعیین شبکه جریان از میان چندلایه خاک را با استفاده از روش مدل‌سازی هیدرولیکی انجام داد و نتیجه گرفت که شکل‌های شبکه جریان به عوامل بسیاری مانند قطر ذره خاک و محل پرده آب‌بند بستگی دارد. حداقل مقدار زیر فشار زمانی است که پرده آب‌بند با زاویه قائم در بالادست سازه آبی قرار دارد. استفاده از دو پرده آب‌بند با زاویه قائم در بالادست و پایین‌دست جهت کاهش زیر فشار، گرادیان خروجی و مقدار نشت مفید است.

■ الغزالی و آلنیلی<sup>۲</sup> (۲۰۱۵)، تحلیل آزمایشی نشت خاک زیر سد وزنی را مدل‌سازی کردند و مخزن نشت با پرده آب‌بند پایین‌دست با دو زاویه (۹۰ و ۱۲۰ درجه) و پرده آب‌بند بالادست با سه زاویه (۹۰، ۴۵، ۱۲۰ درجه) طراحی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از پرده آب‌بند پایین‌دست با زاویه ۱۲۰ درجه حدود ۲۵٪ در افزایش ضریب اطمینان در برابر پدیده زیرشویی مفید است و استفاده از پرده آب‌بند بالادست با زاویه ۴۵ درجه حدود ۵۲٪ در کاهش زیر فشار و مقدار نشت مفید است.

■ عبدالکریم عصمت<sup>۳</sup> (۲۰۱۱)، اثر زاویه دیوار آب‌بند را بر روی نشت از زیر سدها بررسی کرد و به نتایج زیر دست‌یافت: بین زاویه دیوار آب‌بند و مقدار جریان آب زیر سد رابطه مستقیم وجود دارد و در دیوار آب‌بند با زاویه ۶۰ درجه حداقل مقدار جریان آب اتفاق افتاد. زیر فشار در زیر سد رابطه مستقیمی با زاویه دیوار آب‌بند نشان داده است که دیوار آب‌بند با زاویه حدود ۱۲۰ تا ۱۳۵ درجه حداقل مقدار فشار آب منفذی را دارد. گرادیان خروجی نیز با

---

۱-Alnealy

۲-Alghazali and Alnealy

۳-Abdul kareem esmat

زاویه دیوار آببند رابطه مستقیمی دارد که حداقل مقدار گرادیان خروجی با زاویه حدود ۴۵ تا ۷۵ درجه روی داد.

■ خلیلی شایان و تکلدانی (۲۰۱۳)، تاثیرات بلانکت، زهکش‌ها و دیوار آببند را بر روی کاهش زیر فشار، نشت، و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی بررسی کردند و با استفاده از تجربه‌های آزمایشگاهی مشاهده کردند که بهترین محل دیوار آببند جهت کاهش جریان نشت در انتهای پایین‌دست است. همچنین مشخص شده است که بهترین محل دیوار آببند جهت کاهش مقدار نیروی فشاری در انتهای بالادست است.

■ منصوری و سلماسی (۲۰۱۳)، اثر طول زهکش افقی و پرده آببند را بر روی نشت و زیر فشار در سد خاکی همگن با شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بهترین موقعیت برای پرده آببند جهت کاهش دبی نشت و خطر زیرشویی میانه پی است. با افزایش عمق پرده آببند مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی خروجی به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پرده آببند در زیر هسته مقدار زیر فشار در بالادست پرده آببند افزایش و در پایین‌دست پرده آببند کاهش می‌یابد. موقعیت قرارگیری پرده آببند در طول سد اثر قابل‌توجهی بر روی تغییرات گرادیان هیدرولیکی خروجی ندارد و همیشه کمتر از یک است.

■ منصوری و همکاران (۲۰۱۴)، تاثیر محل و زاویه دیوار آببند را بر روی زیر فشار در سد انحرافی بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداقل نیروی فشاری کل و حداکثر گرادیان خروجی زمانی رخ خواهد داد که دیوار آببند در بالادست سد قرار گیرد. با استفاده از دیوار آببند کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در نشت رخ خواهد داد. در شرایطی که محل دیوار آببند در بالادست یا پایین‌دست سد باشد حداقل دبی نشت مشاهده خواهد شد و حداکثر دبی نشت زمانی اتفاق خواهد افتاد که محل دیوار آببند در میانه سد باشد.

- اپی رچال<sup>۱</sup> (۲۰۰۳)، برای اولین بار استفاده از مجموعه‌های فازی را به منظور شناخت مسیر خط نشت از زیر سدها مطرح ساخت، وی خطوط نشت جریان را برای لایه‌های مختلف خاک با گرادیان‌های خروجی متفاوت به دست آورد.
- ابول پور (۱۳۷۳)، مدلی را پیشنهاد نمود که زیر فشار وارده بر سازه‌های آبی را با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد. در محاسبه‌ی میزان زیر فشار و زیرشویی از روش‌های لین و بلائی و خوسلا و در محاسبه‌ی میزان نشت از روش خوسلا و شبکه‌ی جریان استفاده کرد. میزان خطایی را که وی برای داده‌های فشار سنجی سد درودزن به دست آورد چهار درصد بود.
- داود نژاد (۱۳۸۵)، جهت آنالیز نشت پی و بدنه سد باغکل از نرم‌افزار Seep/w استفاده کرد. وی مشاهده کرد بدون در نظر گرفتن تمهیدات مناسب آب‌بندی، میزان خروج آب از پی در طول سال بالغ بر ۵۰٪ حجم مخزن است. اما با قرار دادن دیوار آب‌بند در این محدوده از میزان تراوش به مقدار قابل‌توجهی کاسته می‌شود.
- پاکباز و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل ۳D Seep به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.
- کینگ و کولینز<sup>۲</sup> (۱۹۶۸)، به بررسی مسئله نشت زیر سد نفوذناپذیر همراه با دیوار آب‌بند میانی پرداختند. نتایج نشان داد که دیوار آب‌بند میانی دبی زیر سد را کاهش می‌دهد همچنین آن‌ها دریافتند که با جابجایی دیوار آب‌بند به طرف پاشنه زیر فشار در سد کاهش می‌یابد.

---

۱- Opyrchal

۲- King and Collins

- نصرالله و رابعه<sup>۱</sup> (۲۰۱۵)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی خصوصیات نشت زیر پی سازه آبی (حفاظت شده با ستون ورقه‌ای) در چندلایه خاک پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نفوذپذیری لایه بالایی در صورتی که عمق ستون ورقه‌ای از عمق لایه بالایی بیشتر باشد دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نفوذپذیری لایه بالایی در صورتی که ستون ورقه‌ای فقط در لایه بالایی قرار گرفته باشد دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد.
- عبدالجبار جمیل<sup>۲</sup> (۲۰۱۷)، تاثیر دو ستون ورقه‌ای را در دولایه خاک بر روی خصوصیات نشت زیر سازه آبی با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W بررسی کرد. نتایج نشان داد که با افزایش نفوذپذیری لایه‌های خاک زیر فشار و دبی نشت در پنجه سازه آبی افزایش یافت. همچنین با کاهش نفوذپذیری لایه دوم و افزایش نفوذپذیری لایه اول گرادیان خروجی نیز در پنجه سازه آبی افزایش پیدا کرد.
- شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۲۰۱۲)، به مطالعه آزمایشگاهی و عددی ابعاد و موقعیت بهینه دیواره‌های سپری، بلانکت و زهکش جهت کاهش نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی در پی سدهای انحرافی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بهترین مکان قرارگیری دیواره سپری جهت کاهش نشت و شیب خروجی در انتهای کف بند و جهت کاهش زیر فشار بالادست کف بند است.
- یوسفی و همکاران (۲۰۱۵)، به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر سپرهای قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های آبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت استفاده از پرده آب‌بند قائم، به ازای نسبت عمق پرده به ضخامت پی برابر ۰/۴۴ و در صورت

---

۱- Nassralla and Robea

۲- Abdul Jabbar Jamel



استفاده از پرده آب‌بند مایل، به ازای نسبت عمق پرده به ضخامت پی برابر  $0/34$  با بیشترین تراز آب بالادست پدیده جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده مجاز و مناسبی قرار دارند.

■ عابدی کوپایی (۱۳۸۰)، در یک مطالعه موردی توزیع فشار بالابرنده را به کمک چهار روش تئوری لین، بلای، خوسلا و روش عددی تفاضل محدود محاسبه کرد. او بیان کرد که مقدار فشار بالابرنده تخمین زده شده توسط تئوری لین و بلای از تئوری خوسلا و روش تفاضل محدود کمتر است.

■ حبیب عبید<sup>۱</sup> (۲۰۱۳)، به تاثیر محل و زاویه دیوار آب‌بند مایل بر روی کنترل نشت در پی سد پرداخت. نتایج نشان داد که به‌طور کلی دیوار آب‌بند مایل در پایین‌دست سبب کاهش قابل‌توجه گرادیان خروجی در طول پی سد می‌شود و ایمنی در برابر آشفستگی خاک را افزایش می‌دهد و خطر زیرشویی مجدد از محل پنجه سد در پایین‌دست را تغییر می‌دهد. همچنین انرژی زیر فشار زمانی که دیوار آب‌بند مایل در طرف پایین‌دست سد قرار دارد کاهش می‌یابد.

---

۱- Obead



فصل سوم

مواد و روش ها

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده، نحوه انجام آزمایش‌ها و مدل‌ها پرداخته شده است.

### ۳-۲- آزمایش دانه‌بندی خاک

آزمایش دانه‌بندی خاک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. ابتدا نمونه‌های خاک مورد نظر از الک عبور داده شد و آن‌ها را شسته و ذرات رس از آن جدا شدند. سپس نمونه‌های خاک شسته شده خشک گردید و دو کیلوگرم از نمونه خاک جهت دانه‌بندی تهیه شد. پس از آن وزن الک‌های استاندارد و ظرف زیر الک‌ها جداگانه اندازه‌گیری شد. شکل ۱-۳ چند نمونه الک استاندارد را نشان می‌دهد. الک‌ها به ترتیب اندازه منافذ از کوچک به بزرگ روی هم قرار گرفتند به طوری که الک شماره ۴ در بالاترین و الک شماره ۲۰۰ در پایین‌ترین نقطه قرار داشت. سپس یک کیلوگرم نمونه خاک وزن شده را به آرامی و به طوری که به اطراف پراکنده نشود روی الک بالایی ریخته شد و با احتیاط کامل الک‌ها و ظرف زیر آن روی دستگاه شیکی قرار داده شد و الک‌ها توسط پیچ‌های نگهدارنده بر روی شیکر ثابت شدند. شکل ۲-۳ دستگاه شیکر را نشان می‌دهد. شیکر شروع به تکان دادن الک‌ها نمود. پس از متوقف شدن شیکر پیچ‌های نگهدارنده باز شده الک‌ها را از روی شیکر برداشته و هر الک با نمونه خاک داخل آن به طور جداگانه وزن شد.



شکل ۳-۱- الک‌های استاندارد



شکل ۳-۲- دستگاه شیکر

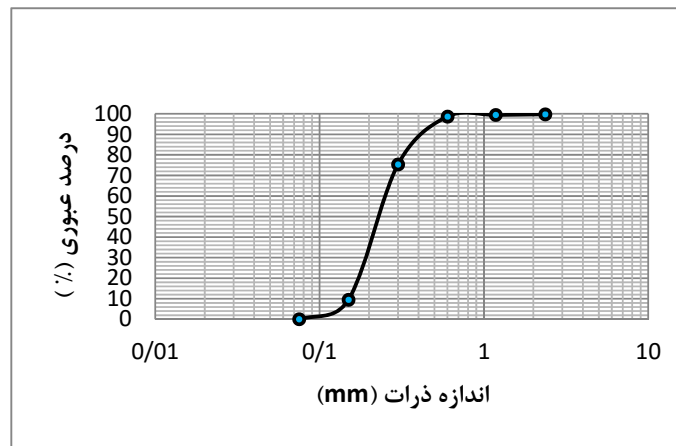
با استفاده از روابط زیر وزن مصالح، درصد مانده روی هر الک و درصد ذرات عبوری از آن‌ها محاسبه شد.

$$\text{وزن الک} - \text{وزن مصالح با الک} = \text{وزن مصالح} \quad (۱-۳)$$

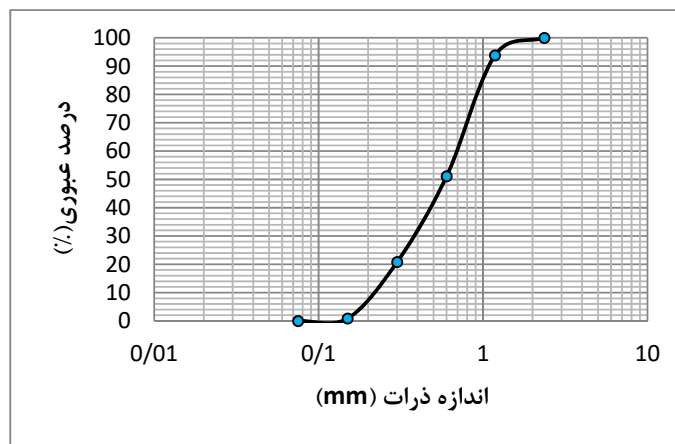
$$\text{درصد مانده روی هر الک} = \frac{\text{وزن مصالح مانده روی هر الک}}{\text{وزن کل نمونه}} \times ۱۰۰ \quad (۲-۳)$$

$$\text{درصد مانده روی هر الک} - ۱۰۰ = \text{درصد ذرات عبوری} \quad (۳-۳)$$

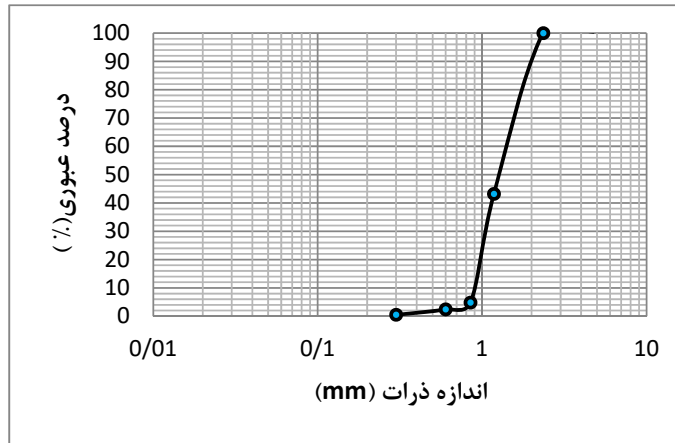
در نمودار دانه‌بندی محور افقی اندازه قطر الک‌ها (مقیاس لگاریتمی) برحسب میلی‌متر و محور عمودی درصد ذرات عبوری از هر الک (مقیاس حسابی) را نشان می‌دهد. از روی منحنی دانه‌بندی می‌توان نه تنها اندازه ذرات موجود در خاک، بلکه نوع توزیع اندازه ذرات را نیز نشان داد و برای تعیین اندازه موثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی خاک از آن بهره جست. (طاحونی، ۱۳۸۵). شکل‌های ۳-۳، ۳-۴ و ۳-۵ منحنی دانه‌بندی سه نمونه مصالح به کاررفته در پی مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که به ترتیب دارای قطر  $0/2$ ،  $0/6$  و  $1/2$  میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی  $0/2$  میلی‌متر



شکل ۳-۴- منحنی دانه‌بندی  $0/6$  میلی‌متر



شکل ۳-۵- منحنی دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر

### ۳-۳- ضریب نفوذپذیری (ضریب هدایت هیدرولیکی)

به سرعت تراوش آب از سطح مقطع واحد تحت اثر شیب هیدرولیکی واحد گویند و پارامتری است که میزان نفوذپذیری خاک را بیان می‌کند و برحسب  $\frac{m}{s}$  بیان می‌شود. روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین هدایت هیدرولیکی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش اندازه‌گیری با بار ثابت و روش اندازه‌گیری با بار افتان اشاره کرد. آزمایش با بار ثابت معمولاً برای تعیین ضریب نفوذپذیری ماسه‌ها و خاک‌های با نفوذپذیری بالا و مصالح زهکشی به کار می‌رود. در صورتی که نفوذپذیری خاک کم باشد، زمان انجام آزمایش با بار ثابت طولانی می‌شود و تبخیر آب در نتایج آزمایش تاثیرگذار خواهد بود. در این تحقیق با توجه به دانه‌بندی ذرات خاک از آزمایش بار ثابت برای تعیین هدایت هیدرولیکی استفاده گردید. شکل ۳-۶- نمایی از مدل آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶- نمایی از مدل آزمایشگاهی ضریب نفوذپذیری با بار ثابت

در نهایت با انجام آزمایش بار ثابت مقادیر ضرایب هیدرولیکی برای سه دانه‌بندی ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر به صورت جدول ۳-۱ به دست آمد.

جدول ۳-۱- ضریب هدایت هیدرولیکی سه لایه خاک

۱/۲	۰/۶	۰/۲	اندازه متوسط ذرات خاک (mm)
۰/۰۰۱۲۰۴	۰/۰۰۰۵۵۱	۰/۰۰۰۲۴۵	ضریب هدایت هیدرولیکی ( $\frac{m}{s}$ )

### ۳-۴- مواد و مصالح

۱- مصالح کف مخزن نشت ۲- مصالح زهکش ۳- مصالح پی سد

مصالح کف مخزن نشت، یک‌لایه خاک رس با ضریب آبگذری بسیار کم به ضخامت ۴ سانتی‌متر برای جلوگیری از فرار آب از سطح بین خاک و کف مخزن و ایجاد بستر غیرقابل نفوذ در کف فلوم قرار گرفت. مصالح زهکش، مخلوطی از شن و سنگریزه می‌باشند که درون مخزن نشت حدفاصل شبکه‌های توری و مصالح پی قرار گرفته‌اند و دلیل استفاده از این مصالح، عدم شسته شدن و حرکت مواد ریزدانه



به درون مخزن‌های فلوم است. مصالح پی سد، مصالحی با دانه‌بندی ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر هستند که درون تانک نشت قرار گرفته و تشکیل پی سد را می‌دهند.

### ۳-۵- بدنه سد و پرده آب‌بند

بدنه سد دارای طول ۴۵، عرض ۵۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر است که از شیشه ۶ میلی‌متری به شکل ذوزنقه ساخته شد. پرده‌های آب‌بند نیز از شیشه ۶ میلی‌متری با سه طول ۴/۵، ۹ و ۱۳/۵ سانتی‌متر ساخته شد.

### ۳-۶- مخزن نشت و نفوذ<sup>۱</sup>

مدل آزمایشگاهی مخزن نشت و نفوذ به شکل مکعب مستطیل با ابعادی به طول ۱۸۵ سانتی‌متر، عرض ۵۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. در جداره‌های فلوم از ورق‌های پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده گردید. پیزومترهای فلوم در ۹ ردیف پانزده‌تایی با فاصله ۱۱ سانتی‌متر و در مجموع ۱۳۵ پیزومتر روی جداره تعبیه شده است. برای آزمایش پنج ردیف پیزومتر در نظر گرفته شد که در مجموع تعداد ۷۵ پیزومتر در پنج تراز قائم ۸/۳، ۱۵/۳، ۲۲/۵، ۲۹/۴ و ۳۶/۵ سانتی‌متری از کف به‌منظور قرائت پتانسیل فشاری مورد استفاده قرار گرفت. درون هر پیزومتر توری نصب شده است که فقط اجازه ورود آب از داخل فلوم به لوله پیزومتر را می‌دهد. در دو طرف تانک دو مخزن آب قرار دارد که در زیر آن‌ها شیرهایی جهت تخلیه آب به مخزن ذخیره قرار دارد. دو لوله تنظیم تراز آب در مخزن بالادست و پایین‌دست وجود دارد که به مخزن ذخیره آب متصل هستند. روی هر کدام از مخزن‌ها خط کش مدرجی جهت نشان دادن ارتفاع تراز آب برحسب میلی‌متر چسبانده شد. شبکه

---

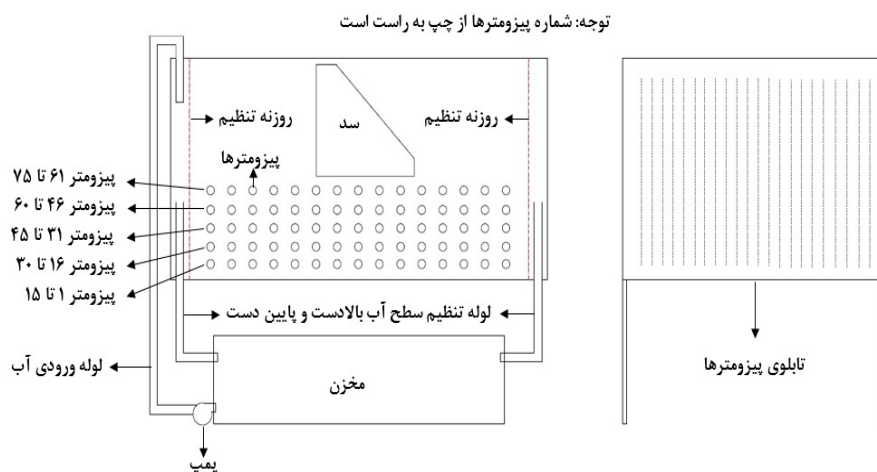
<sup>۱</sup>-Seepage and drainage tank

توری با شماره ۱۵۰ در حدفاصل مخازن و تانک قرار گرفته است که از شسته شدن مصالح به مخزن بالادست و پایین دست جلوگیری می کند. سیستم جریان آب در فلوم چرخشی بوده و یک الکتروپمپ با قدرت ۰/۵ اسب بخار آب را از مخزن ذخیره توسط لوله به مخزن بالادست هدایت می کند. به منظور قرائت پیزومترها از تابلوی پیزومتری مدرج استفاده گردید. شکل ۳-۷ تانک نشت و زهکش را به همراه تابلوی پیزومتری نشان می دهد.



شکل ۳-۷- مخزن نشت و تابلو پیزومتری استفاده شده برای آزمایش های مختلف

شکل ۳-۸ تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و تابلو پیزومتری را به همراه معرفی بخش های مختلف آن نشان می دهد.



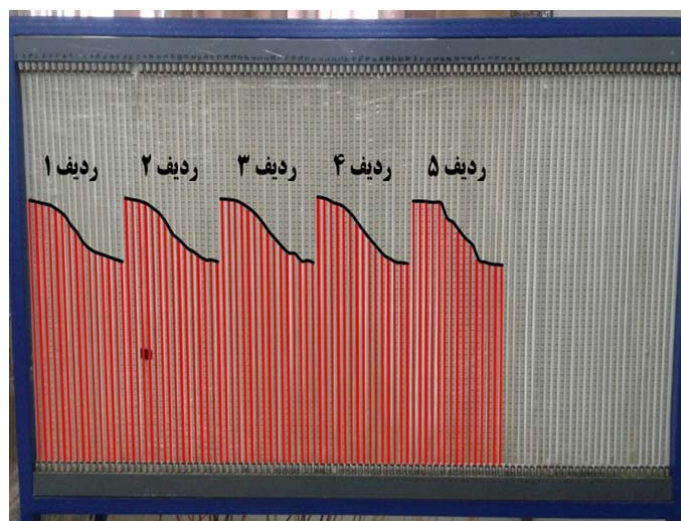
شکل ۳-۸- تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و تابلوی پیزومتری

### ۳-۷- آماده‌سازی مخزن نشت و نفوذ

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. ابتدا در کف مخزن خاک رس ریخته شده و مصالح زهکش در بالادست و پایین‌دست مخزن قرار گرفتند. سپس مصالح پی بر روی خاک رس قرار گرفت و لایه به لایه فشرده‌سازی تا ارتفاع ۳۹۰ میلی‌متر انجام شد. در انتها سطح پی مورد نظر را با کاردک صاف و تراز نمودیم. برای انجام آزمایش ابتدا مصالح پی بایستی اشباع گردد به همین منظور با روشن نمودن دستگاه و بالا دادن لوله‌های ورودی و خروجی شیر مخزن بالادست باز گذاشته شد تا پی به تدریج از آب اشباع شود و سطح آب بالاتر از سطح پی قرار گیرد. پس از اشباع پی، با پایین آوردن لوله‌های مخزن بالادست و پایین‌دست آب داخل مخزن نشت تخلیه شد. با گذشت زمان پی کمی نشست کرده، هنگامی که سطح پی کمی خشک شد تا تراز مورد نظر مصالح بر روی آن ریخته شده، تراکم و تسطیح پی دوباره انجام شد. بدنه سد در حدفاصل پیزومترهای شماره ۶۵ تا ۷۱ بر روی پی قرار گرفت و دورتادور محل اتصال بدنه سد با جداره‌های فلوم چسب زده شد.

### ۳-۸- نحوه انجام آزمایش با تانک نشت و نفوذ

ابتدا لوله‌های مخازن بالادست و پایین‌دست در تراز ۳۹۰ میلی‌متر تنظیم شدند. سپس دستگاه را روشن نموده تا ارتفاع آب به تراز ۳۹۰ میلی‌متر در مخزن‌های بالادست و پایین‌دست برسد. وقتی که سطح آب به تراز موردنظر رسید لوله‌های پیژومتری بالای تابلو از محل خود جدا شدند. آب درون لوله‌های پیژومتری جریان یافت و هواگیری پیژومترها به کمک خم کردن تابلوی پیژومتریک انجام گرفت. با فرارگیری لوله‌های پیژومتری در محل خود آب تا ارتفاع معینی بالا رفت. لازم به ذکر است که پس از برقراری حالت آرام و ماندگاری جریان، مقادیر فشار پیژومتری برای پیژومترهای مختلف از روی تابلو پیژومتری قرائت و برداشت گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان از روش حجمی که دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری جریان است، استفاده شد. با به‌کارگیری استوانه مدرج و کرنومتر میزان آب خروجی در چند نوبت زمانی اندازه‌گیری و برداشت شد و متوسط آن‌ها به‌منزله دبی نشت بر حسب میلی‌لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد هد آب بالادست ۲ سانتی‌متر افزایش یافته و هد پایین‌دست در تراز مورد نظر ثابت بود. رقوم پیژومترهای تابلو و دبی نشت نیز جداگانه برداشت شد. بنابراین تراز آب بالادست نسبت به تراز قبلی در هر مرحله تراز آب بالادست ۲ سانتی‌متر افزایش داده شد و تراز آب را تا جایی بالا بردیم که زیرشویی در زیر سد اتفاق افتاد. سپس رقوم پیژومترهای بحرانی (پیژومترهای ۶۶ تا ۷۰) در زیر بدنه سد از روی تابلو پیژومتری برداشت شد. دستگاه را خاموش نموده و با پایین آوردن لوله‌های مخزن بالادست و پایین‌دست آب داخل آن‌ها تخلیه شد. برای سهولت در قرائت پیژومترها از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم استفاده شد. شکل ۳-۹ نمایی از پیژومترها بر روی تابلو پیژومتری را نشان می‌دهد که ردیف ۱ پیژومترهای کف تانک نشت و ردیف ۵ پیژومترهای سطح آن را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۹- نمایی از پیزومترها بر روی تابلو پیزومتری

شکل ۳-۱۰- نمایی از تخریب پی در پایین دست (پنجه) سد بر اثر پدیده زیرشویی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰- نمایی از تخریب پی در پایین دست سد بر اثر پدیده زیرشویی

### ۳-۹- نحوه قرارگیری لایه‌های خاک در پی سد

برای پی‌های یک‌لایه، دولایه و سه‌لایه با توجه به دانه‌بندی ذرات ( $0.2$ ،  $0.6$  و  $1.2$  میلی‌متر) به‌طور جداگانه آزمایش انجام شد. برای آرایش یک لایه دانه‌بندی تمام مصالح پی (پیزومترهای شماره ۷۵-۱) یکسان بود و ضخامت پی ( $39$  سانتی‌متر) در نظر گرفته شد.

برای پی با آرایش دولایه سه ردیف پیزومتر زیر سد (شماره ۳۱-۷۵) را لایه اول و دو ردیف پیزومتر کف فلوم (شماره ۱-۳۰) را لایه دوم تشکیل می‌دهند که ضخامت هر لایه تقریباً نصف کل ضخامت پی (۱۹/۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. برای پی با آرایش سه لایه دو ردیف زیر سد (شماره ۴۶-۷۵) را لایه اول، یک ردیف پیزومتر میانی (شماره ۳۱-۴۵) را لایه دوم و دو ردیف پیزومتر کف فلوم (شماره ۱-۳۰) را لایه سوم تشکیل می‌دهند که ضخامت هر لایه ۱۳ سانتی‌متر بود.

### ۳-۱۰- انواع آزمایش‌های انجام شده با مخزن نشت و نفوذ

برای پی‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه با توجه به دانه بندی ذرات (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر) به تعداد ۱۸۰ مرحله داده آزمایشگاهی در موقعیت‌های مختلف پرده آب بند و هدهای پایین دست برداشت گردید. جداول ۲-۳ و ۳-۳ آزمایش‌های انجام شده برای پی‌های همگن و غیر همگن را در آرایش‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳- آزمایش‌های انجام شده برای پی همگن در آرایش‌های یک لایه

نوع پی	آرایش لایه‌ها (mm)	اندازه پرده آب بند (cm)	هد پایین دست (mm)
همگن	} یک لایه	بدون پرده آب بند	۱۳۵
		۰.۲	۲۵۵
		۰.۶	۳۹۰
		۱.۲	

جدول ۳-۳- آزمایش‌های انجام شده برای پی غیر همگن در آرایش‌های دو لایه و سه لایه

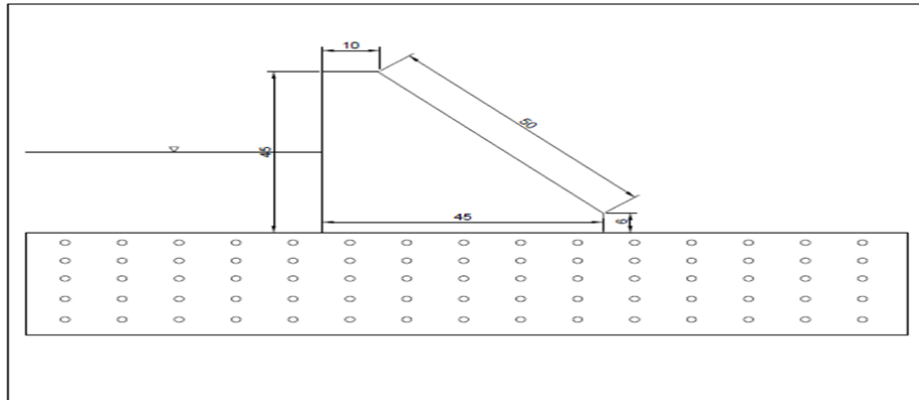
نوع پی	آرایش لایه ها (mm)	اندازه پرده آب بند (cm)	هد پایین دست (mm)
غیر همگن	دو لایه	بدون پرده آب بند	۱۳۵
		۰.۲-۰.۶	
		۰.۲-۱.۲	۴.۵
		۰.۶-۰.۲	۹
		۰.۶-۱.۲	۱۳.۵
		۱.۲-۰.۲	
	سه لایه	۱.۲-۰.۶	
		۰.۲-۰.۶-۱.۲	
		۰.۲-۱.۲-۰.۶	
		۰.۶-۰.۲-۱.۲	
		۰.۶-۱.۲-۰.۲	
		۱.۲-۰.۲-۰.۶	
		۱.۲-۰.۶-۰.۲	

### ۳-۱۱- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های یک لایه

برای آرایش‌های یک لایه با دانه‌بندی مختلف (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر)، نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در حالت بدون پرده آب‌بند نشان داده شده است (شکل ۳-۱۱). لازم به ذکر است که

واحد اعداد اشاره شده در شکل‌های شماتیک مدل آزمایشگاهی آرایش‌های یک لایه، دو لایه و سه

لایه بر حسب سانتی‌متر هستند

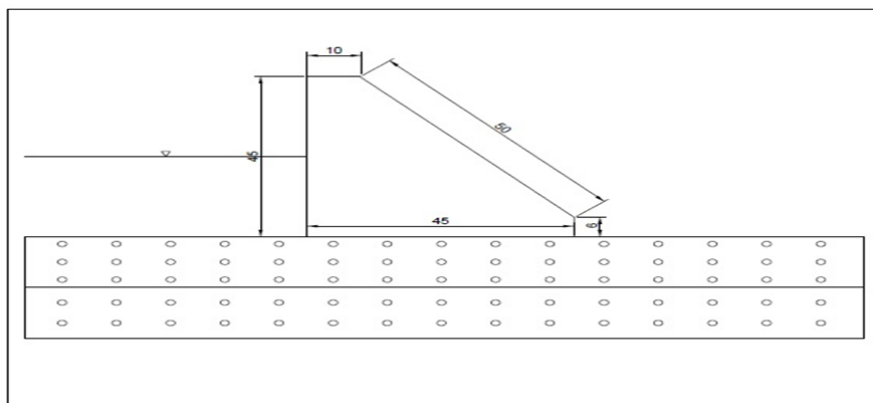


شکل ۳-۱۱- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش یک‌لایه بدون پرده آب‌بند

### ۳-۱۲- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های دولایه

با توجه به سه نوع دانه‌بندی ذرات (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر) نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی

آرایش‌های دولایه در حالت بدون پرده آب‌بند نشان داده شده است (شکل ۳-۱۲).

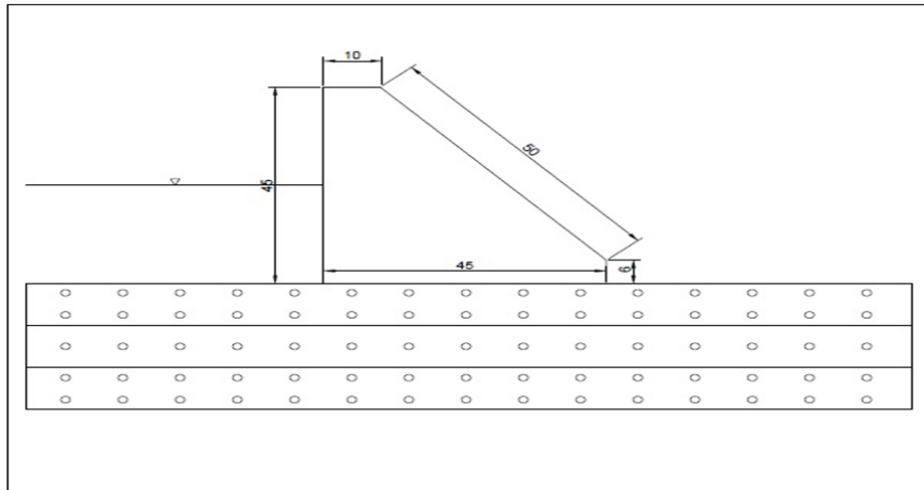


شکل ۳-۱۲- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش دولایه بدون پرده آب‌بند



### ۳-۱۳- مدل آزمایشگاهی آرایش‌های سه لایه

با توجه به سه نوع دانه‌بندی ذرات (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر) نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی آرایش‌های سه لایه در حالت بدون پرده آب‌بند نشان داده شده است (شکل ۳-۱۳).



شکل ۳-۱۳- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در پی با آرایش سه لایه بدون پرده آب‌بند



فصل چہارم

نتائج و بحث

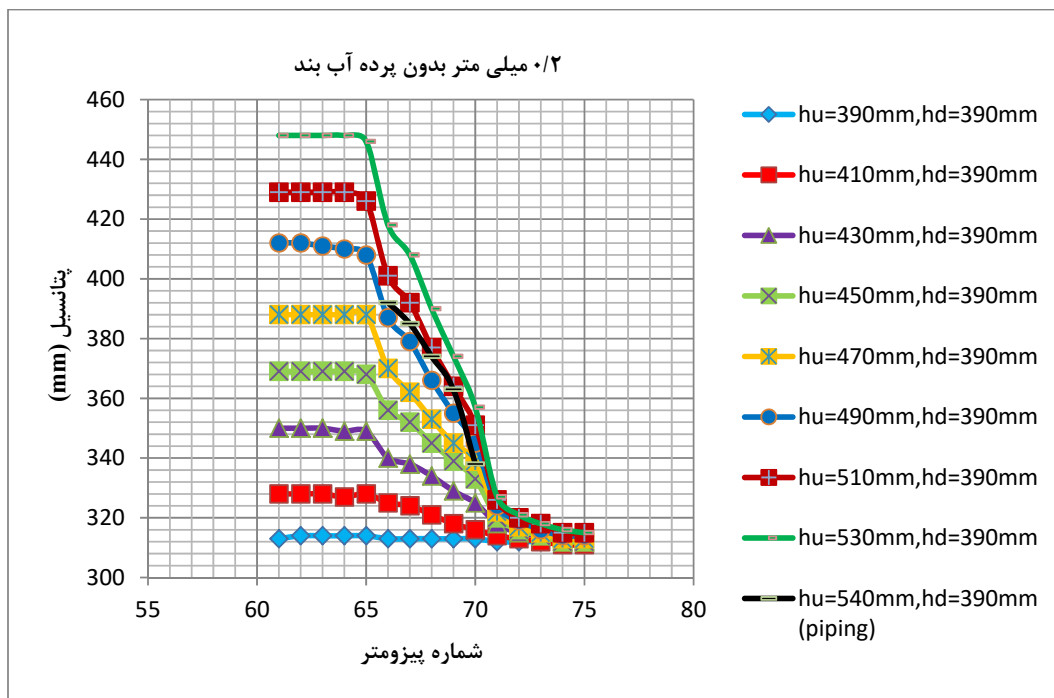
## ۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از تحقیق در آرایش‌های مختلف خاک بر روی پتانسیل هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت از پی مطبق آورده شده است.

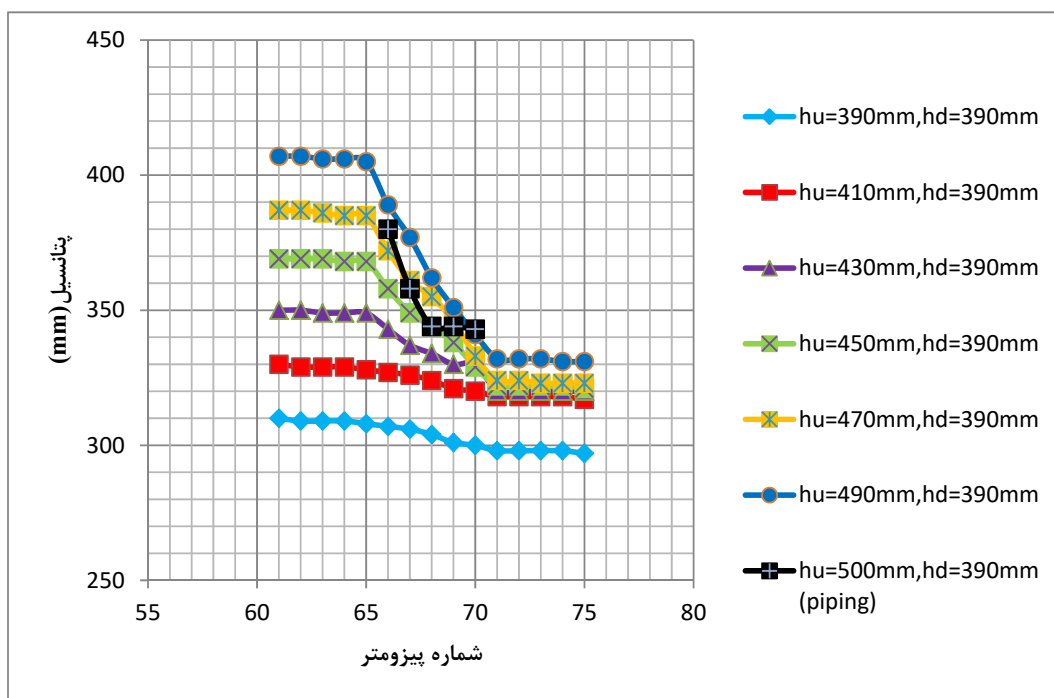
## ۴-۲- پتانسیل هیدرولیکی

### ۴-۲-۱- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های یک لایه

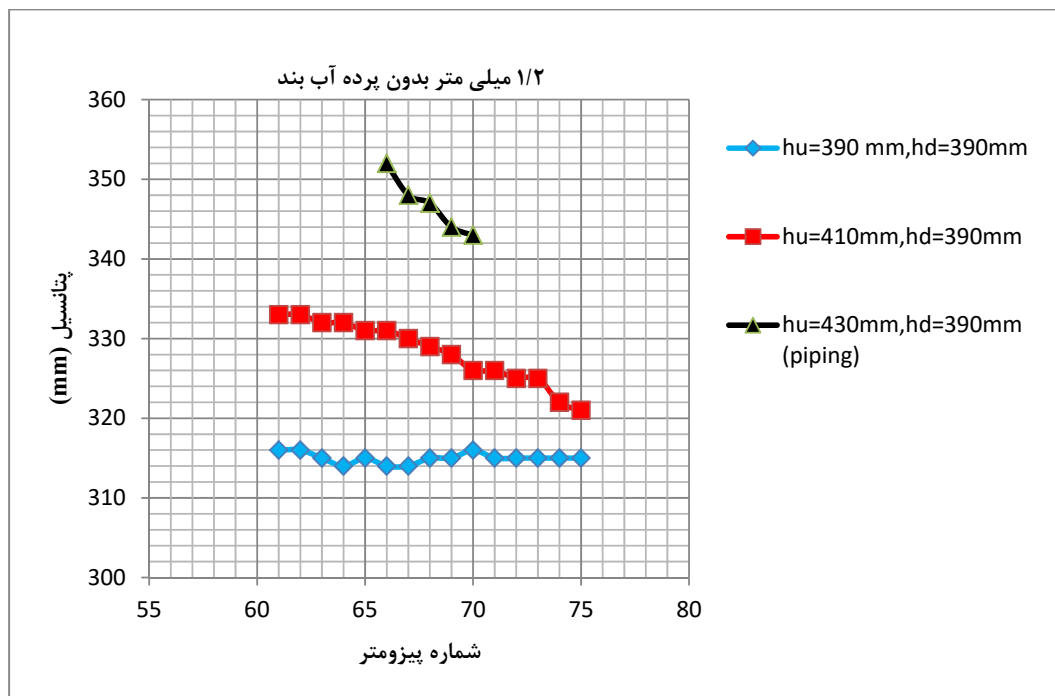
شکل‌های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ تغییرات پتانسیل را در طول لایه زیر سد به ازای هد پایین‌دست ۳۹۰ میلی‌متر برای پی یک‌لایه با دانه‌بندی ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر در حالت بدون پرده آب‌بند نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل‌های فوق نشان می‌دهند به ازای هدهای بالادست کم، تغییرات زیادی در مقدار پتانسیل مشاهده نشد. برای یک هد ثابت با رسیدن جریان به زیر سد (پیزومتر ۶۶) با حرکت افقی جریان در داخل پی مقدار پتانسیل کاهش یافت. این روند برای هدهای مختلف در زیر سد یکسان بود و با افزایش هد بالادست مقدار افت پتانسیل در قسمت زیر سد افزایش یافت. در این شرایط برای آرایش‌های ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۵۴۰، ۵۰۰ و ۴۳۰ میلی‌متر در پایین‌دست سد جوشش اتفاق افتاد، در این شرایط شیب افت پتانسیل در زیر سد ماکزیمم بود. همان‌طور که مشخص است هر چه ذرات ریز شوند مقاومت در مقابل جوشش بیشتر شده و وقوع آن به ازای هد بالادست بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۲ میلی متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی متر، بدون پرده آب بند



شکل ۴-۲- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۶ میلی متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی متر، بدون پرده آب بند



شکل ۳-۴- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲ میلی متر و هد پایین دست ۳۹۰ میلی متر، بدون پرده آب بند

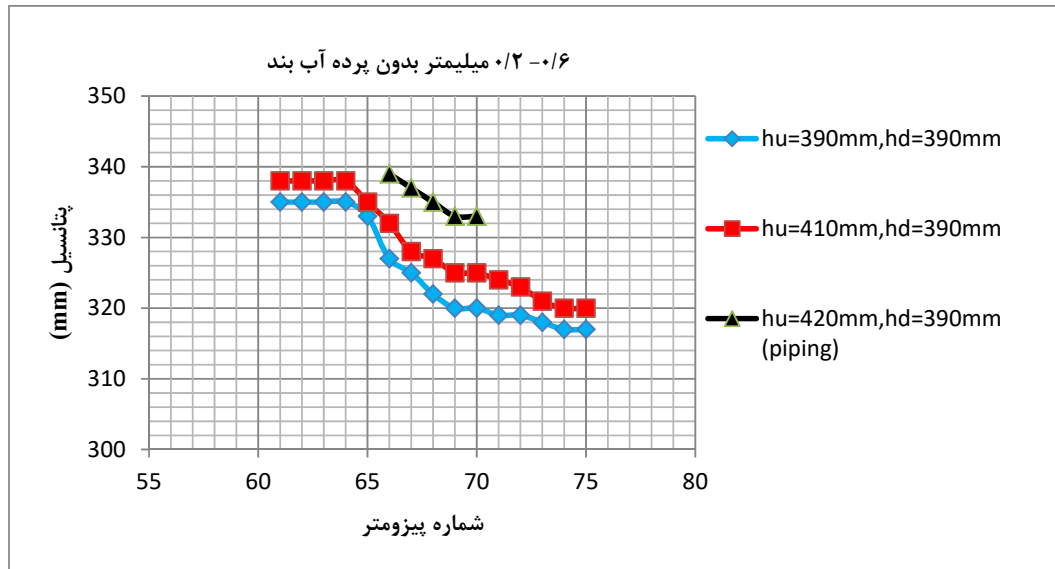
#### ۴-۲-۲- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های دولایه

با توجه به سه نوع دانه‌بندی ذرات (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر)، ۶ نوع آرایش برای پی‌های دولایه وجود دارد. ضخامت هر لایه تقریباً نصف کل ضخامت پی (۱۹/۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که ترتیب دانه‌بندی ذرات در آرایش‌های دولایه و سه لایه در داخل متن و بالای نمودارها از سمت چپ به سمت راست است.

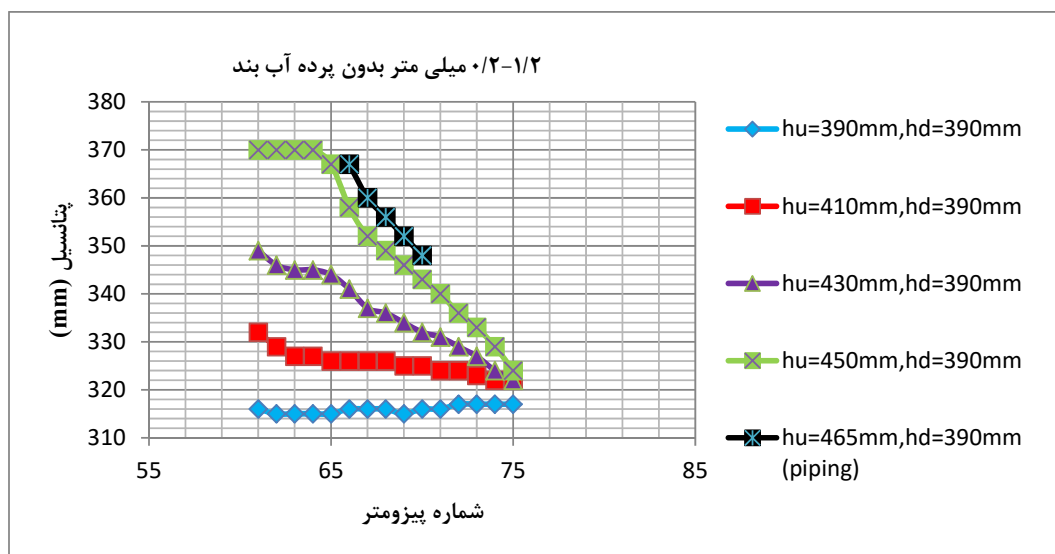
#### آرایش ۰/۶-۰/۲ و ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر

نتایج این قسمت در شکل ۴-۴ و ۴-۵ آمده است در شرایطی که لایه دوم پی درشت‌دانه‌تر باشد، جریان پس از ورود به لایه دوم، بیشتر به واسطه حرکت افقی از این لایه خارج شده و کمتر به سمت پنجه منحرف شده است که نتیجه آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه سد بود، به همین علت جوشش در هد بالاتری اتفاق افتاد. به طوری که برای لایه دوم با دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر، عملکرد در

کاهش پتانسیل نسبت به دانه‌بندی  $0/6$  میلی‌متر بهتر بود. برای آرایش  $0/2 - 0/6$  میلی‌متر در هد بالادست  $420$  میلی‌متر و برای آرایش  $0/2 - 1/2$  میلی‌متر در هد بالادست  $465$  میلی‌متر پدیده جوشش اتفاق افتاد. شکل‌های  $4-4$  و  $5-4$  تغییرات پتانسیل را برای دو آرایش  $0/2 - 0/6$  و  $0/2 - 1/2$  میلی‌متر نشان می‌دهند.



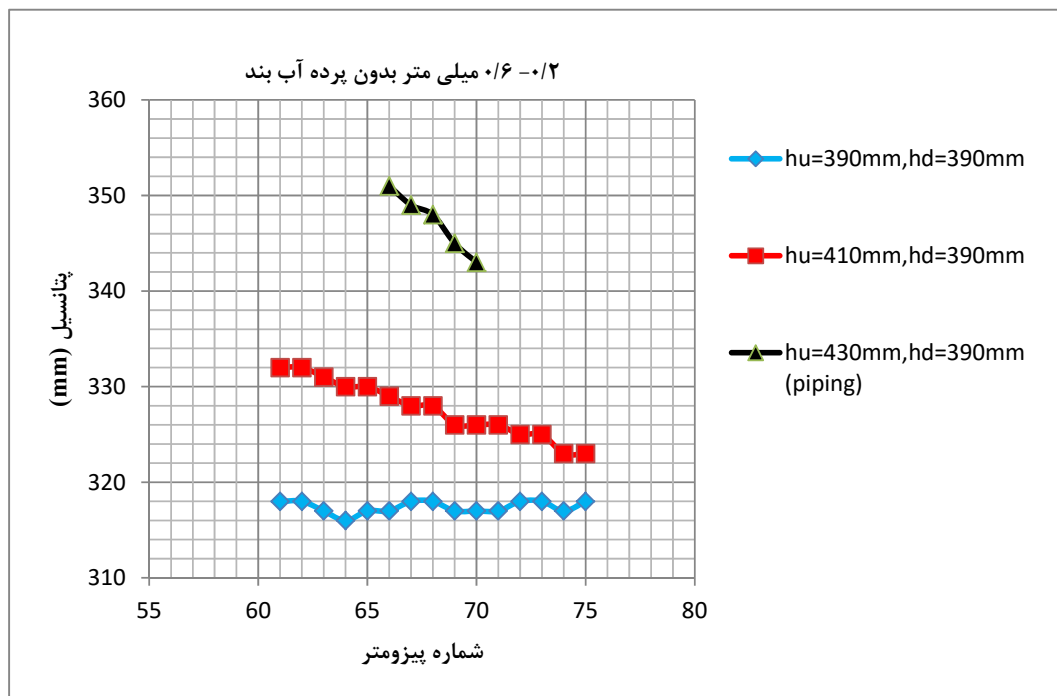
شکل ۴-۴ - تغییرات پتانسیل آرایش  $0/2 - 0/6$  میلی‌متر، بدون پرده آب بند



شکل ۵-۴ - تغییرات پتانسیل آرایش  $0/2 - 1/2$  میلی‌متر، بدون پرده آب بند

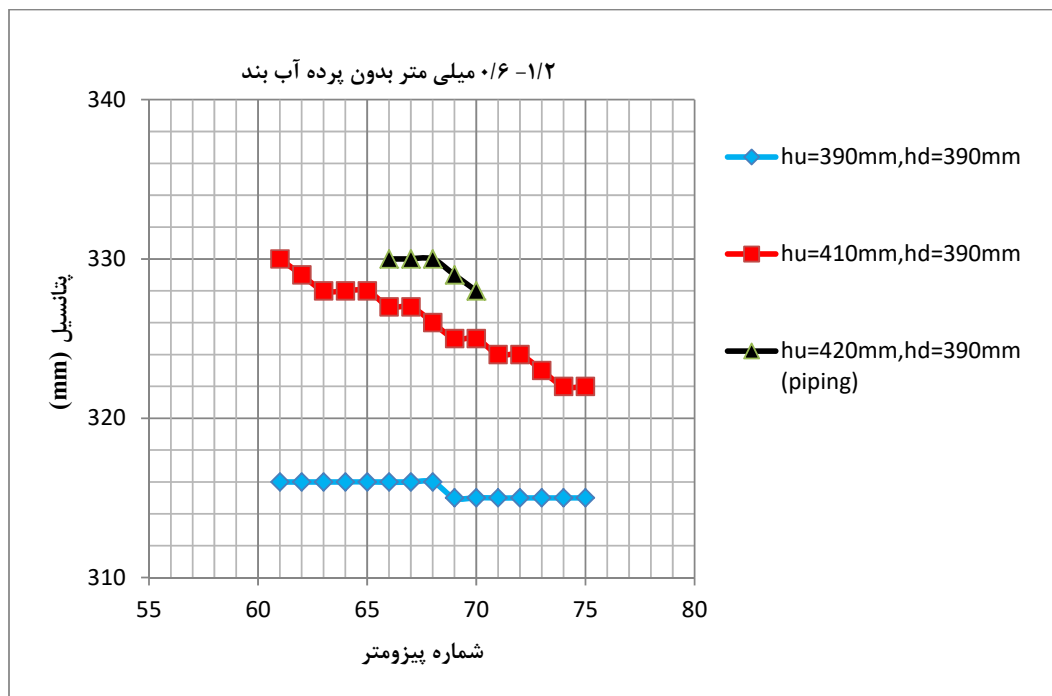
### آرایش ۰/۲ - ۰/۶ و ۱/۲ - ۰/۶ میلی متر

همان طور که در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ مشخص است در این شرایط برای هدهای بالادست کم، روند تغییرات پتانسیل برای هر دو آرایش تقریباً یکسان بود اما با افزایش هد بالادست در حالتی که دانه‌بندی لایه دوم ریزتر می‌باشد، مقدار افت انرژی در لایه دوم افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه می‌باشد. برای حالتی که لایه دوم درشت‌دانه است نیز به واسطه حرکت افقی جریان و خروج جریان از پی، از مقدار نیروی تراوش در قسمت پنجه کاسته خواهد شد. البته برای هر دو آرایش وزن مستغرق ذرات با دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر و چسبندگی ذرات در قسمت پنجه نیز به عنوان یک عامل تاثیرگذار در کنترل جوشش است. با توجه به مطالب فوق، برای آرایش ۰/۲ - ۰/۶ میلی‌متر و ۱/۲ - ۰/۶ میلی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۳۰ میلی‌متر و ۴۲۰ میلی‌متر پدیده جوشش اتفاق افتاد (شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷).



شکل ۴-۶- تغییرات پتانسیل آرایش ۰/۲ - ۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند

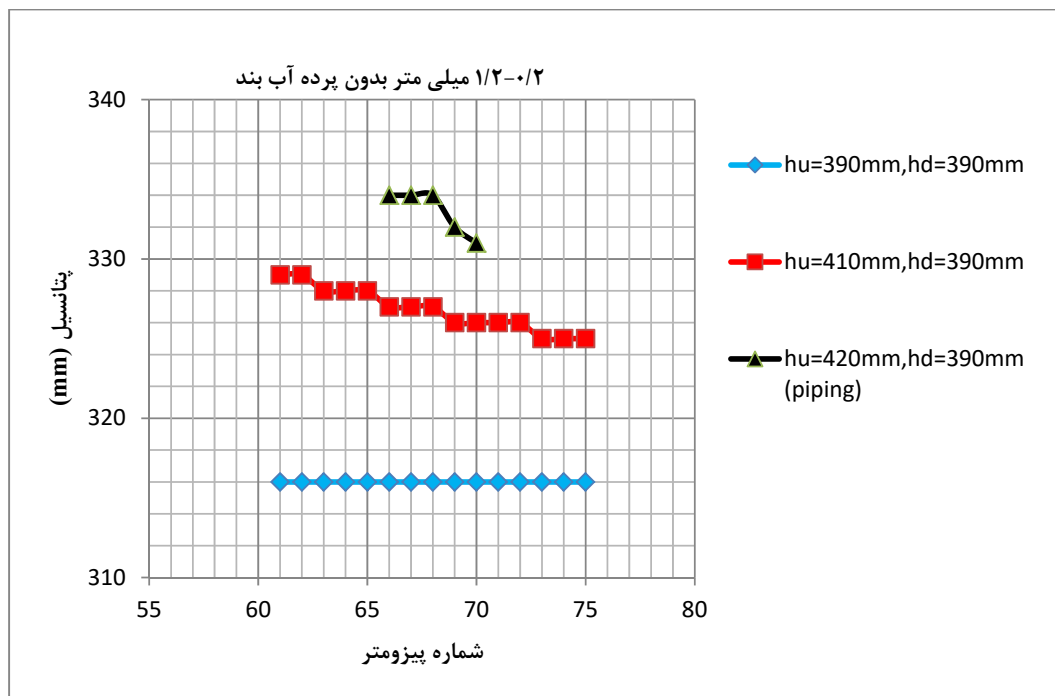




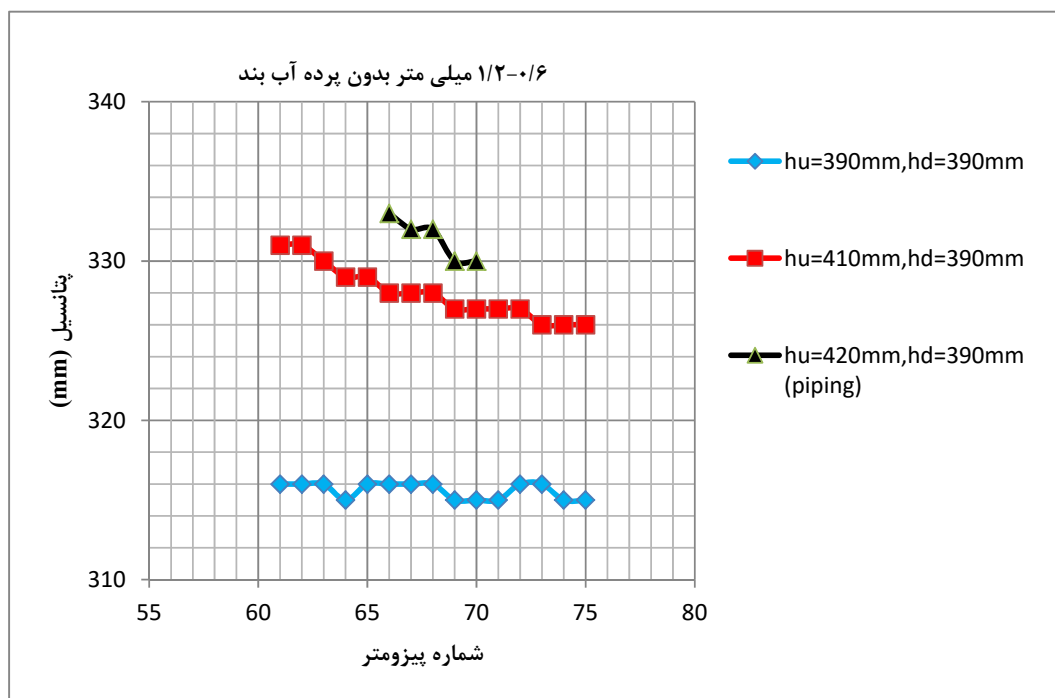
شکل ۴-۷- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲ - ۰/۶ میلی متر، بدون پرده آب بند

#### آرایش ۰/۲ - ۱/۲ و ۰/۶ - ۱/۲ میلی متر

در این حالت با توجه به این که لایه اول درشت دانه تر می باشد عملاً لایه دوم نقش زیادی در کاهش پتانسیل و کنترل پدیده جوشش ندارد به طوری که روند تغییرات پتانسیل برای دو آرایش مشابه بود و برای هر دو آرایش پدیده جوشش به ازای هد بالادست ۴۲۰ میلی متر اتفاق افتاد که دلیل آن را می توان حرکت سریع تر جریان در لایه اول (بالا بودن هدایت هیدرولیکی دانه بندی ۱/۲ میلی متر) و انرژی بیشتر آن در قسمت خروجی دانست. البته برای آرایش ۱/۲ - ۰/۶ میلی متر مقدار پتانسیل در زیر سد در مقایسه با آرایش ۱/۲ - ۰/۲ میلی متر کمی کمتر بود که دلیل آن را می توان خروج بیشتر جریان از لایه با دانه بندی ۰/۶ میلی متر در مقایسه با دانه بندی ۰/۲ میلی متر دانست. در هر دو آرایش وزن مستغرق ذرات با دانه بندی ۱/۲ میلی متر در قسمت پنجه، یک عامل مقاوم در برابر نیروی تراوش بود (شکل های ۴-۸ و ۴-۹).



شکل ۴-۸- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی متر، بدون پرده آب بند



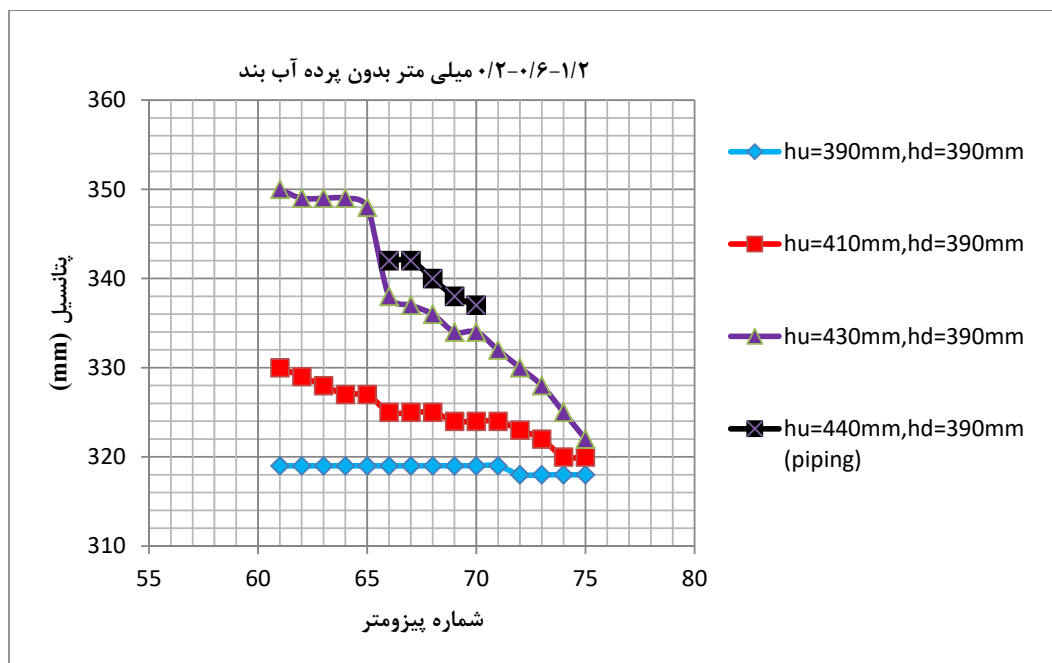
شکل ۴-۹- تغییرات پتانسیل آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی متر، بدون پرده آب بند

#### ۴-۲-۳- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در پی‌های سه لایه

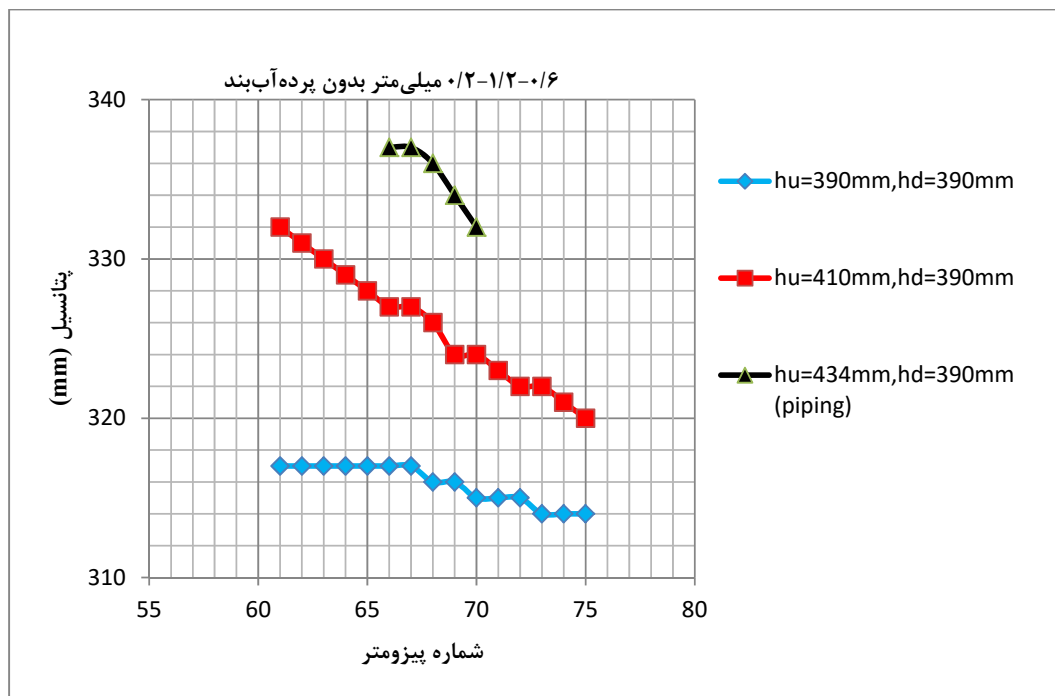
با توجه به سه نوع دانه‌بندی ذرات (۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر) و سه لایه مطبق، در مجموع ۶ آرایش ممکن است که ضخامت هر لایه ۱۳ سانتی‌متر بود.

#### آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر

در دو آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر، روند تغییرات پتانسیل تقریباً مشابه هم بود و پدیده جوشش برای آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۴۰ و ۴۳۴ میلی‌متر اتفاق افتاد. دلیل این اتفاق را می‌توان افت پتانسیل جریان به واسطه عبور از لایه اول و زهکشی افقی جریان در لایه دوم و سوم دانست که برای مدل با آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر این عملکرد بهتر بود، زیرا از سطح به کف با عبور جریان از داخل لایه‌ها، زهکشی و تخلیه بهتر صورت می‌گیرد که نتیجه آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه سد می‌باشد (شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱).



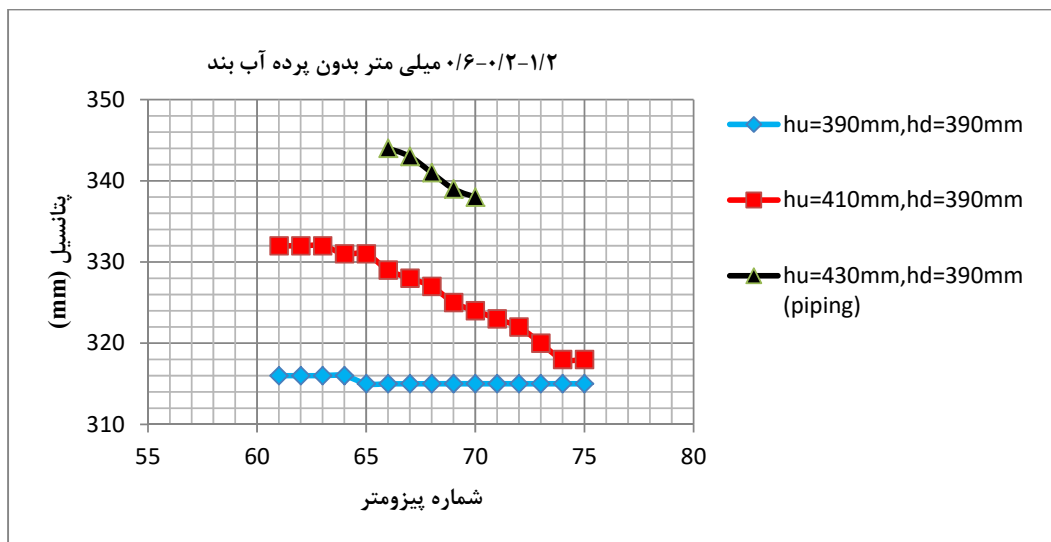
شکل ۴-۱۰- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند



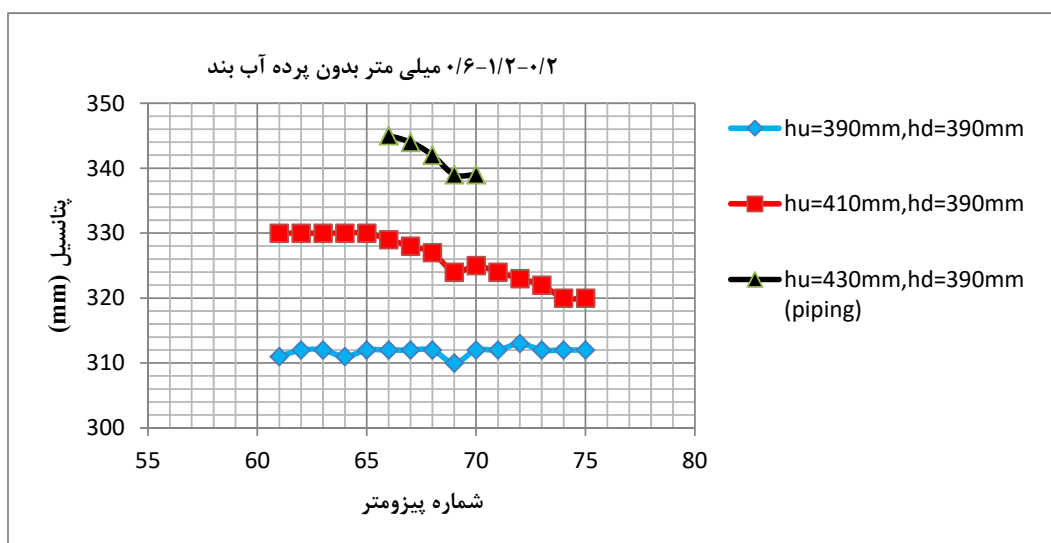
شکل ۴-۱۱- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند

#### آرایش ۰/۲-۱/۲-۰/۲ و ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی‌متر

برای آرایش ۰/۲-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر، قرار گرفتن دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر در لایه سوم سبب خروج بخشی از جریان از لایه سوم شده که کاهش نیروی تراوش را در قسمت خروجی به دنبال داشت. همچنین برای آرایش ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلی‌متر به واسطه وجود دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر در لایه دوم، بخشی از جریان خروجی از لایه دوم عبور کرده که نتیجه آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه بود. همان طور که در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ مشخص است برای دو آرایش ۰/۲-۱/۲-۰/۶ و ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلی‌متر روند تغییرات پتانسیل تفاوت چندانی با هم نداشت به طوری که برای هر دو آرایش پدیده جوشش به ازای هد بالادست ۴۳۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳).



شکل ۴-۱۲- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۰/۶-۰/۲-۰/۲ میلی متر، بدون پرده آب بند

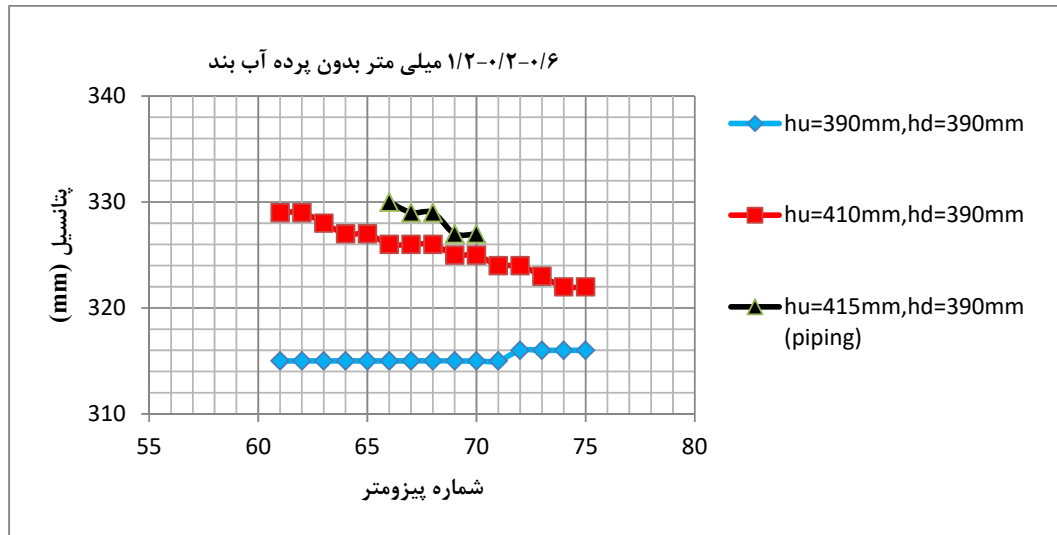


شکل ۴-۱۳- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۰/۶-۰/۲-۰/۲ میلی متر، بدون پرده آب بند

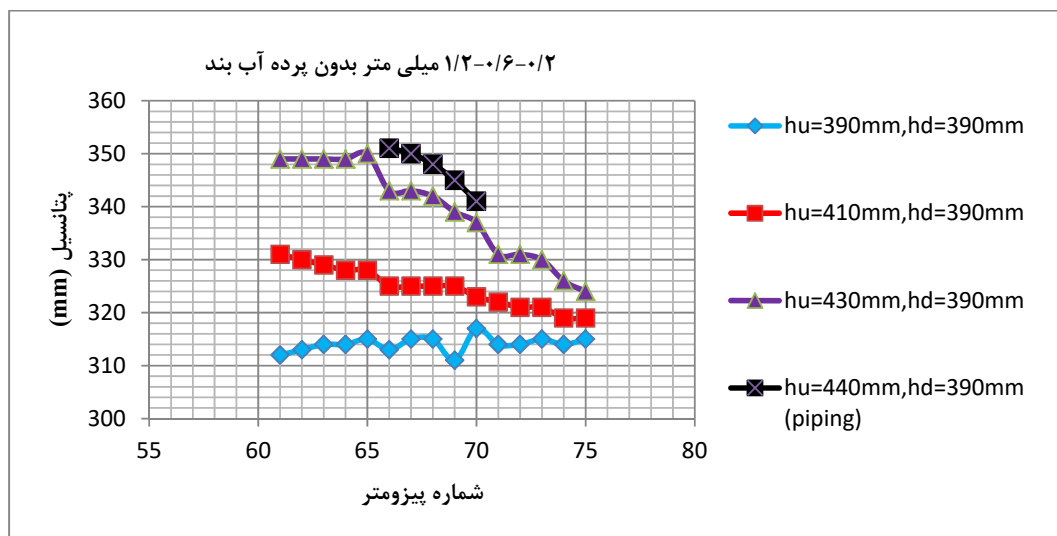
### آرایش ۰/۶-۰/۲-۰/۲ میلی متر و ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی متر

در آرایش ۰/۶-۰/۲-۰/۲ میلی متر، قرار گرفتن دانه بندی ۰/۲ میلی متر در لایه دوم سبب حرکت جریان بیشتر در لایه اول شده، که نتیجه آن افزایش نیروی تراوش در قسمت پنجه سد و افزایش احتمال وقوع پدیده جوشش است به طوری که در آرایش ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی متر، به ازای هد بالادست

۴۱۵ میلی‌متر جوشش رخ داد (شکل ۴-۱۴). اما در شرایطی که دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر در لایه دوم قرار دارد بخشی از جریان لایه اول از لایه دوم عبور کرده که سبب کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه سد شده است به طوری که در آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر پدیده جوشش در هد بالادست ۴۴۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل ۴-۱۵).



شکل ۴-۱۴- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۲-۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند

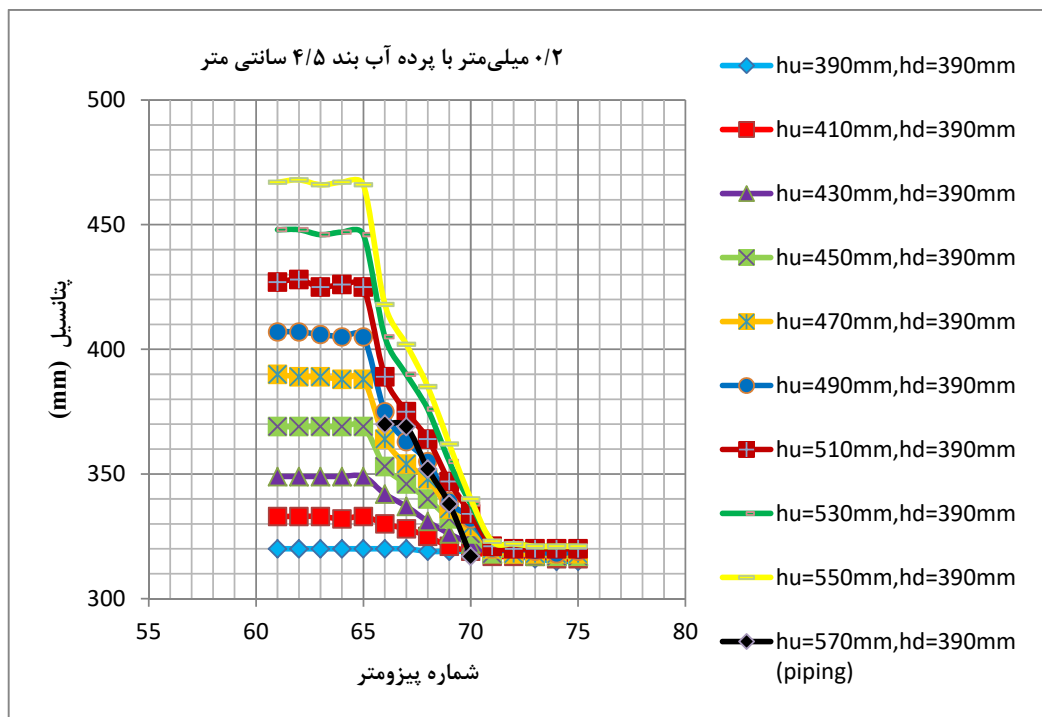


شکل ۴-۱۵- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۲-۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند

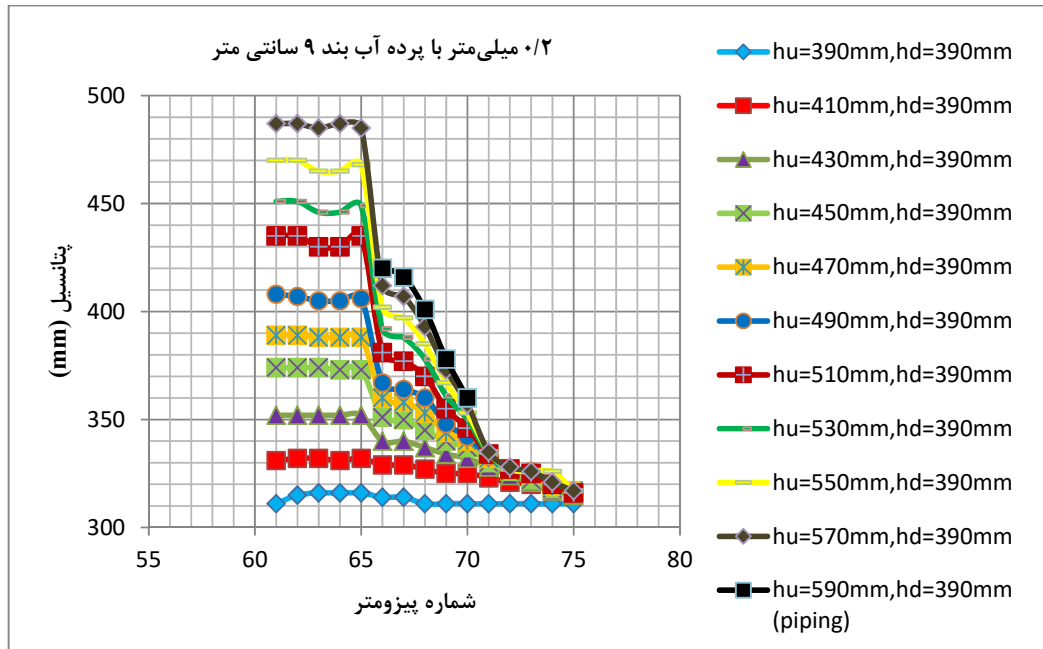
#### ۴-۲-۴- تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان در انواع آرایش با پرده

#### آببند

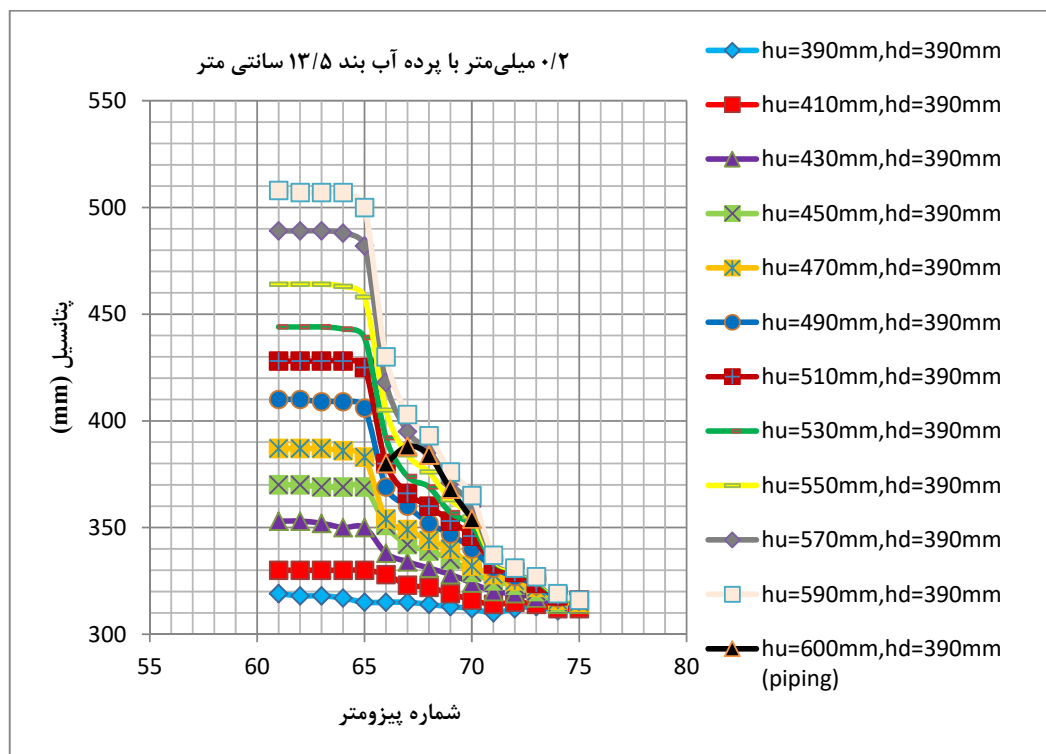
شکل‌های ۱۶-۴، ۱۷-۴ و ۱۸-۴ تغییرات پتانسیل را در طول لایه زیر سد به ازای هد پایین‌دست ۳۹۰ میلی‌متر برای آرایش یک‌لایه ۰/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۴/۵، ۹ و ۱۳/۵ سانتی‌متر نشان می‌دهند. پرده آب‌بند مسیر حرکت افقی جریان را به پایین‌دست منحرف کرده و جریان مسیر زیادتری را تا پایین‌دست طی می‌کند که سبب کاهش مقدار پتانسیل و به تاخیر افتادن پدیده جوشش می‌شود. در آرایش‌های یک‌لایه با پرده‌های آب‌بند ۴/۵، ۹ و ۱۳/۵ سانتی‌متر بهترین مدل در کنترل جوشش را می‌توان آرایش ۰/۲ میلی‌متر دانست که در این شرایط پدیده جوشش به ترتیب به ازای هد بالادست ۵۷۰، ۵۹۰ و ۶۰۰ میلی‌متر اتفاق افتاد.



شکل ۴-۱۶- تغییرات پتانسیل آرایش یک‌لایه ۰/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر



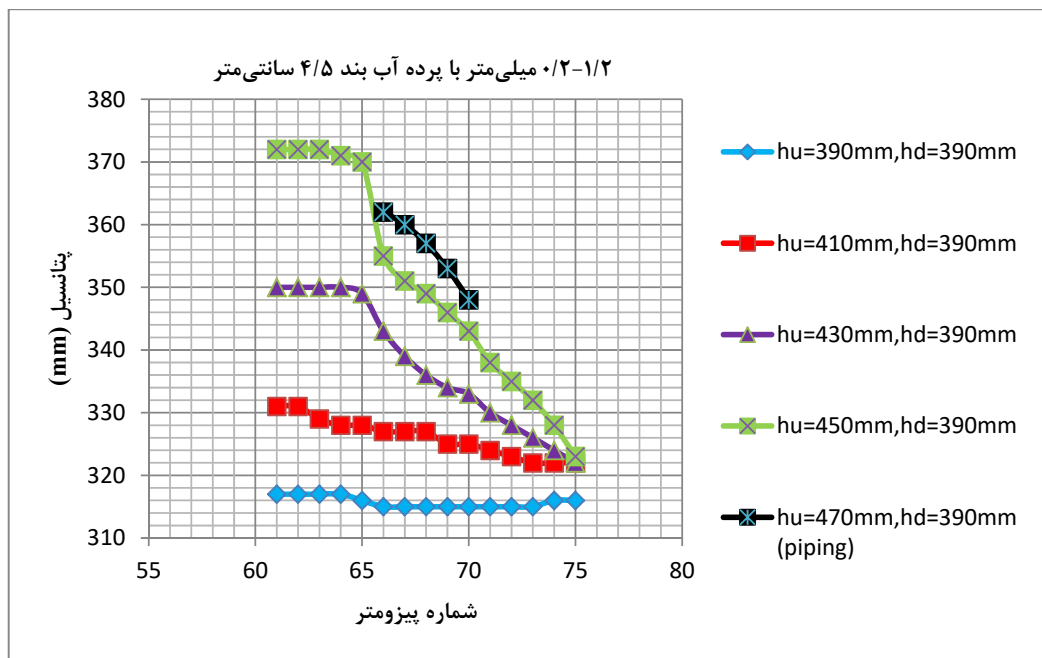
شکل ۴-۱۷- تغییرات پتانسیل آرایش یک لایه ۰/۲ میلی متر با پرده آب بند ۹ سانتی متر



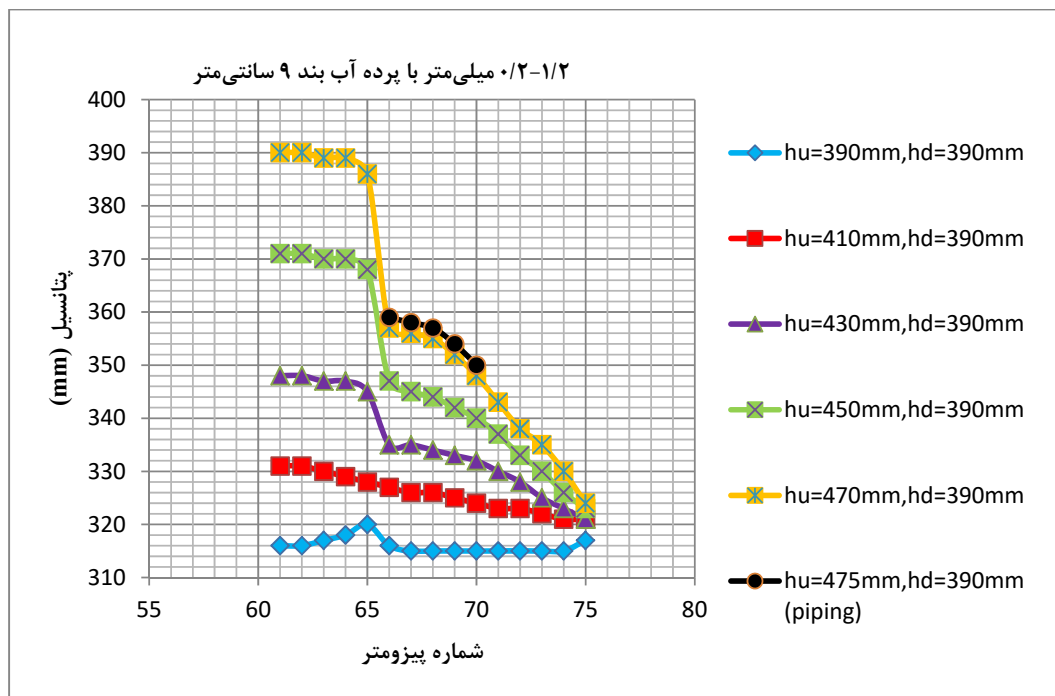
شکل ۴-۱۸- تغییرات پتانسیل آرایش یک لایه ۰/۲ میلی متر با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر



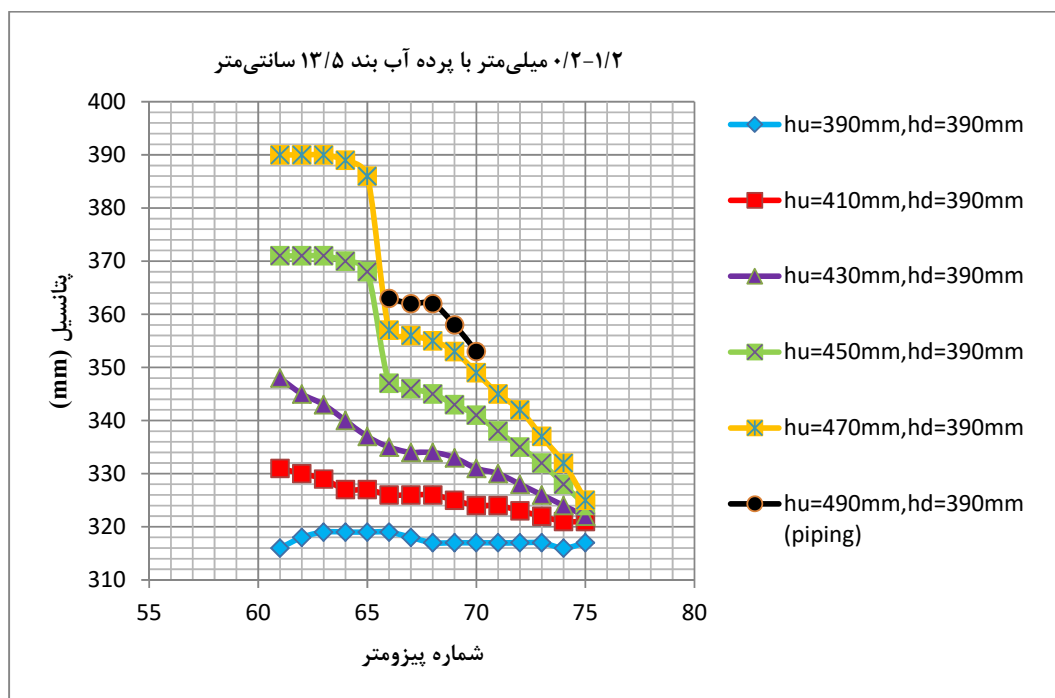
در آرایش‌های دولایه با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۳/۵ سانتی‌متر آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت. با توجه به این‌که طول پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر و ۹ سانتی‌متر ضخامت کمی از لایه اول را دربرمی‌گیرد و طول پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر بخش عمده‌ای از ضخامت لایه اول را شامل می‌شود بیشتر جریان از لایه ۱/۲ میلی‌متر عبور می‌کند و زهکشی و تخلیه بهتر صورت می‌پذیرد. همچنین پرده آب‌بند با افزایش طول مسیر جریان عبوری از داخل پی، مقدار پتانسیل را کاهش داده و سبب به تاخیر افتادن پدیده جوشش می‌شود. به طوری‌که پدیده جوشش برای آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر با پرده‌های آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۳/۵ سانتی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۷۰، ۴۷۵ و ۴۹۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل‌های ۴-۱۹، ۴-۲۰ و ۴-۲۱).



شکل ۴-۱۹- تغییرات پتانسیل آرایش دولایه ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر

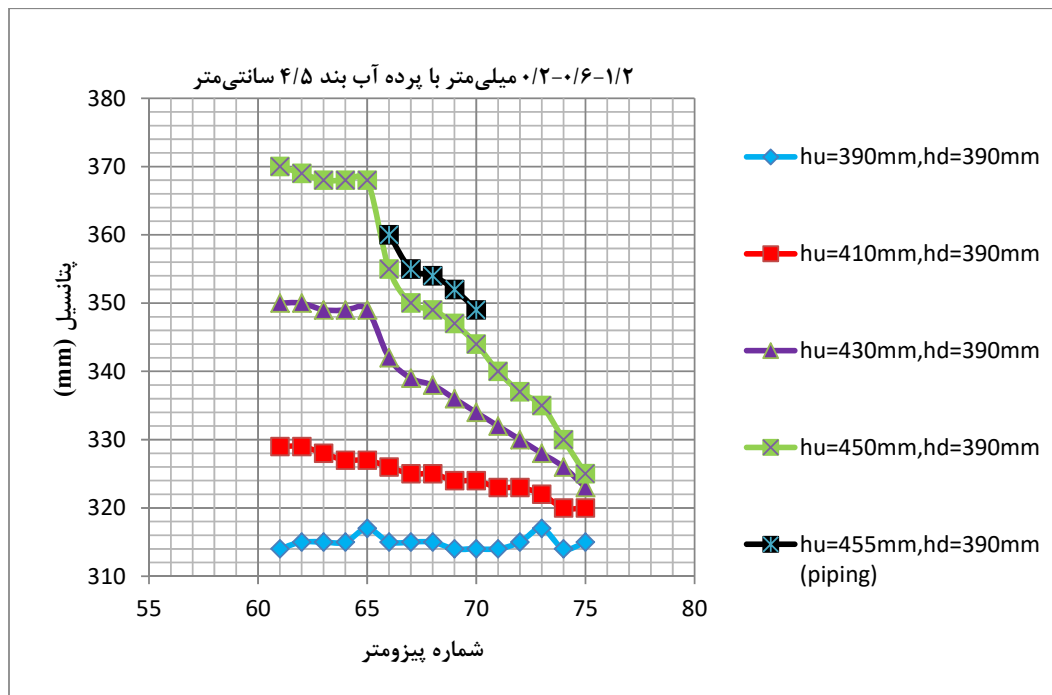


شکل ۴-۲۰- تغییرات پتانسیل آرایش دولایه ۰/۲-۱/۲ میلی متر با پرده آب بند ۹ سانتی متر

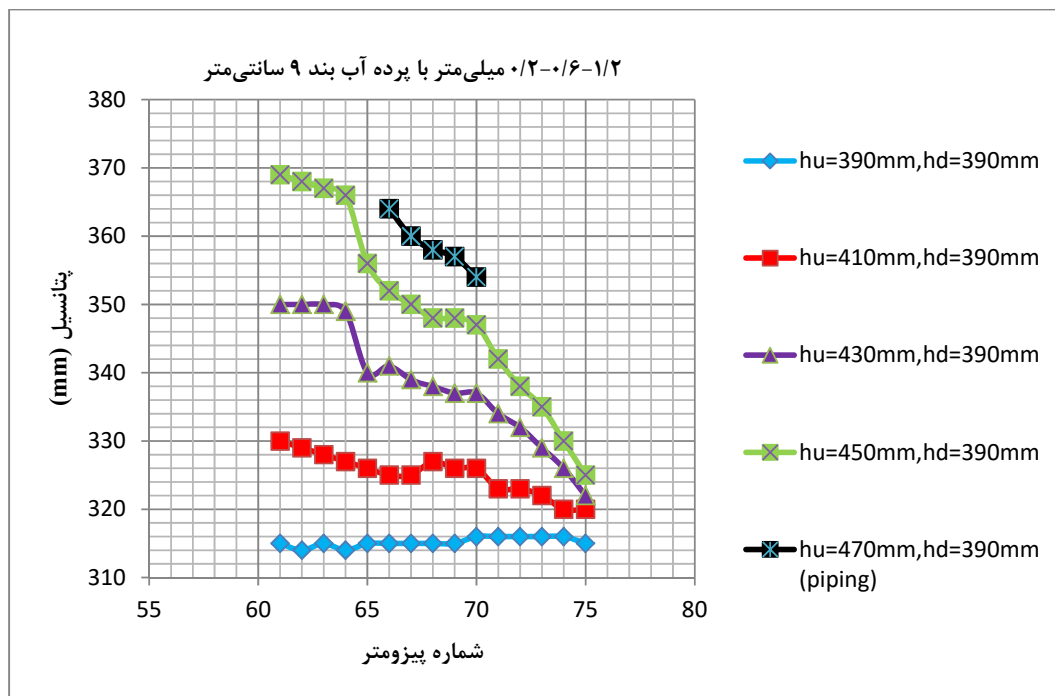


شکل ۴-۲۱- تغییرات پتانسیل آرایش دولایه ۰/۲-۱/۲ میلی متر با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر

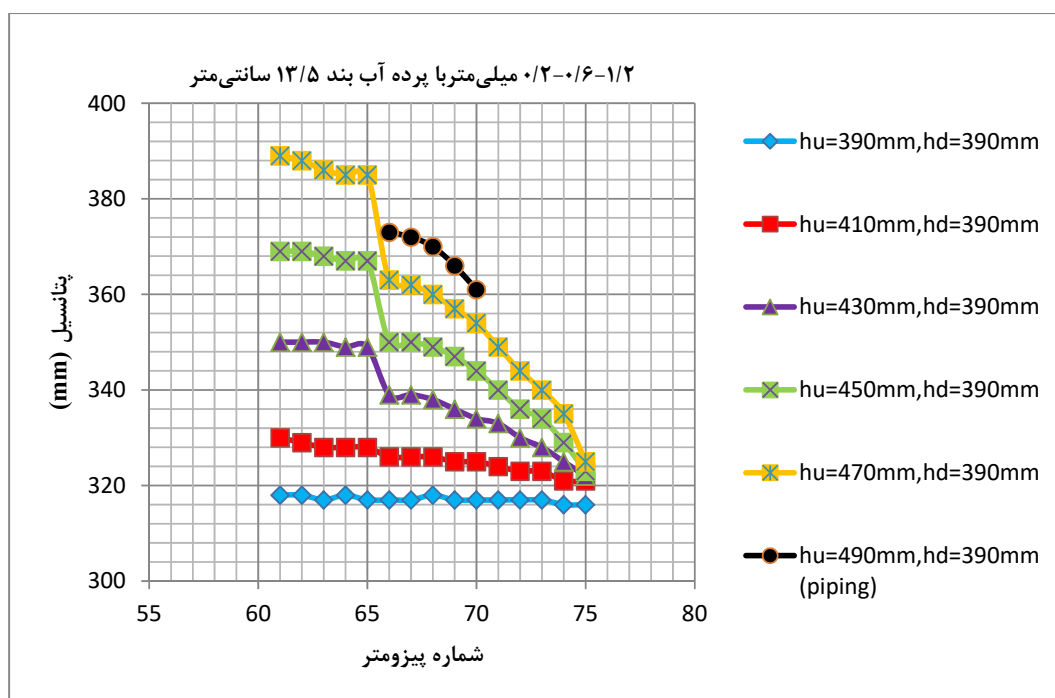
در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۳/۵ سانتی‌متر آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت. طول پرده آب‌بند سبب می‌شود بیشتر جریان از درون لایه‌های دوم و سوم عبور نموده و زهکشی، بهتر صورت می‌گیرد. همچنین افزایش طول مسیر جریان نیز با افزایش افت و کاهش پتانسیل سبب به تاخیر افتادن پدیده جوشش می‌شود. در این آرایش طول پرده آب‌بند بخشی از ضخامت لایه اول را شامل می‌شود و جریان از لایه‌های دوم و سوم عبور می‌کند به طوری که پدیده جوشش برای آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر، ۹ سانتی‌متر و ۱۳/۵ سانتی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۵۵، ۴۷۰ و ۴۹۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل‌های ۴-۲۲، ۴-۲۳ و ۴-۲۴).



شکل ۴-۲۲- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر



شکل ۴-۲۳- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی متر با پرده آب بند ۹ سانتی متر

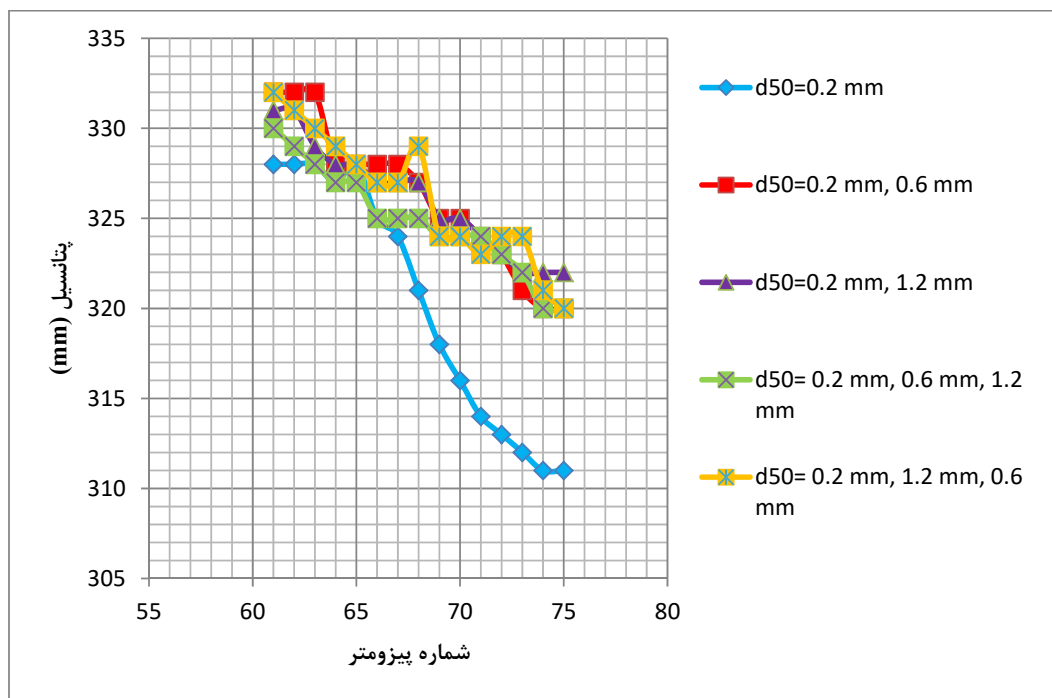


شکل ۴-۲۴- تغییرات پتانسیل آرایش سه لایه ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی متر با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر

### ۴-۳- مقایسه تغییرات پتانسیل در آرایش‌های یک‌لایه، دولایه و سه لایه

#### لایه

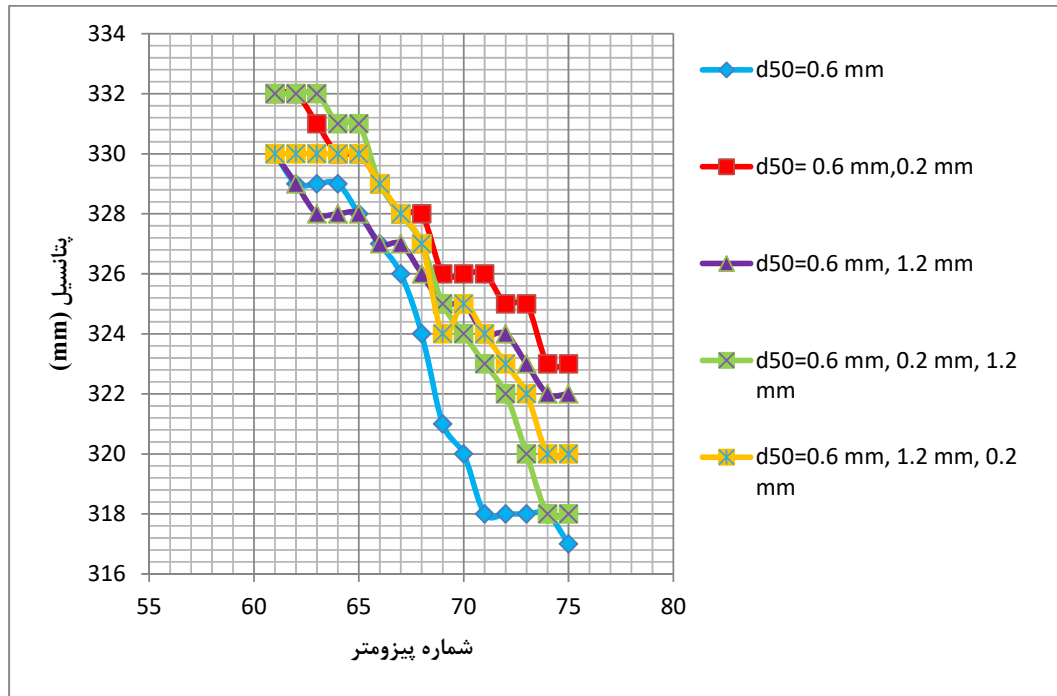
برای دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر، تقریباً برای همه آرایش‌های دولایه و سه لایه، افت پتانسیل مشابه هم بود و بهترین عملکرد مربوط به آرایش دولایه ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بود که در حدود ۰/۴۷/۰۶٪ پتانسیل را کاهش داد. در آرایش سه لایه بهترین عملکرد مربوط به ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر بود که در حدود ۰/۴۱/۱۸٪ پتانسیل را کاهش داد. علت آن می‌توان زهکشی و حرکت افقی بخشی از جریان از لایه‌ی دوم دانست (شکل ۴-۲۵).



شکل ۴-۲۵- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر

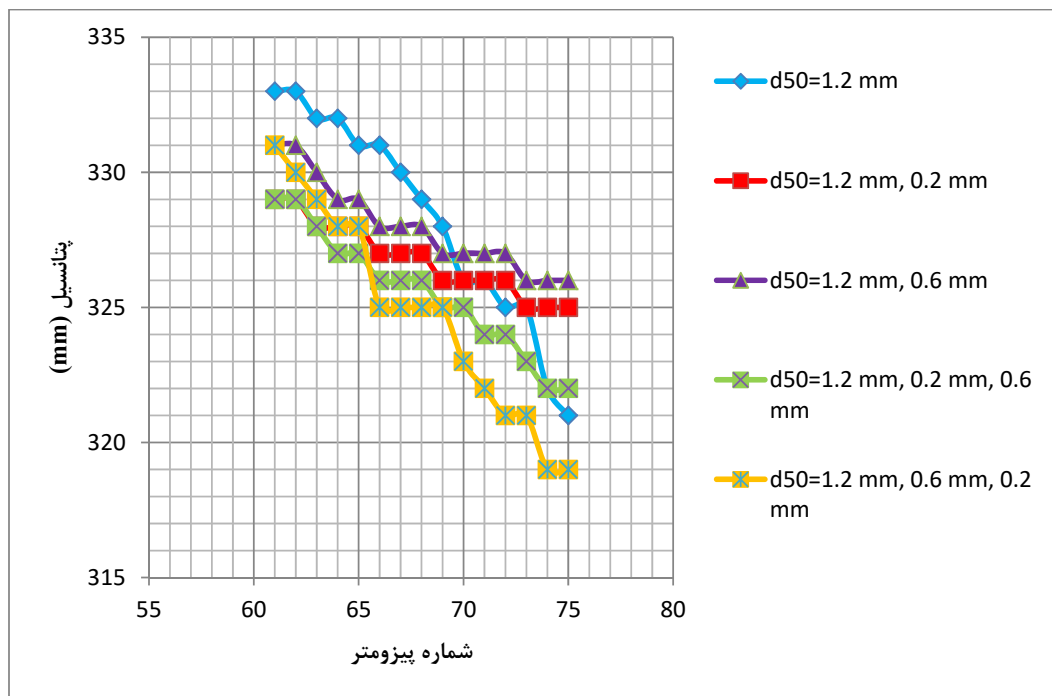
برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر نیز آرایش‌های دولایه و سه لایه سبب افت پتانسیل در طول ردیف نزدیک سطح شد که برای آرایش‌های نامنظم سه لایه مقدار افت ناچیز، اما برای آرایش‌های دولایه عملکرد بهتر بود. مقدار کاهش افت پتانسیل برای آرایش ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر در حدود ۰/۳۸/۴۶٪ بود.

برای آرایش سه لایه ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلی‌متر نیز هنگامی که دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر در لایه دوم قرار می‌گیرد مقدار افت پتانسیل نسبت به آرایش یک‌لایه در حدود ۰.۲۳/۰.۸٪ کاهش یافت (شکل ۴-۲۶). همان طور که مشخص است زهکشی مناسب جریان توسط لایه‌های زیر نقش بسزایی در افزایش عملکرد دارد.



شکل ۴-۲۶- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر

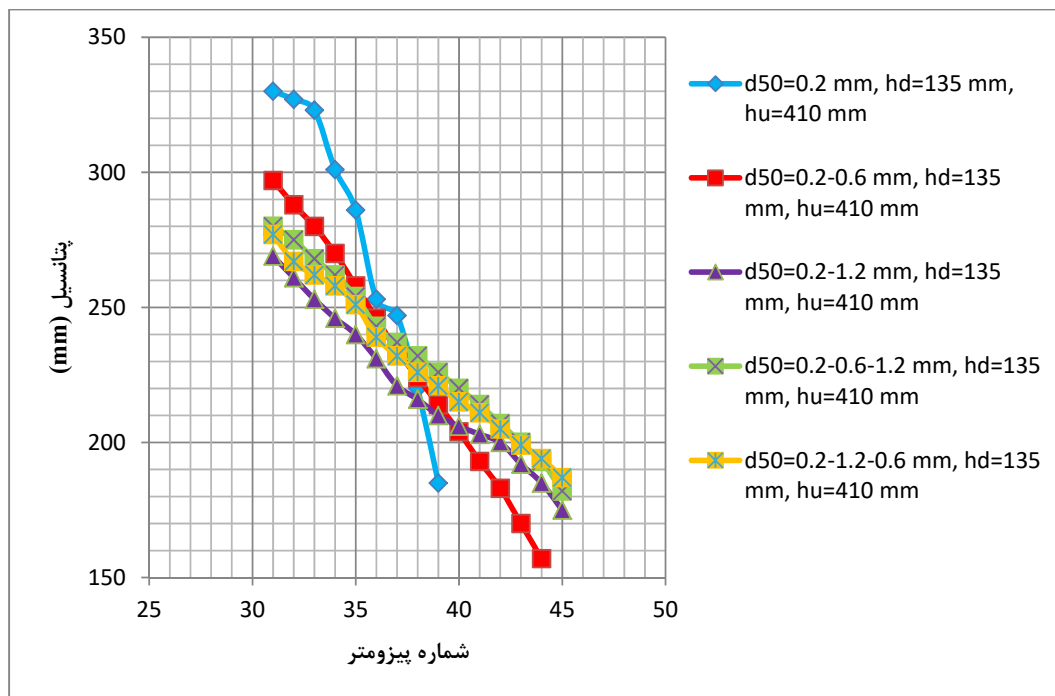
برای دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر، مقدار افت پتانسیل در طول لایه برای آرایش دو لایه ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر و ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر حداقل بود و به ترتیب حدود ۰.۶۶/۶۷٪ و ۰.۵۸/۳۳٪ نسبت به یک‌لایه (۱/۲ میلی‌متر) پتانسیل کاهش یافت و کاهش گرادیان خروجی را به دنبال داشت. برای آرایش سه لایه ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی‌متر نیز هنگامی که دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در لایه دوم قرار می‌گیرد مقدار افت پتانسیل کمتر خواهد بود که مقدار آن نسبت به آرایش یک‌لایه ۰.۴۱/۶۷٪ کاهش یافت. (شکل ۴-۲۷).



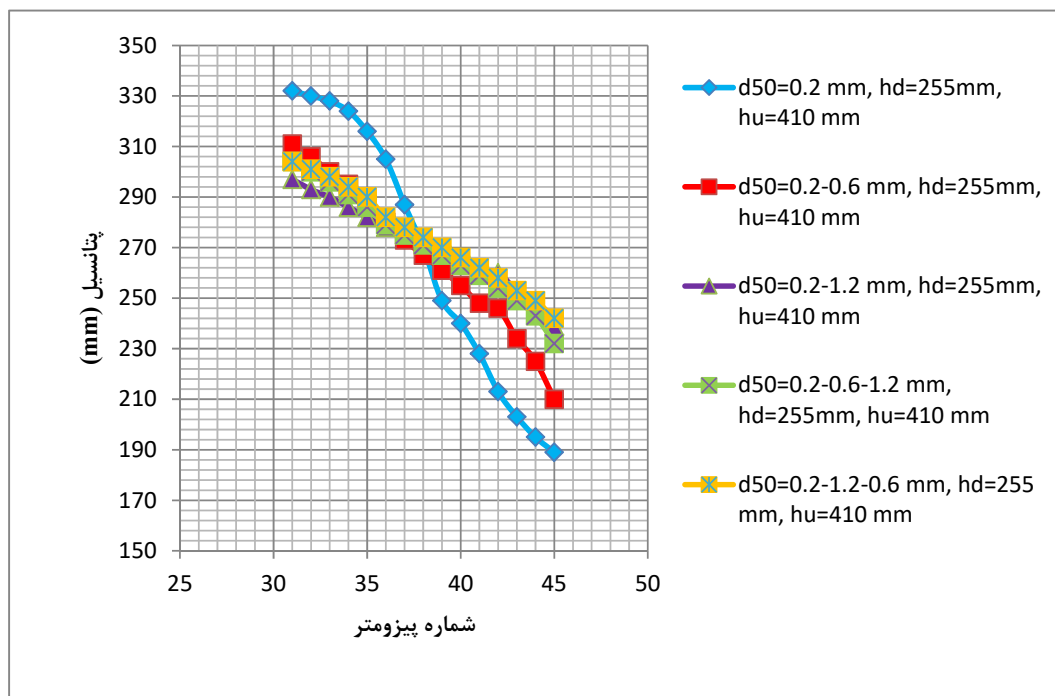
شکل ۴-۲۷- تغییرات پتانسیل برای آرایش‌های مختلف با دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر

#### ۴-۴- تاثیر هد پایین‌دست بر روی پتانسیل جریان

شکل‌های ۴-۲۸، ۴-۲۹ و ۴-۳۰ روند تغییرات پتانسیل را برای آرایش‌های مختلف ۰/۲ میلی‌متر برای سه هد پایین‌دست ۲۵۵، ۱۳۵ و ۳۹۰ میلی‌متر به ازای هد ثابت ۴۱۰ میلی‌متر در بالادست نشان می‌دهد که میزان افت پتانسیل در طول ردیف برای آرایش‌های ۰/۲ میلی‌متر محاسبه و در جدول ۴-۱ ثبت گردید که شیب افت پتانسیل در هد ۱۳۵ میلی‌متر از دو هد ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر بیشتر بود. بنابراین هرچه هد پایین‌دست کمتر باشد پی دیرتر در آستانه جوشش قرار می‌گیرد.

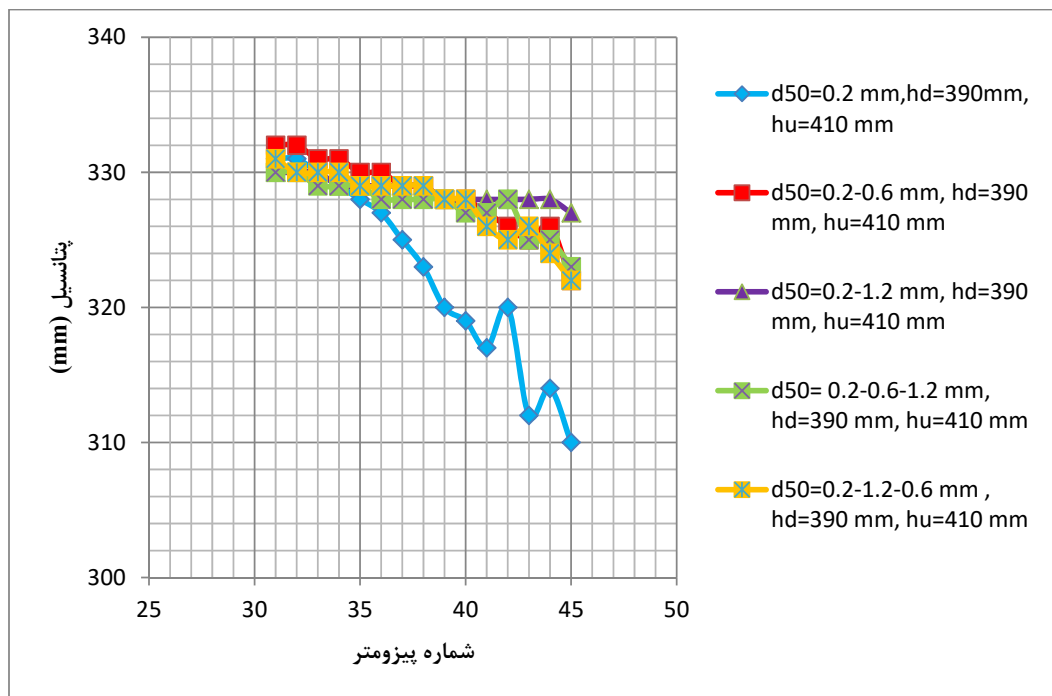


شکل ۴-۲۸- تغییرات پتانسیل آرایش‌های ۰/۲ میلی‌متر با هد پایین‌دست ۱۳۵ میلی‌متر



شکل ۴-۲۹- تغییرات پتانسیل آرایش‌های ۰/۲ میلی‌متر با هد پایین‌دست ۲۵۵ میلی‌متر





شکل ۴-۳۰- تغییرات پتانسیل آرایش‌های ۰/۲ میلی‌متر با هد پایین‌دست ۳۹۰ میلی‌متر

جدول ۴-۱- مقدار افت پتانسیل برای آرایش‌های ۰/۲ میلی‌متر با هد پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر

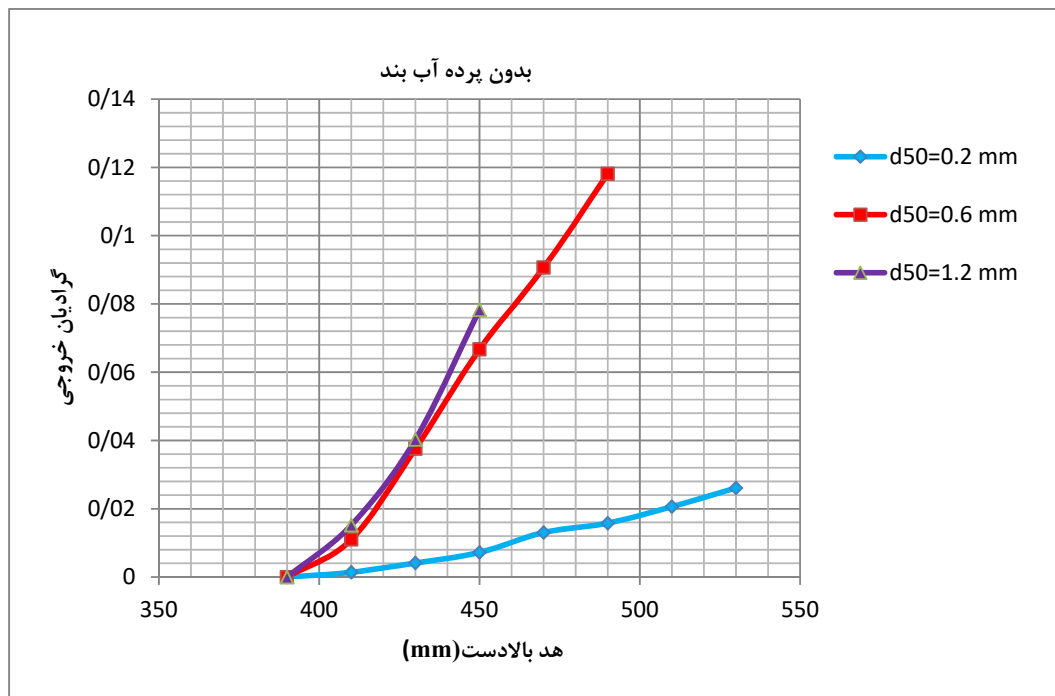
آرایش لایه‌ها (mm)	هد پایین‌دست (mm)	هد پایین‌دست (mm)	هد پایین‌دست (mm)
۰/۲	۱۳۵	۲۵۵	۳۹۰
۰/۲	۱۴۵	۱۴۳	۲۱
۰/۲-۰/۶	۱۴۰	۱۰۱	۱۰
۰/۲-۱/۲	۹۴	۵۸	۳
۰/۲-۰/۶-۱/۲	۹۸	۷۲	۷
۰/۲-۱/۲-۰/۶	۹۰	۶۲	۹

## ۴-۵- گرادیان خروجی

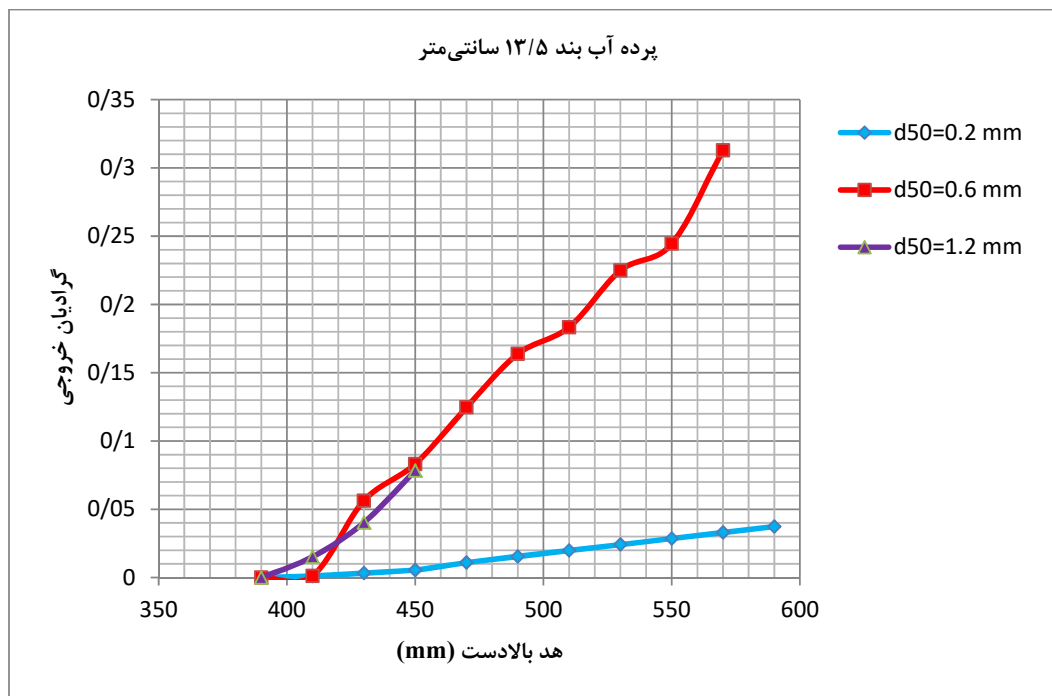
### ۴-۵-۱- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آببند بر روی گرادیان خروجی در

#### آرایش‌های یک‌لایه

در آرایش‌های یک‌لایه، در حالت بدون پرده آببند و پرده آببند با عمق  $13/5$  سانتی‌متر بهترین عملکرد مربوط به آرایش  $0/2$  میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست  $410$  میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی به ترتیب در حدود  $0/0013$  و  $0/001$  بود (شکل‌های ۴-۳۱ و ۴-۳۲).



شکل ۴-۳۱- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک‌لایه، بدون پرده آببند



شکل ۴-۳۲- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک لایه، با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر  
 جدول ۴-۲- مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آرایش ۰/۲ میلی متر را با سایر آرایش‌های یک لایه  
 نشان می‌دهد.

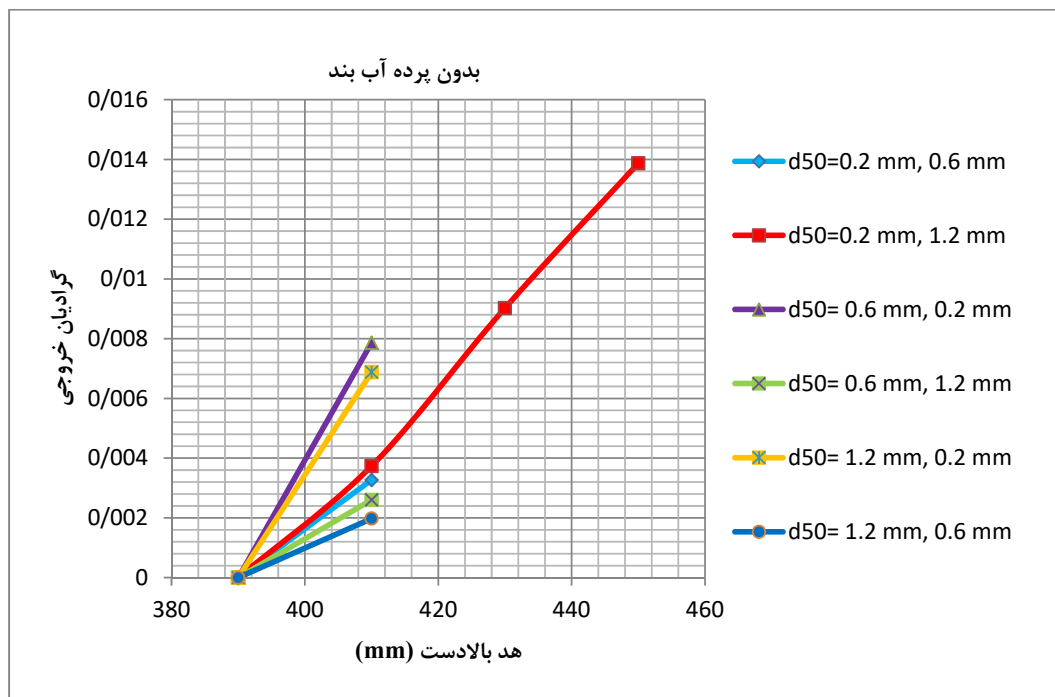
جدول ۴-۲- مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های یک لایه

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین دست (mm)	گرادیان هیدرولیکی	درصد کاهش
۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۱۳	-
۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۱۰۹	۸۷/۴۴
۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۹۷	۸۵/۸۸

#### ۴-۵-۲- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آببند بر روی گرادیان خروجی در

#### آرایش‌های دولایه

در آرایش‌های دولایه، در حالت بدون پرده آببند بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۱۹ بود، علت آن را می‌توان وزن مستغرق بالای ذرات ۱/۲ میلی‌متر و خروج افقی جریان در لایه‌های پی دانست (شکل ۴-۳۳).



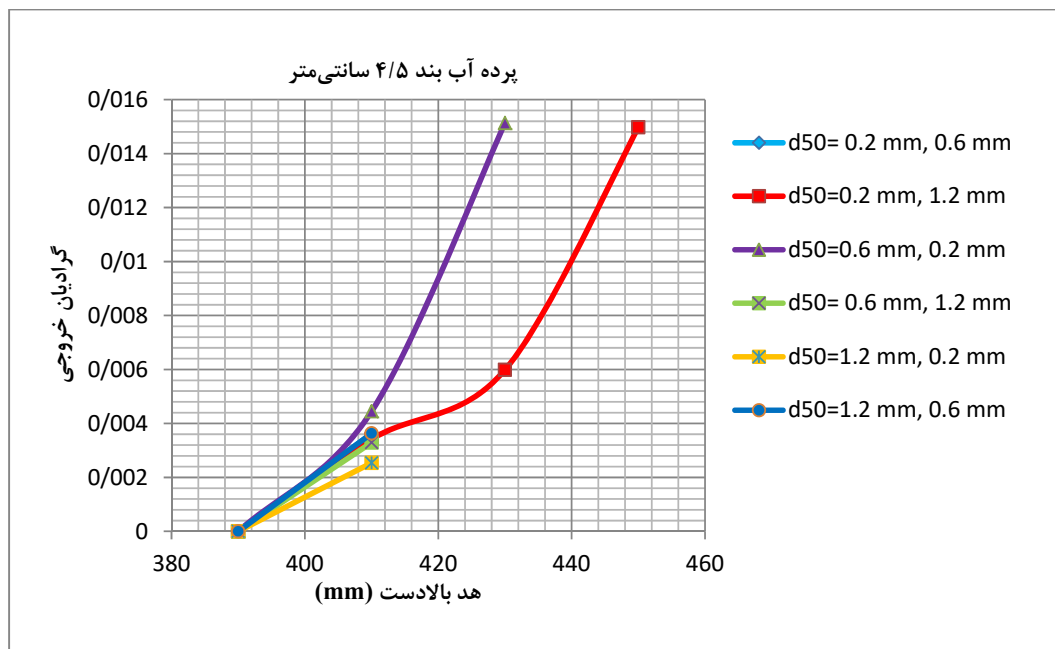
شکل ۴-۳۳- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، بدون پرده آببند

جدول ۴-۳ عملکرد گرادیان هیدرولیکی آرایش دو لایه ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر در حالت بدون پرده آببند را نسبت به آرایش‌های دو لایه دیگر نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴- عملکرد گرادیان هیدرولیکی آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی متر بدون پرده آببند

درصد کاهش	گرادیان هیدرولیکی	هد پایین دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه ها (mm)
-	۰/۰۰۱۹	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶
۳۹/۵۲	۰/۰۰۳۲	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۴۷/۱	۰/۰۰۳۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲
۷۴/۸۵	۰/۰۰۷۸	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۲۳/۹۶	۰/۰۰۲۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲
۷۱/۲۶	۰/۰۰۶۸	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲

با توجه به طول پرده‌ی آببند عملکرد آرایش‌های دو لایه متفاوت خواهد بود. در صورتی که از پرده آببند ۴/۵ سانتیمتر در پاشنه سد استفاده شود، بهترین عملکرد را آرایش دو لایه ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر دارد که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۲۵ بود. با توجه به این که طول پرده آببند بخشی از لایه اول را شامل می‌شود بیشتر جریان عبوری از لایه ریزدانه عبور نموده که سبب کاهش گرادیان هیدرولیکی می‌شود (شکل ۴-۳۴).



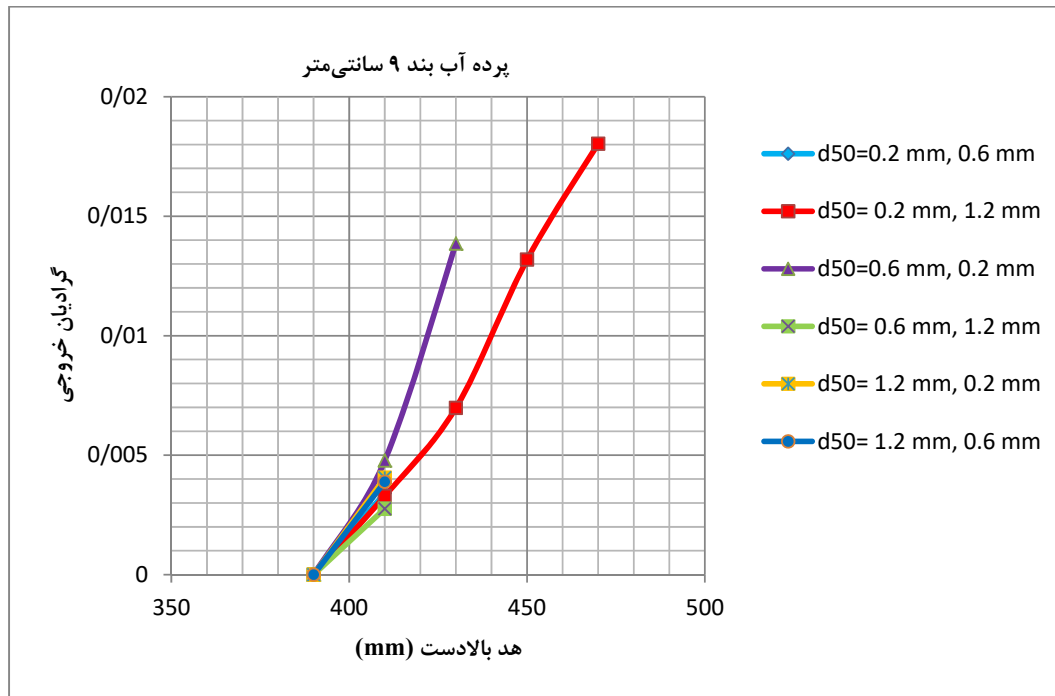
شکل ۴-۳۴- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب بند ۴/۵ سانتی متر در آرایش‌های دو لایه با پرده آب بند ۴/۵ سانتی متر مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن‌ها در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب بند ۴/۵ سانتی متر

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین دست (mm)	گرادیان هیدرولیکی	درصد کاهش
۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۲۵	-
۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۳۶	۲۹/۹۱
۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۳۴	۲۵/۷۱
۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۴۴	۴۲/۸۹
۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۳۲	۲۲/۸۵
۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۳۶	۲۹/۹۹

در صورتی که از پرده آب بند ۹ سانتی متر در پاشنه سد استفاده شود، بهترین عملکرد مربوط به آرایش دولایه ۱/۲-۰/۶ میلی متر است. پرده آب بند ۹ سانتی متر قسمتی از لایه اول را در برمی گیرد که

بیشتر جریان عبوری از لایه ۱/۲ میلی‌متر عبور نموده و گرادیان هیدرولیکی آن حدود ۰/۰۰۲۷ می‌باشد (شکل ۴-۳۵).

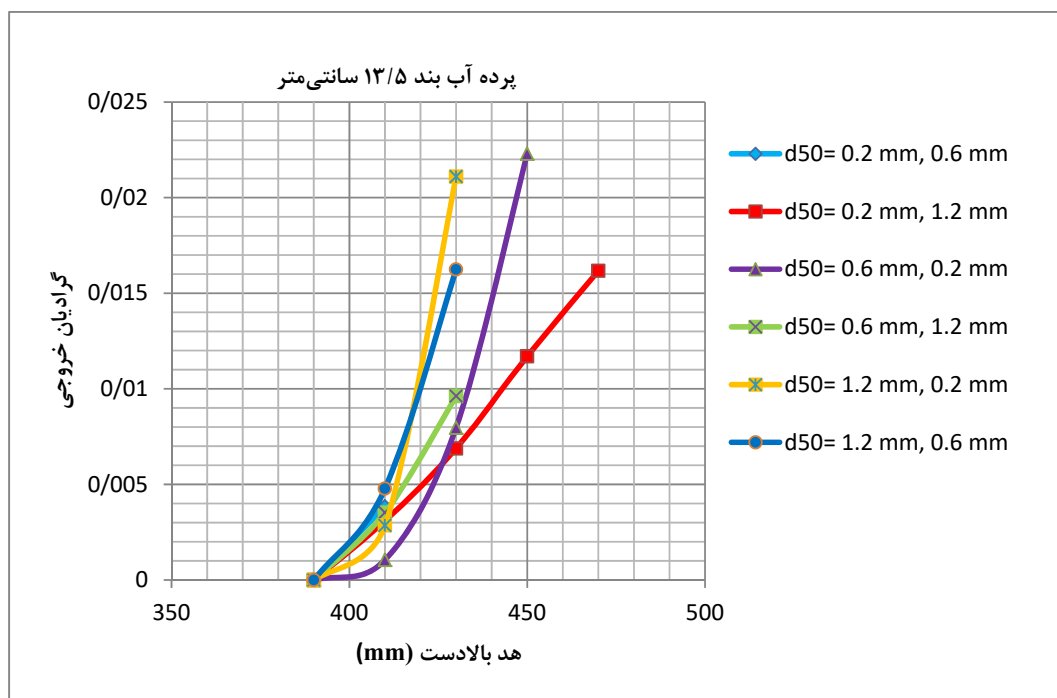


شکل ۴-۳۵- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر آرایش دو لایه ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر بهترین عملکرد را در کاهش گرادیان هیدرولیکی داشت که عملکرد آن با سایر آرایش‌های دو لایه در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دولایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر

درصد کاهش	گرادیان هیدرولیکی	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۰۲۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲
۱۹/۱۴	۰/۰۰۳۴	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۱۶/۱۶	۰/۰۰۳۲	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲
۴۲/۲۲	۰/۰۰۴۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۳۱/۹۱	۰/۰۰۴	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۲۹	۰/۰۰۳۸	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶

در حالتی که در قسمت پاشنه سد از پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر استفاده شد، بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی متر بود، با توجه به طول پرده آب بند که بخش عمده‌ای از ضخامت لایه اول را در برمی‌گیرد، بیشتر جریان عبوری از لایه ریزدانه در کف عبور کرده که نتیجه آن کاهش گرادیان هیدرولیکی است به طوری که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۱ بود (شکل ۴-۳۶).



شکل ۴-۳۶- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر نسبت به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی متر در جدول ۴-۶ نشان می‌دهد که آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی متر نسبت به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی متر در حدود ۷۷/۹۷٪ گرادیان هیدرولیکی را کاهش داد.



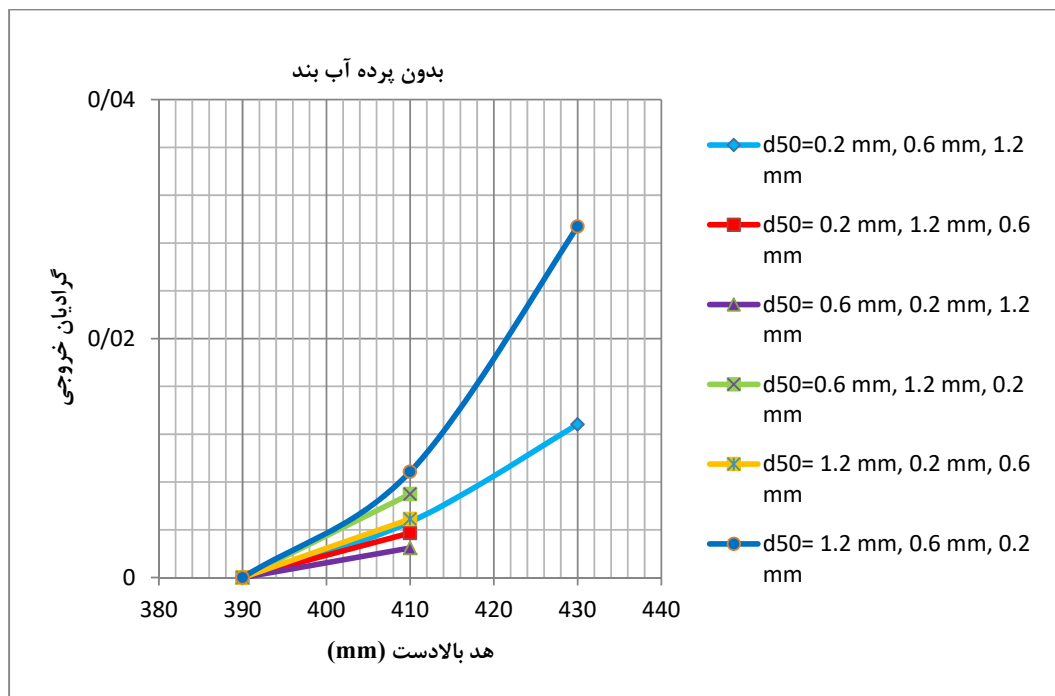
جدول ۴-۶ - مقادیر گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

درصد کاهش	گرادیان هیدرولیکی	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۰۱	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۷۲/۷۵	۰/۰۰۳۸	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۶۶/۰۵	۰/۰۰۳۱	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲
۷۰/۱۶	۰/۰۰۳۵	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲
۶۳/۱۶	۰/۰۰۲۸	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۷۷/۹۷	۰/۰۰۴۷	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶

#### ۴-۵-۳- تاثیر هد بالادست و عمق پرده آب‌بند بر روی گرادیان خروجی در

#### آرایش‌های سه لایه

در آرایش‌های سه لایه، در حالت بدون پرده آب‌بند بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۲۴ بود، علت را می‌توان افزایش افت پتانسیل در لایه اول، زهکشی و خروج افقی جریان در لایه‌های دوم و سوم دانست (شکل ۴-۳۷).



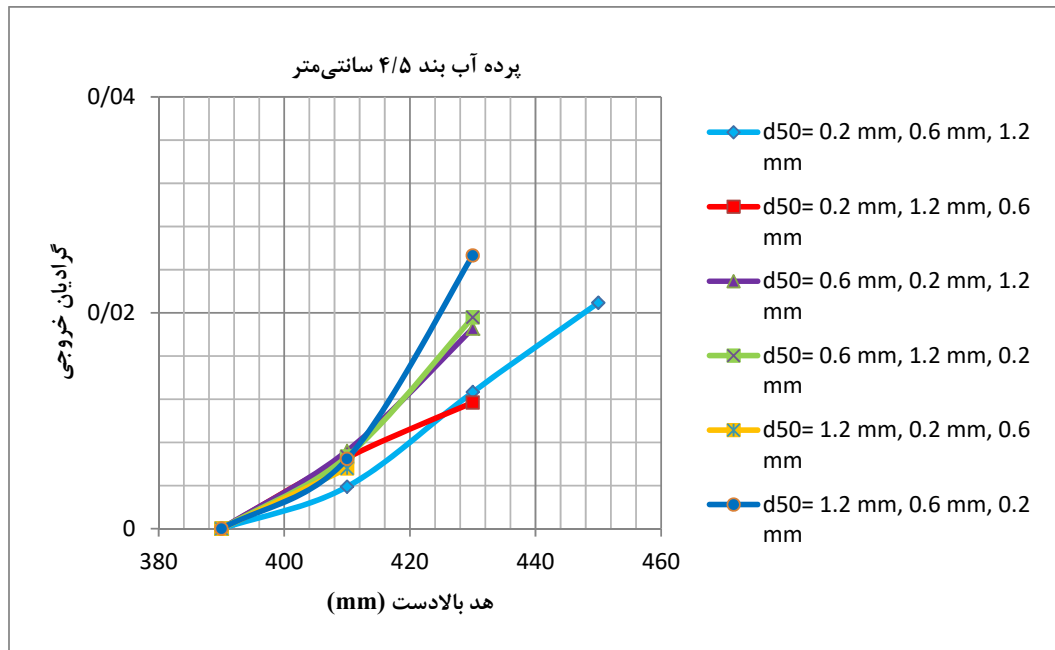
شکل ۴-۳۷- تغییرات گرادبان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، بدون پرده آب‌بند

در آرایش سه لایه بدون پرده آب‌بند، آرایش  $0/۲ - 0/۶ - 1/۲$  میلی‌متر نسبت به آرایش  $1/۲ - 0/۲ - 0/۶$  میلی‌متر گرادبان هیدرولیکی را در حدود  $72/05\%$  کاهش داد که در جدول ۴-۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۷ گرادبان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین دست (mm)	گرادبان هیدرولیکی	درصد کاهش
$0/۶ - 0/۲ - 1/۲$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0024$	-
$0/۲ - 0/۶ - 1/۲$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0046$	$46/88$
$0/۲ - 1/۲ - 0/۶$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0037$	$35/62$
$0/۶ - 1/۲ - 0/۲$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0069$	$64/62$
$1/۲ - 0/۲ - 0/۶$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0049$	$49/46$
$1/۲ - 0/۶ - 0/۲$	۴۱۰	۳۹۰	$0/0088$	$72/05$

در حالتی که از پرده آب بند ۴/۵ سانتی‌متر در پاشنه سد استفاده شد، بهترین عملکرد مربوط به آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود. با توجه به این‌که طول پرده آب‌بند، جریان از لایه‌های درشت‌دانه در کف عبور نموده و سبب کاهش نیروی تراوش در پنجه سد شد. برای آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۳۸ بود (شکل ۴-۳۸).

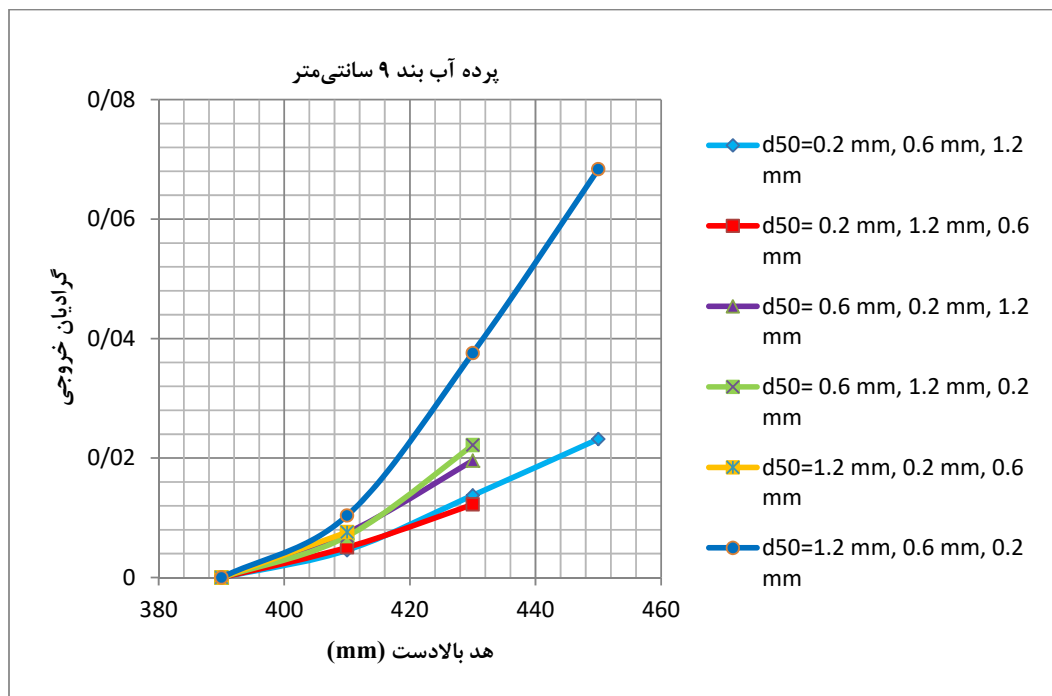


شکل ۴-۳۸- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب بند ۴/۵ سانتی‌متر در آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۲-۰/۶ میلی‌متر با پرده آب بند ۴/۵ سانتی‌متر نسبت به آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۳۸/۴۶٪ کاهش یافت. جدول ۴-۸ مقادیر گرادیان هیدرولیکی را در آرایش‌های سه لایه با پرده آب بند ۴/۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۸- گرادیان هیدرولیکی آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر

درصد کاهش	گرادیان هیدرولیکی	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۰۳۴	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۴۰/۷۷	۰/۰۰۴۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۴۶/۰۳	۰/۰۰۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲-۱/۲
۴۱/۸۵	۰/۰۰۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲-۰/۲
۳۰/۳۹	۰/۰۱۰۵	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۳۹/۸۸	۰/۰۱۵۲	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶-۰/۲

در حالتی که از پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر در پاشنه سد استفاده شد، بهترین عملکرد مربوط به آرایش سه لایه ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر بود. طول پرده آب‌بند بخشی از لایه اول را شامل شد و جریان از لایه‌های ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر عبور نموده که گرادیان هیدرولیکی به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر حدود ۰/۰۰۴۵ بود (شکل ۴-۳۹).



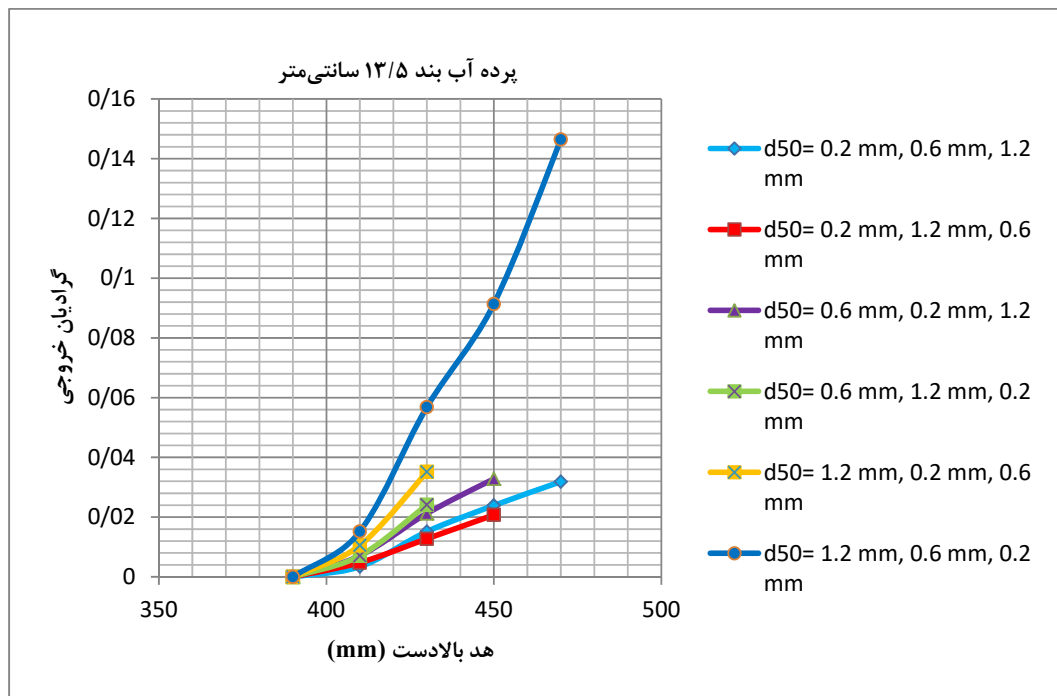
شکل ۴-۳۹- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر

آرایش سه لایه ۰/۲ - ۰/۶ - ۱/۲ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر نسبت به آرایش ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر در حدود ۵۵/۸۴٪ گرادیان هیدرولیکی را کاهش داد. جدول ۴-۹ مقدار گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن را در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۹- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین‌دست (mm)	گرادیان هیدرولیکی	درصد کاهش
۰/۲-۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۴۵	-
۰/۲-۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۵۰	۹/۰۹
۰/۶-۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۷۴	۳۸/۷۳
۰/۶-۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۶۹	۳۳/۶۸
۱/۲-۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۰۷۵	۳۳/۵۹
۱/۲-۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۰۱۰۳	۵۵/۸۴

در شرایطی که در قسمت پاشنه سد از پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر استفاده شد، بهترین عملکرد مربوط به آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی متر بود، پرده آب بند تمام ضخامت لایه اول را در برگرفته، در نتیجه جریان از لایه های درشت دانه در کف عبور کرده که سبب زهکشی و حرکت افقی جریان شده و کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه را به دنبال داشت به طوری که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۳۴ بود (شکل ۴-۴۰).



شکل ۴-۴۰- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست برای آرایش های سه لایه، با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر

همان طور که در جدول ۴-۱۰ مشخص است، آرایش سه لایه ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی متر با پرده آب بند ۱۳/۵ سانتی متر نسبت به آرایش ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۷۷/۳۲٪ کاهش یافت.

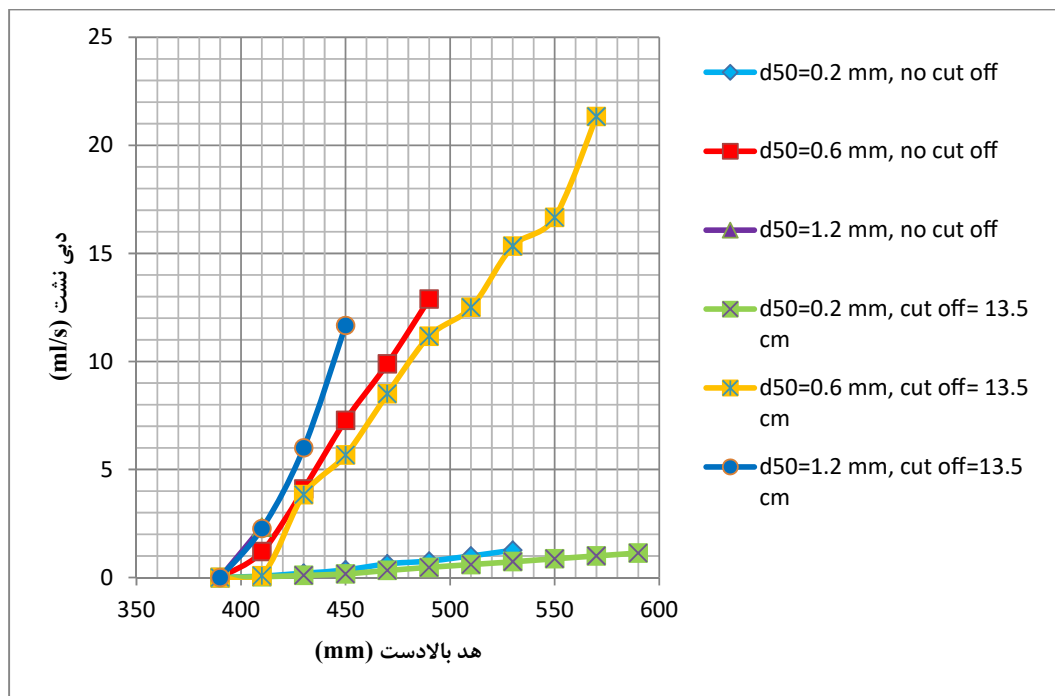
جدول ۴-۱۰- گرادیان هیدرولیکی و عملکرد آن در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

درصد کاهش	گرادیان هیدرولیکی	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۰۳۴	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۲۷/۸۳	۰/۰۰۴۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۵۱/۲۲	۰/۰۰۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲-۱/۲
۵۱/۲۲	۰/۰۰۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲-۰/۲
۶۷/۲۶	۰/۰۱۰۵	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۷۷/۳۲	۰/۰۱۵۲	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶-۰/۲

#### ۴-۶- دبی نشت

##### ۴-۶-۱- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های یک لایه

شکل ۴-۴ تغییرات دبی نشت را در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک لایه با دانه‌بندی مختلف در حالت بدون پرده آب‌بند و پرده آب‌بند به عمق ۱۳/۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۴-۴ مشخص است با افزایش هد بالادست مقدار دبی خروجی افزایش می‌یابد که روند افزایش برای دانه‌بندی ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر مشابه و تند بوده اما برای دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر محدوده تغییرات دبی کم است که دلیل آن را می‌توان نفوذپذیری کم پی ۰/۲ میلی‌متر دانست. استفاده از پرده آب‌بند تغییری در روند تغییرات دبی نداشت.



شکل ۴-۴۱- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های یک لایه

آرایش یک لایه ۰/۲ میلی‌متر بدون پرده آب‌بند به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر بهترین عملکرد را در دبی نشت داشت که مقدار آن ۰/۰۶۷ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. جدول ۴-۱۱ مقدار دبی نشت آرایش‌های یک لایه بدون پرده آب‌بند را به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۱- دبی نشت آرایش‌های یک لایه بدون پرده آب‌بند

درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۶۷	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲
۹۴/۴۱	۱/۲	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶
۹۷/۱۲	۲/۳۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲

همان‌طور که در جدول ۴-۱۲ مشخص است، دبی نشت در آرایش ۰/۶ میلی‌متر با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر نسبت به حالت بدون پرده آب‌بند ۳۴/۱۷٪ کاهش یافت.

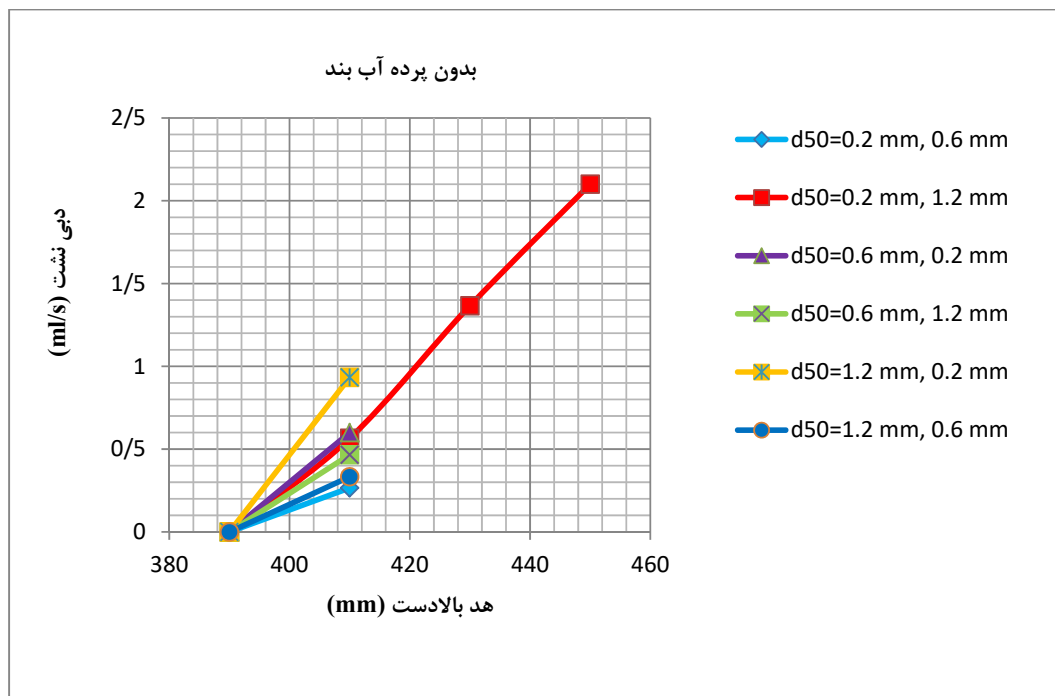


جدول ۴-۱۲- دبی نشت آرایش‌های یک‌لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲
۶۰/۲۴	۰/۰۸۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶
۹۸/۵۴	۲/۲۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲

#### ۴-۶-۲- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های دولایه

بررسی روند تغییرات دبی نشت برای هدهای بالادست نشان داد که بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت مربوط به شرایطی است که پی، ریزترین دانه‌بندی را داشته باشد، زیرا جریان ورودی به داخل پی ابتدا از این لایه عبور می‌کند که نتیجه آن کاهش دبی خروجی است. بنابراین در آرایش‌های دولایه، آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر حداقل دبی نشت را داشت، البته در این آرایش به‌منظور جلوگیری از وقوع پدیده جوشش باید در قسمت پنجه سد اقدامات حفاظتی انجام داد. همچنین برای آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر منحنی تغییرات دبی بیشترین امتداد را داشت که نشان‌دهنده این است که جوشش به تاخیر افتاده است (شکل ۴-۴۲). می‌توان نتیجه گرفت که در آرایش‌های دولایه بدون پرده آب‌بند، هرچه ترتیب دانه‌بندی لایه‌ها از سطح به کف از ریزدانه به درشت‌دانه باشد، عملکرد پی در کنترل دبی نشت بهتر است.



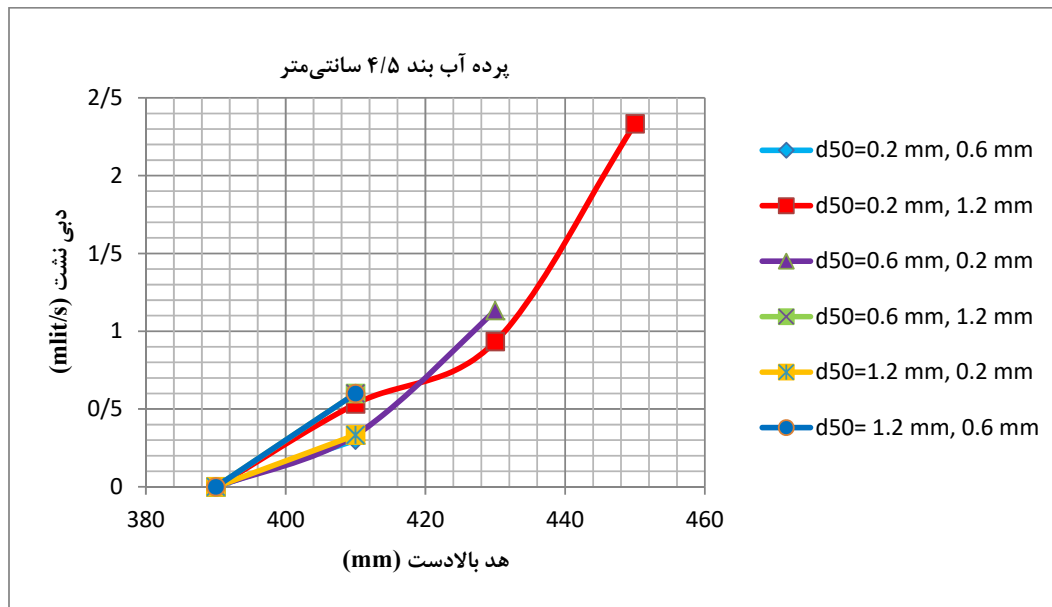
شکل ۴-۴۲- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، بدون پرده آب‌بند

در آرایش‌های دو لایه بدون پرده آب‌بند به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر حداقل دبی نشت را داشت که مقدار آن ۰/۲۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. جدول ۴-۱۳ مقدار دبی نشت و عملکرد آن را در آرایش‌های دو لایه بدون پرده آب‌بند نشان می‌دهد به نحوی که آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر نسبت به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر ۷۱/۴۸٪ دبی نشت را کاهش داد.

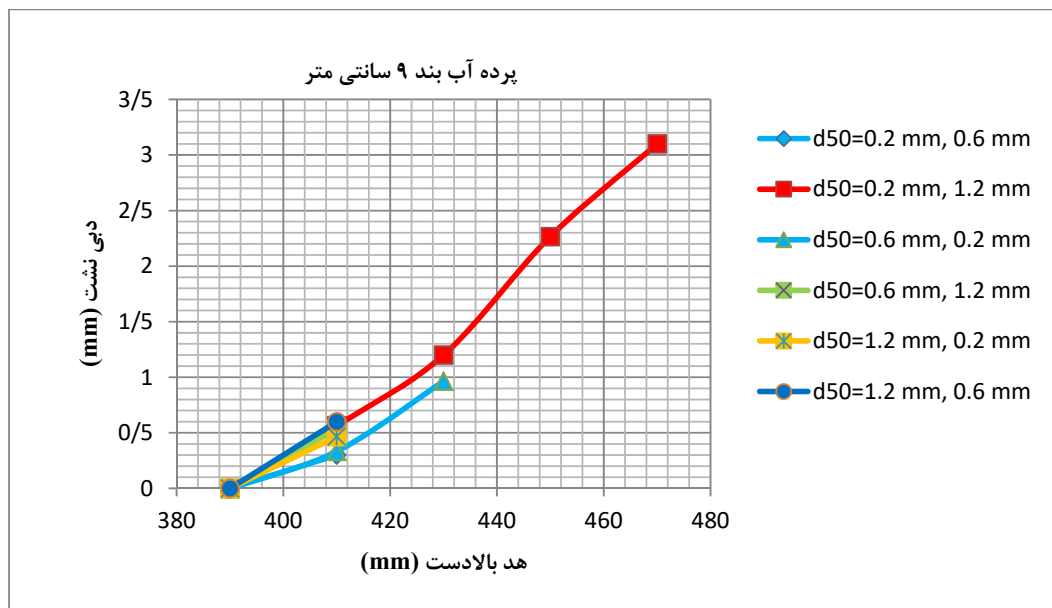
جدول ۴-۱۳- دبی نشت و عملکرد آن در آرایش‌های دو لایه بدون پرده آب‌بند

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین‌دست (mm)	دبی نشت (ml/s)	درصد کاهش
۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۲۶۶	-
۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۵۶۶	۵۳/۰۰۳
۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۶	۵۵/۶۶
۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۴۶۶	۴۲/۹۱
۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۹۳۳	۷۱/۴۸
۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۳۳۳	۲۰/۱۲

در آرایش‌های دولایه با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر و ۹ سانتی‌متر آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر حداقل دبی نشت را داشت. همچنین برای آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر منحنی تغییرات دبی بیشترین امتداد را داشت که نشان‌دهنده این است که جوشش به تاخیر افتاده است. (شکل‌های ۴-۴۳ و ۴-۴۴).



شکل ۴-۴۳- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر



شکل ۴-۴۴- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر

در آرایش دو لایه با پرده آببند ۴/۵ و ۹ سانتیمتر به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر حداقل دبی نشت را داشت که مقدار آن ۰/۳ میلی‌لیتر بر ثانیه بود به طوری که آرایش ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر نسبت به آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر ۵۰٪ دبی نشت کاهش یافت. جداول ۴-۱۴ و ۴-۱۵ دبی نشت و عملکرد آن را در آرایش‌های دو لایه با پرده آببند ۴/۵ و ۹ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۴- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آببند ۴/۵ سانتی‌متر

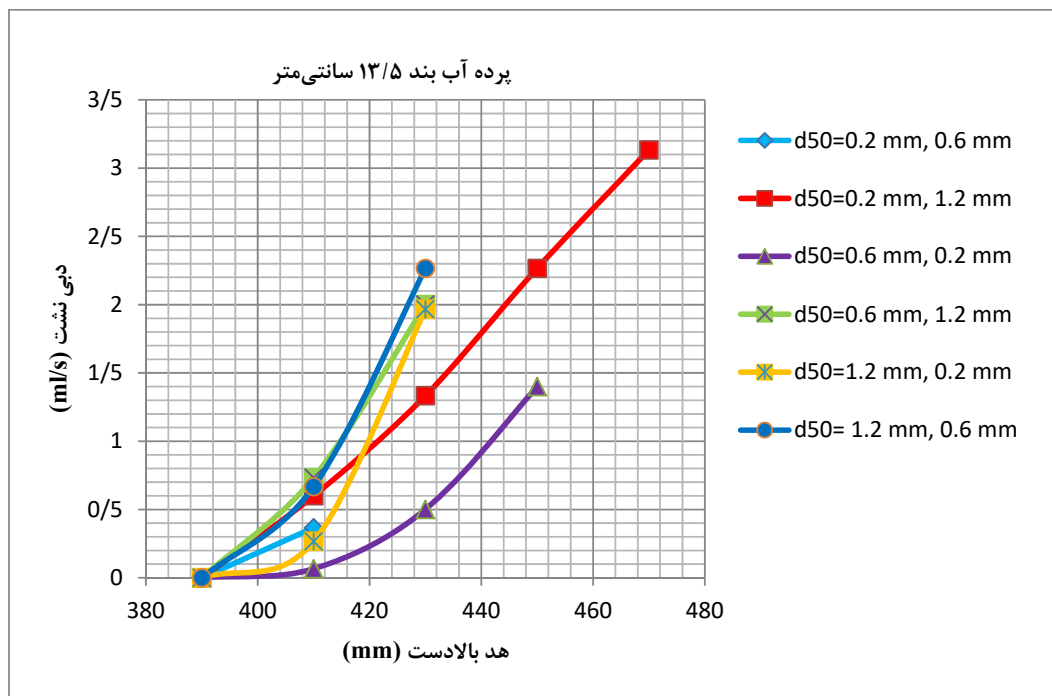
درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۴۳/۷۱	۰/۵۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۹/۹	۰/۳۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۵۰	۰/۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶
۹/۹	۰/۳۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۵۰	۰/۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶

جدول ۴-۱۵- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آببند ۹ سانتی‌متر

درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۴۶/۹۹	۰/۵۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۹/۹	۰/۳۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۴۳/۷۱	۰/۵۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶
۳۵/۶۲	۰/۴۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۵۰	۰/۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶

در آرایش‌های دولایه با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر نیز بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت مربوط به آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود. با توجه به ارتفاع ۱۳/۵ سانتی‌متری پرده آببند، در مقایسه با حالت بدون پرده آببند، بهترین نتیجه مربوط به حالتی بود که دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در پایین قرار داشت،

زیرا وجود پرده آب‌بند سبب انحراف جریان به سمت لایه پایین‌تر شده و به دلیل نفوذپذیری کم لایه دوم، دبی نشت کاهش یافت (شکل ۴-۴۵). همچنین نصب پرده آب‌بند، روند تغییرات دبی خروجی را به ازای هدهای بالاتر نسبت به شرایط بدون پرده آب‌بند تغییر داد.



شکل ۴-۴۵- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های دولایه، با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

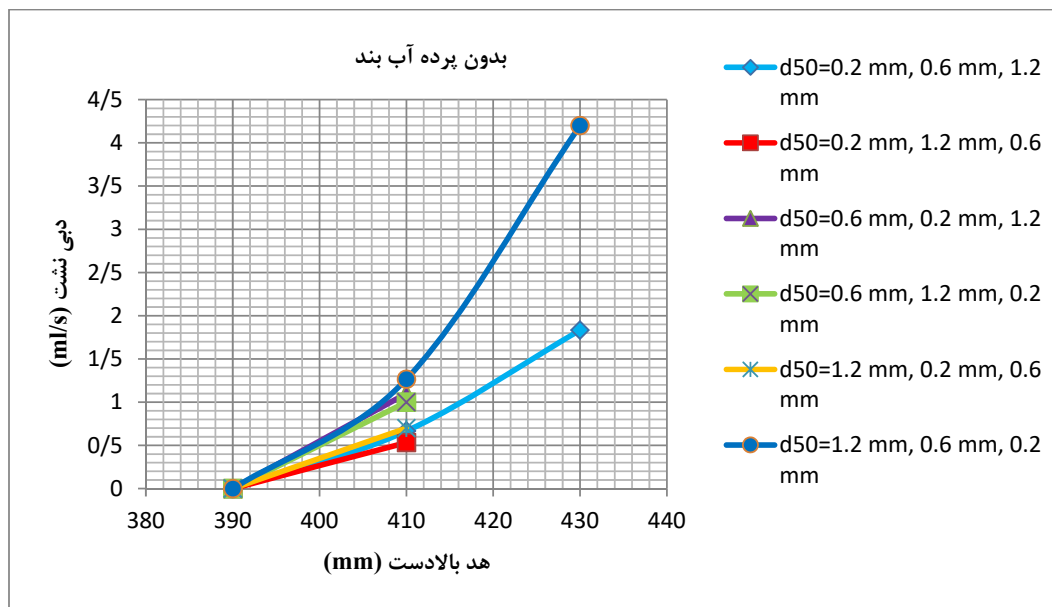
در آرایش دو لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر بهترین عملکرد در کاهش دبی نشت مربوط به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر بود که مقدار آن ۰/۰۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. مقایسه عملکرد این آرایش با سایر آرایش‌ها نشان می‌دهد که دبی نشت در آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر نسبت به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر حدود ۹۰/۹۹٪ کاهش یافت. جدول ۴-۱۶ دبی نشت و عملکرد آن را در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۶- دبی نشت در آرایش‌های دو لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۰۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲
۸۱/۹۶	۰/۳۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶
۸۹	۰/۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲
۹۰/۹۹	۰/۷۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲
۷۵/۱۸	۰/۲۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲
۹۰/۰۹	۰/۶۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶

#### ۴-۶-۳- تاثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت در آرایش‌های سه لایه

همان طور که در شکل ۴-۴۶ مشخص است، بهترین آرایش سه لایه به لحاظ کنترل دبی نشت را می‌توان مربوط به آرایش صعودی ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر دانست که در هدهای پایین، کمترین دبی نشت را داشت، زیرا جریان ورودی به داخل پی ابتدا از لایه ۰/۲ میلی‌متر عبور می‌کند که با توجه به دانه‌بندی ریز آن نفوذپذیری کمتر است.



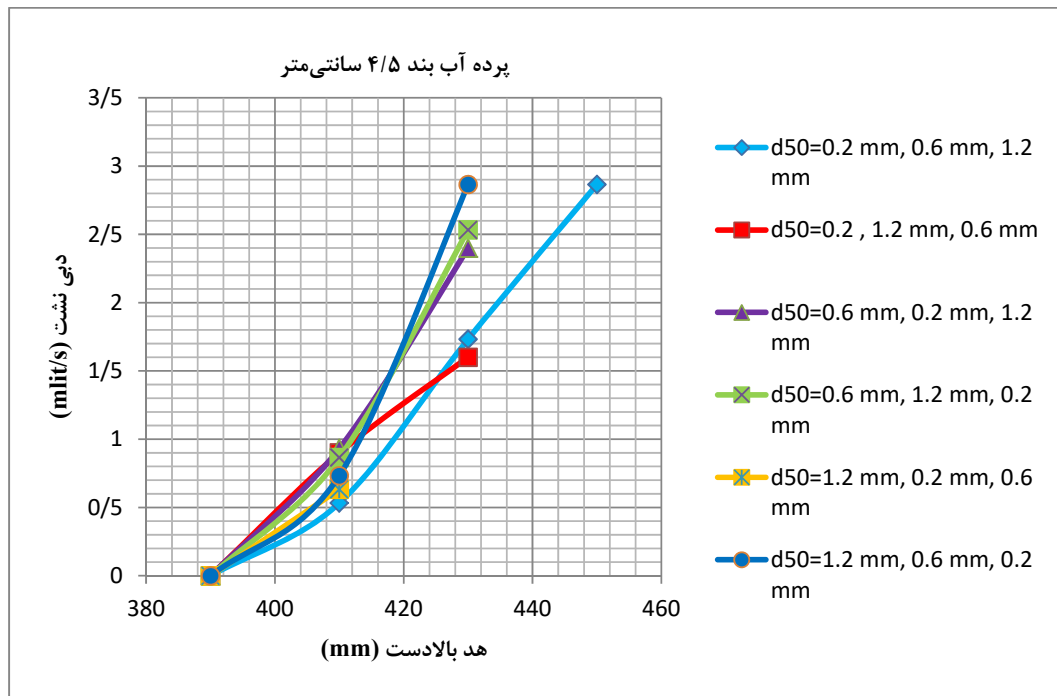
شکل ۴-۴۶- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، بدون پرده آب‌بند

در آرایش سه لایه ۰/۶ - ۱/۲ - ۰/۲ میلی‌متر بدون پرده آب‌بند حداقل مقدار دبی نشت ۰/۵۳۳ میلی‌لیتر بر ثانیه بود که آرایش ۰/۲ - ۰/۶ - ۱/۲ میلی‌متر بدون پرده آب‌بند نسبت به آرایش ۰/۶ - ۰/۲ - ۱/۲ میلی‌متر ۵۷/۸۹٪ دبی نشت را کاهش داد. جدول ۴-۱۷ دبی نشت آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۷- دبی نشت آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند

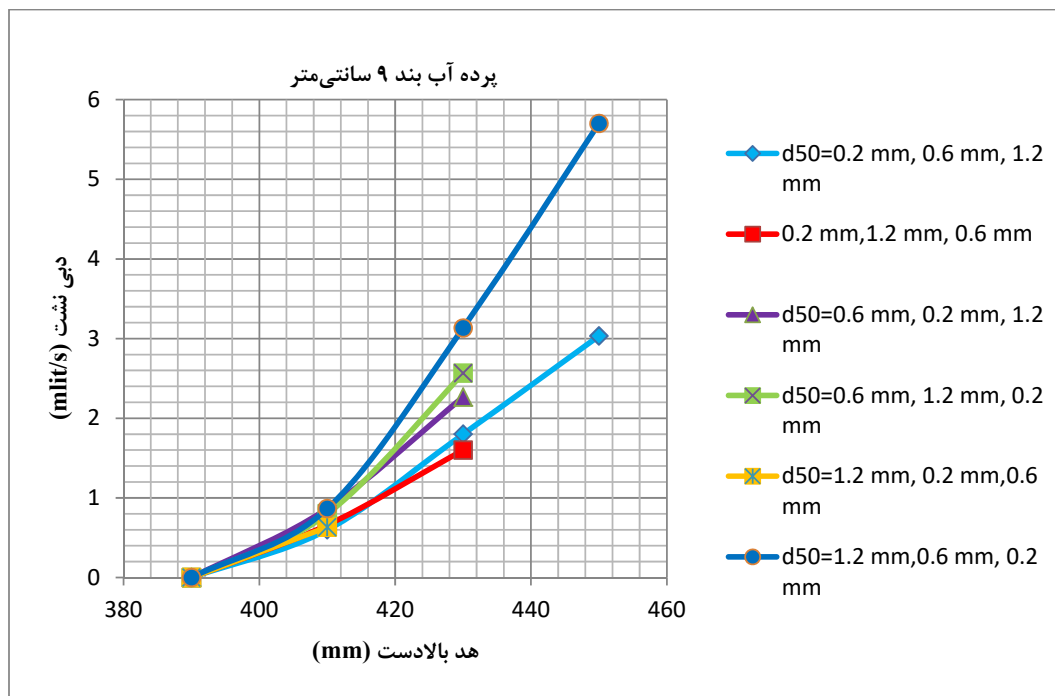
آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین‌دست (mm)	دبی نشت (ml/s)	درصد کاهش
۰/۲-۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۵۳۳	-
۰/۲-۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۶۶۶	۱۹/۹۷
۰/۶-۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۱/۱	۵۱/۵۴
۰/۶-۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۱	۳۳/۴
۱/۲-۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۷	۲۳/۸۵
۱/۲-۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۱/۲۶۶	۵۷/۸۹

در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر و ۹ سانتی‌متر بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت را آرایش ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر داشت که مقدار آن به ترتیب ۰/۵۳۳ و ۰/۶ میلی‌لیتر بر ثانیه بود (شکل‌های ۴-۴۷ و ۴-۴۸).



شکل ۴-۴۷- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۴/۵ سانتی‌متر





شکل ۴-۴۸- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب بند ۹ سانتی متر

مقایسه عملکرد آرایش سه لایه ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی متر با پرده آب بند ۴/۵ و ۹ سانتی متر با سایر آرایش‌ها نشان می‌دهد که آرایش ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی متر با پرده آب بند ۴/۵ سانتی متر حدود ۳۰/۷۱٪ دبی نشت را کاهش می‌دهد. جداول ۴-۱۸ و ۴-۱۹ دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب بند ۴/۵ و ۹ سانتی متر را نشان می‌دهد.

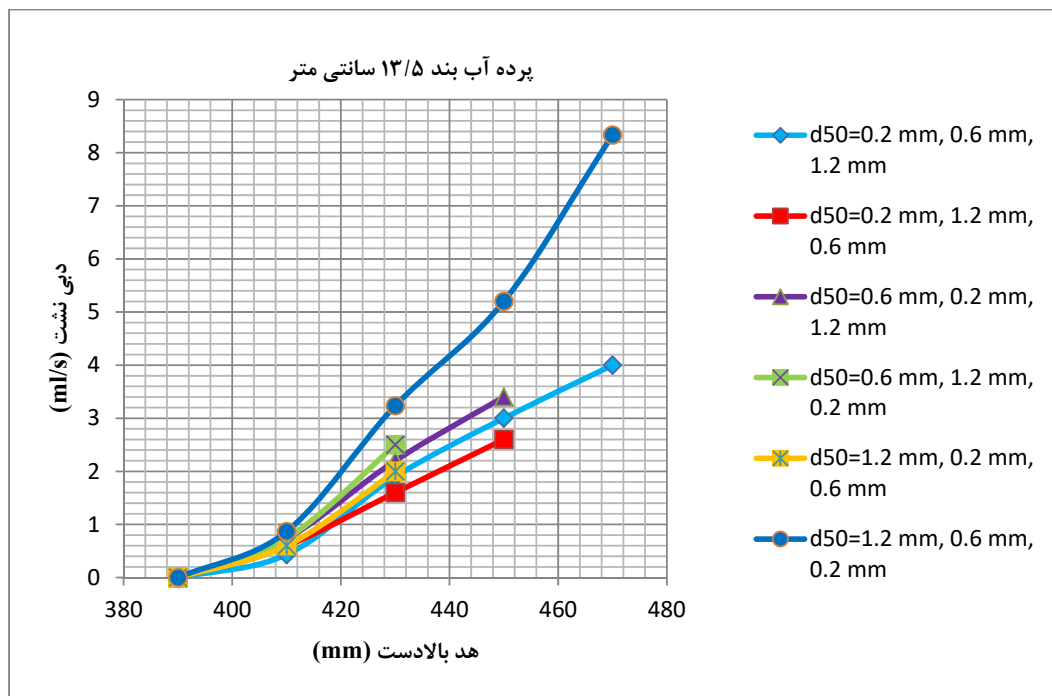
جدول ۴-۱۸- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب بند ۴/۵ سانتی متر

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین دست (mm)	دبی نشت (ml/s)	درصد کاهش
۰/۲-۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۵۳۳	-
۰/۲-۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۹	۴۰/۷۷
۰/۶-۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۹۳۳	۴۲/۸۷
۰/۶-۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۸۶۶	۳۸/۴۵
۱/۲-۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۶۳۳	۱۵/۷۹
۱/۲-۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۷۳۳	۲۷/۲۸

جدول ۴-۱۹- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۹ سانتی‌متر

درصد کاهش	دبی نشت (ml/s)	هد پایین‌دست (mm)	هد بالادست (mm)	آرایش لایه‌ها (mm)
-	۰/۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۹/۰۹	۰/۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۳۰/۷۱	۰/۸۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۰/۲-۱/۲
۲۵	۰/۸	۳۹۰	۴۱۰	۰/۶-۱/۲-۰/۲
۵/۲۱	۰/۶۳۳	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۳۰/۷۱	۰/۸۶۶	۳۹۰	۴۱۰	۱/۲-۰/۶-۰/۲

استفاده از پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر نیز تاثیر زیادی در کنترل دبی نشت آرایش‌های مختلف سه لایه داشت به‌طوری‌که برای اکثر آرایش‌ها این کاهش نمایان بود. علت آن نقش پرده آب‌بند در کاهش گرادیان خروجی است. در این حالت نیز آرایش ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل دبی نشت نشان داد که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر مقدار آن ۰/۴۳۳ میلی‌لیتر بر ثانیه بود. هنگامی‌که لایه ریزدانه (۰/۲ میلی‌متر) نزدیک سطح قرار دارد با ورود جریان به داخل پی، با توجه به دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر بیشترین افت انرژی اتفاق افتاد که نتیجه آن کاهش گرادیان هیدرولیکی است، برای لایه‌های دوم و سوم، اگرچه افزایش دانه‌بندی را داریم اما متناسب با آن طول خطوط جریان با افزایش همراه است که سبب کاهش گرادیان هیدرولیکی می‌شود که نتیجه آن کاهش دبی نشت خواهد بود. بنابراین استفاده از پرده آب‌بند در لایه اول، با افزایش طول مسیر، عملکرد این لایه را در کاهش دبی نشت افزایش می‌دهد (شکل ۴-۴۹).



شکل ۴-۴۹- تغییرات دبی نشت در برابر هد بالادست برای آرایش‌های سه لایه، با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

جدول ۴-۲۰ مقایسه عملکرد دبی نشت در آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد به طوری که آرایش ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر نسبت به آرایش ۰/۲-۰/۶-۱/۲ دبی نشت را حدود ۵۰٪ کاهش داد.

جدول ۴-۲۰- دبی نشت آرایش‌های سه لایه با پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر

آرایش لایه‌ها (mm)	هد بالادست (mm)	هد پایین‌دست (mm)	دبی نشت (ml/s)	درصد کاهش
۰/۲-۰/۶-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۴۳۳	-
۰/۲-۱/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۶	۲۷/۸۳
۰/۶-۰/۲-۱/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۷۳۳	۴۰/۹۲
۰/۶-۱/۲-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۷۳۳	۴۰/۹۲
۱/۲-۰/۲-۰/۶	۴۱۰	۳۹۰	۰/۶	۲۷/۸۳
۱/۲-۰/۶-۰/۲	۴۱۰	۳۹۰	۰/۸۶۶	۵۰

جدول ۴-۲۱- تراز بالادست بحرانی را در آرایش‌های یک‌لایه و چندلایه نشان می‌دهد. تراز بالادست بحرانی تراز است که پدیده جوشش در پایین‌دست سد برای پی اتفاق افتاد.

جدول ۴-۲۱- تراز بالادست بحرانی در آرایش‌های یک‌لایه و چندلایه

هد پایین‌دست	پرده آب‌بند	پرده آب‌بند	پرده آب‌بند	بدون پرده آب‌بند	آرایش لایه‌ها
mm	۱۳/۵ cm	۹ cm	۴/۵ cm	-	mm
۱۳۵	۷۳۷	۷۱۰	۶۹۰	۵۹۰	۰/۲
۱۳۵	۷۱۰	۷۰۰	۶۸۰	۵۸۰	۰/۶
۱۳۵	۴۹۰	۴۸۰	۴۷۰	۴۶۶	۱/۲
۲۵۵	۶۹۰	۶۴۵	۶۱۰	۵۵۰	۰/۲
۲۵۵	۶۷۰	۶۳۰	۶۰۰	۵۴۰	۰/۶
۲۵۵	۴۸۰	۴۷۰	۴۶۰	۴۵۰	۱/۲
۳۹۰	۶۰۰	۵۹۰	۵۷۰	۵۴۰	۰/۲
۳۹۰	۵۹۰	۵۷۳	۵۶۰	۵۰۰	۰/۶
۳۹۰	۴۷۰	۴۶۰	۴۵۰	۴۳۰	۱/۲
۱۳۵	۶۵۰	۵۹۰	۵۵۰	۵۳۰	۰/۲-۰/۶
۱۳۵	۶۲۰	۶۱۵	۶۱۰	۵۹۰	۰/۲-۱/۲
۱۳۵	۵۵۰	۵۱۰	۵۰۰	۴۹۰	۰/۶-۰/۲
۱۳۵	۵۰۰	۴۹۵	۴۹۰	۴۸۰	۰/۶-۱/۲
۱۳۵	۴۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۱/۲-۰/۲
۱۳۵	۵۱۰	۴۹۰	۴۷۰	۴۶۰	۱/۲-۰/۶
۲۵۵	۵۹۰	۵۵۰	۵۳۰	۵۰۰	۰/۲-۰/۶
۲۵۵	۵۷۰	۵۶۵	۵۵۵	۵۵۰	۰/۲-۱/۲
۲۵۵	۵۳۰	۴۹۰	۴۸۰	۴۷۰	۰/۶-۰/۲
۲۵۵	۴۸۰	۴۷۵	۴۷۳	۴۶۵	۰/۶-۱/۲
۲۵۵	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۵	۱/۲-۰/۲
۲۵۵	۴۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۱/۲-۰/۶
۳۹۰	۴۳۰	۴۲۸	۴۲۵	۴۲۰	۰/۲-۰/۶
۳۹۰	۴۹۰	۴۷۵	۴۷۰	۴۶۵	۰/۲-۱/۲
۳۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۰	۰/۶-۰/۲
۳۹۰	۴۵۰	۴۳۰	۴۲۵	۴۲۰	۰/۶-۱/۲
۳۹۰	۴۵۰	۴۳۰	۴۲۵	۴۲۰	۱/۲-۰/۲
۳۹۰	۴۵۰	۴۳۰	۴۲۵	۴۲۰	۱/۲-۰/۶
۱۳۵	۵۷۰	۵۶۵	۵۶۰	۵۵۵	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۱۳۵	۵۹۰	۵۸۰	۵۵۰	۵۴۰	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۱۳۵	۵۱۰	۵۰۰	۴۹۰	۴۸۰	۰/۶-۰/۲-۱/۲

ادامه جدول ۴-۲۱

هد پایین دست	پرده آب بند	پرده آب بند	پرده آب بند	بدون پرده آب بند	آرایش لایه ها
mm	۱۳/۵ cm	۹ cm	۴/۵ cm	-	mm
۱۳۵	۵۱۰	۵۰۰	۴۹۰	۴۷۵	۰/۶-۱/۲-۰/۱۲
۱۳۵	۵۳۰	۴۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۱۳۵	۵۵۰	۵۳۰	۵۱۰	۵۰۰	۱/۲-۰/۶-۰/۱۲
۲۵۵	۵۵۰	۵۳۵	۵۲۵	۵۱۲	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۲۵۵	۵۵۰	۵۴۰	۵۳۰	۵۲۰	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۲۵۵	۴۹۵	۴۹۰	۴۸۵	۴۷۵	۰/۶-۰/۲-۱/۲
۲۵۵	۴۹۰	۴۸۰	۴۷۵	۴۷۰	۰/۶-۱/۲-۰/۱۲
۲۵۵	۴۹۰	۴۷۰	۴۶۰	۴۴۰	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۲۵۵	۵۳۰	۵۰۵	۴۹۰	۴۸۰	۱/۲-۰/۶-۰/۱۲
۳۹۰	۴۹۰	۴۷۰	۴۵۵	۴۴۰	۰/۲-۰/۶-۱/۲
۳۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۴	۰/۲-۱/۲-۰/۶
۳۹۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۰	۰/۶-۰/۲-۱/۲
۳۹۰	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۵	۴۳۰	۰/۶-۱/۲-۰/۱۲
۳۹۰	۴۵۰	۴۳۰	۴۲۰	۴۱۵	۱/۲-۰/۲-۰/۶
۳۹۰	۴۸۰	۴۷۰	۴۵۰	۴۴۰	۱/۲-۰/۶-۰/۱۲



# فصل پنجم

## نتیجہ گیری و پیشہ ماہی

## نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی پارامترهای نشت در پی‌های یک‌لایه، دولایه و سه لایه با آرایش‌های مختلف در مدل آزمایشگاهی مخزن نشت و نفوذ پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به صورت ذیل می‌باشد:

۱. برای آرایش یک‌لایه با دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر، با افزایش هد بالادست مقدار افت پتانسیل در قسمت زیر سد افزایش یافت. در این شرایط به ازای هد بالادست ۵۴۰ میلی‌متر در پایین‌دست سد جوشش اتفاق افتاد. استفاده از پرده آب‌بند در روند تغییرات دبی نقشی نداشت بلکه فقط وقوع پدیده جوشش را به تاخیر انداخت.

۲. تاثیر هد پایین‌دست بر روی پتانسیل جریان در انواع آرایش‌های یک‌لایه، دولایه و سه لایه نشان داد که هر چه هد پایین‌دست کمتر باشد پی دیرتر در آستانه جوشش قرار می‌گیرد به طوری که برای هدهای پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر به ازای هد بالادست ثابت ۴۱۰ میلی‌متر، هد پایین‌دست ۱۳۵ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت. در آرایش‌های یک لایه با دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر میزان افت پتانسیل در طول ردیف با هدهای پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۴۵، ۱۴۳ و ۲۱ میلی‌متر بود. در آرایش دو لایه ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر میزان افت پتانسیل در طول ردیف با هدهای پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۴۰، ۱۰۱ و ۱۰ میلی‌متر بود. در آرایش سه لایه ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر میزان افت پتانسیل در طول ردیف با هدهای پایین‌دست ۱۳۵، ۲۵۵ و ۳۹۰ میلی‌متر به ترتیب ۹۸، ۷۲ و ۷ میلی‌متر بود.

۳. برای آرایش‌های یک‌لایه بدون پرده آب‌بند و با وجود پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر، بهترین عملکرد در کنترل گرادیان خروجی مربوط به آرایش ۰/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، به ترتیب مقدار گرادیان خروجی ۰/۰۰۱۳ و ۰/۰۰۱ بود.



۴. برای آرایش‌های دولایه در حالت بدون پرده آب‌بند، آرایش ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل گرادیان خروجی داشت که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر مقدار آن ۰/۰۰۱۹ بود. همچنین با وجود پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر، آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل گرادیان خروجی داشت که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر مقدار آن ۰/۰۰۱ بود.

۵. برای آرایش‌های سه لایه در حالت بدون پرده آب‌بند، بهترین عملکرد در کنترل گرادیان خروجی مربوط به آرایش ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر مقدار آن ۰/۰۰۲۴ بود. همچنین با وجود پرده آب‌بند ۱۳/۵ سانتی‌متر، آرایش سه لایه ۰/۶-۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را در کنترل گرادیان خروجی داشت که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر مقدار آن ۰/۰۰۳۴ بود.

۶. در آرایش‌های دولایه بدون پرده آب‌بند، آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر حداقل دبی نشت را نشان داد که مقدار آن به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر ۰/۲۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه بود. مقایسه عملکرد آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر با سایر آرایش‌های دو لایه نشان داد که آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر حدود ۷۱/۴۸٪ دبی نشت را کاهش داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط بدون پرده آب‌بند، هرچه ترتیب دانه‌بندی لایه‌ها از سطح به کف از ریزدانه به درشت‌دانه باشد، عملکرد پی در کنترل دبی نشت بهتر است.

۷. برای آرایش‌های سه لایه بدون پرده آب‌بند بهترین آرایش به لحاظ کنترل دبی نشت نیز مربوط به آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر است به طوری که مقدار دبی نشت به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر در حدود ۵۳۳/۰ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. مقایسه عملکرد آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر با سایر آرایش‌ها نشان داد که آرایش ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلی‌متر حدود ۵۷/۸۹٪ دبی نشت را کاهش داد.

۸. برای آرایش دولایه با حضور پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت مربوط به آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر است که دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در پایین قرار داشت و مقدار دبی نشت آن به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر ۰/۰۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه بود. مقایسه عملکرد آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر با سایر آرایش‌ها نشان داد که مقدار دبی نشت در آرایش ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر حدود ۹۹/۹۰٪ کاهش یافت. برای آرایش سه لایه با حضور پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر بهترین عملکرد به لحاظ کنترل دبی نشت نیز مربوط به آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر است که مقدار دبی نشت آن به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر ۰/۴۳۳ میلی‌لیتر بر ثانیه بود. مقایسه عملکرد آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر با سایر آرایش‌ها نشان داد که مقدار دبی نشت در آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر حدود ۵۰٪ کاهش یافت.

۹. برای آرایش‌های یک‌لایه بدون پرده آببند، بهترین عملکرد در کنترل جوشش برای آرایش ۰/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۵۴۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. برای آرایش‌های دولایه بدون پرده آببند، بهترین عملکرد در کنترل جوشش برای آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۶۵ میلی‌متر اتفاق افتاد. برای آرایش‌های سه لایه بدون پرده آببند، بهترین عملکرد در کنترل جوشش را می‌توان آرایش‌های ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر و ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر دانست به‌طوری‌که پدیده جوشش به ازای هد بالادست ۴۴۰ میلی‌متر اتفاق افتاد.

۱۰. برای آرایش‌های یک‌لایه با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر، آرایش ۰/۲ میلی‌متر، بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت به‌طوری‌که جوشش به ازای هد بالادست ۶۰۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. برای آرایش‌های دولایه با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر، آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر، بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت به‌طوری‌که جوشش به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. برای آرایش‌های سه لایه با پرده آببند ۱۳/۵ سانتی‌متر، بهترین عملکرد در کنترل جوشش را می‌توان

آرایش‌های ۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۲ میلی‌متر و ۰/۲ - ۰/۶ - ۱/۲ میلی‌متر دانست به‌طوری‌که پدیده جوشش به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر و ۴۸۰ میلی‌متر اتفاق افتاد.

## پیشنهادها

۱. استفاده از مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی جریان آب در پی‌های چندلایه و بررسی قابلیت آن‌ها در شبیه‌سازی
۲. از آنجایی‌که در مدل‌های آزمایشگاهی از پرده آب‌بند در بالادست (پاشنه) سد با زاویه قائم استفاده شد. برای پی‌های یک‌لایه و چندلایه تغییر موقعیت‌های مختلف پرده آب‌بند و زاویه‌دار شدن آن در طول قاعده سد می‌تواند راهکاری موثر در کنترل نشت و زیرشویی باشد. همچنین علاوه بر پرده آب‌بند، استفاده از کف بند نیز می‌تواند نتایج بهتری را در برداشته باشد.
۳. در آزمایش‌های این تحقیق از سه خاک غیر چسبنده استفاده شد. توصیه می‌شود از خاک‌های چسبنده نیز استفاده گردد.
۴. با توجه به این‌که در پی‌های مطبق اندازه ضخامت لایه‌های پی یکسان در نظر گرفته شد. تغییر ضخامت لایه‌ها می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.



منابع و مأخذ

۱. ابول پور ب، (۱۳۷۳)، پایان‌نامه ارشد: " روش‌های برآورد تراوش، زیر فشار و زیرشویی در سازه‌های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری"، دانشگاه شیراز.
۲. افتخار افضلی س و بارانی غ، (۱۳۹۱)، " بررسی اثر دیواره‌ی آب‌بند بر نیروی زیر فشار و شیب خروجی زیر سازه‌های آبی با استفاده از نرم‌افزار Seep w "، مجله‌ی مهندسی منابع آب، شماره ۱۵، دوره ۵، ص ۸۸ - ۷۷.
۳. افشار حرب ع، (۱۳۷۳)، " زمین‌شناسی کپه داغ "، چاپ اول، انتشارات سازمان زمین‌شناسی، شماره ۱۱، ص ۲۸۶ - ۲۷۵.
۴. بازیار م، عسگری ج، (۱۳۹۵)، " طراحی ژئوتکنیکی سدهای خاکی " چاپ اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ص ۵۷۰.
۵. پور اسکندر س، فرسادی زاده د، حسین زاده دلیر ع، (۱۳۹۱)، " بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر روی نشت از پی‌های مطبق در سدها "، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۶. خلیلی شایان ح، امیری تکلدانی ا، (۱۳۹۱)، " برآورد آزمایشگاهی و عددی نیروی زیر فشار، دبی نشت و گرادیان خروجی در شرایط حضور دیواره سپری و بلانکت در طراحی بندهای انحرافی"، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه.
۷. داود نژاد س، (۱۳۸۵)، " بررسی تاثیر استفاده از پرده آب‌بند بر روی کاهش نشت از سدهای خاکی "، سیزدهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۸. رحیمی ح، (۱۳۹۲)، " سدهای خاکی " چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۶۷۱.

۹. صدقی اصل م، رحیمی ح، خالقی ح، (۱۳۸۴)، " اثر موقعیت بهینه پرده آببند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی "، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۱۰. صدقی اصل م، رحیمی ح، خالقی ح، (۱۳۸۹)، " مطالعه آزمایشگاهی کنترل نشت از پی‌های آبرفتی "، نشریه مهندسی عمران، دوره ۴۲، شماره ۱، دانشگاه امیرکبیر.
۱۱. صیاد زاده ف، زمردیان م، (۱۳۸۶)، " آنالیز نشت از پی خاک‌های لایه دار با استفاده از روش المان محدود "، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
۱۲. طاحونی ش، (۱۳۸۵)، " اصول مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک خاک "، جلد اول، چاپ سیزدهم، انتشارات پارس آیین، تهران، ص ۸۳۲.
۱۳. عابدی کویایی ج، (۱۳۸۰)، پایان‌نامه ارشد: " بررسی عوامل موثر بر زیر فشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود "، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۱۴. قبادیان ر، خدائی ک، (۱۳۸۸)، " بررسی تاثیرات دیواره آببند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادبان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود "، نشریه آب‌و خاک، جلد ۲۳، شماره ۴، دانشگاه فردوسی مشهد.
۱۵. قبادیان ر، (۱۳۹۰)، " اثر دیواره آببند بر موقعیت خط نشت آزاد و دبی تراوش در سدهای خاکی با استفاده از روش عددی احجام محدود "، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۱۶. قنبری ع، (۱۳۹۳)، " اصول مهندسی سدهای خاکی " چاپ اول، دانشگاه خوارزمی، تهران، ص ۳۴۶.
۱۷. وفائیان م، (۱۳۹۱)، " سدهای خاکی " چاپ ششم، انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان، ص ۴۹۶.

١٨. Abdul Jabbar Jamel A.(٢٠١٧), “ Effect of two sheet piles in double soil layers on seepage properties under hydraulic structure using seep/w program”, Al- Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES), Vol.٢٠ , pp.١٩٤-٢٠٥.
١٩. Abdul kareem esmat Z. (٢٠١١), “The effect of cutoff wall angle on seepage under dams”, **Academic scientific journal**, Vol. ١٧, pp.١١٠٩ -١١٣١.
٢٠. Alghazali N.O.S and Alnealy H.K.T.(٢٠١٥), “ Experimental analysis of seepage in soil beneath a model of a gravity dam”,**American journal of civil engineering**, Vol.٣,pp ٦٤- ٦٩.
٢١. Alnealy H.K.T.(٢٠١٥), “ Determination the flow net through multi layers soil by using the hydraulic modeling method”, **American journal of civil engineering**, Vol.٣,pp.٨٠-٨٧.
٢٢. Bligh W.G. (١٩١٠), “**Dams barrages and wiers on porous foundations**”, engineering news, ٦٤(dec), pp. ٧٠٨.
٢٣. Khalili Shayan H. and Amiri Tokaldany E.(٢٠١٣), “ Effects of blanket, drains, and cutoff wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structures” **International Journal of Civil Engineering**, Vol. ١٣, pp ٤٨٦-٥٠٠.
٢٤. King G.J.W and Collins P. (١٩٦٨), “**On the design of a rectangular dam with a central cut-off wall**”, Geotechnique ١٨:pp. ٤٨٩-٤٩٨.
٢٥. Lane E.W.(١٩٣٥), “ Security from under seepage: Masonry dams on earth foundations”, Trans. ASCE,pp. ١٢٣٥-١٢٧٢.
٢٦. Lukman S. Otun JA. Adie DB. Ismail A. Oke IA.(٢٠١١), “ A brief assessment of a dam and its failure and prevention” , **Journal of failure analysis prevention**, Vol.١١, pp. ٩٧-١٠٩.
٢٧. Mansuri B. and Salmasi F. (٢٠١٣), “ Effect of horizontal drain length and cutoff wall on seepage and uplift pressure in heterogeneous earth dam with numerical simulation”, **Journal of civil engineering and urbanism**, Vol.٣, pp. ١١٤-١٢١.



۲۸. Mansuri B. Salmasi F. Oghati B. (۲۰۱۴), "Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam", **Geotech Geol Eng**, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۷۰۶-۰۱۴-۹۷۷۴-۳.
۲۹. Mishra G.C. and Singh A.K. (۲۰۰۵), "Seepage through a levee", **International Journal of Geomechanic ASCE**, Vol.۵, pp.۷۴-۷۹.
۳۰. Moharrami A. and Moradi G. and Hajjalilue Bonab M. and Katebi J. and Moharrami G. (۲۰۱۴), "Performance of cutoff walls under hydraulic structures against uplift pressure and piping phenomenon", **Geotech Geol Eng**, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۷۰۶-۰۱۴-۹۸۲۷-۷.
۳۱. Nassralla T.H and Robea A.R.M.A. (۲۰۱۵), "Seepage characteristics under hydraulic structure foundation (supported by sheet pile) in multi- layers soil", **The egyptian international journal of engineering and technology (EIJEST)**, Vol.۱۸, pp. ۲۲۹-۲۳۸.
۳۲. Obead L.H. (۲۰۱۳), "Effect of position and inclination angle of cutoff wall on seepage control in the foundation of dam structure", **Journal of kerbala university**, Vol.۱۱, pp. ۱۷-۳۲.
۳۳. Opyrchal L. (۲۰۰۳), "Application of fuzzy sets method to identify seepage path through dams", **Journal of hydraulic engineering (ASCE)**, Vol.۱۲۹, pp. ۵۴۶- ۵۴۸.
۳۴. Pakbaz M.S. and Dardaei A., and Salahshoor J. (۲۰۰۹), " Evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in Karkheh dam using ۳-D Seepage analysis and measurement", **Journal of applied sciences**, ۹(۴): pp ۷۲۴-۷۳۰.
۳۵. Shaikh Rezazadeh Nikoo N. Khalaili shayan H. and Amiri E. (۲۰۱۲), "Experimental and numerical study of the optimal size and location of the shield wall, drainage blanket and drifted to reduce the rate of seepage and exit gradient followed by diversion dams", ۱۱ th Iranian Hydraulic Conference. (In Farsi).
۳۶. Yousefi M. Sedghi Asl M. and Parvizi M.(۲۰۱۵), " Experimental study of effect of vertical and inclined cut offs in control of seepage and piping in

water structures foundations” , **Iranian Journal of water and soil Research of** ,Vol. 46(1),pp.69-71 .

## Abstract

Dams are structures that are constructed to regulate water level along the stream of rivers. In this study seepage factors in single-layered and multi-layered foundations of a dam were investigated experimentally under different conditions. Experiments were carried out on three types of soil, 0.2, 0.6 and 1.2 mm inside the seepage and drainage tank. According to the granulation, single-layered, two-layered and three -layered arrangements were considered and hydraulic potential, hydraulic gradient and seepage discharge parameters were investigated. The results showed that for two-layered arrangement with presence of cut off, arrangement of 0.2-1.2 mm had the best performance in control of piping in 490 mm upstream head. For three-layered arrangement with cut off, arrangements of 0.2-0.6-1.2 mm and 1.2-0.6-0.2 mm had the best performance in controlling the phenomenon of piping, which for a upstream heads 490 and 480 mm ,respectively. For two-layered arrangement without and with cut off, the best performance for controlling the hydraulic gradient were 1.2-0.6 and 0.6-0.2 mm, respectively which for 410 mm upstream head, hydraulic gradient was about 0.019 and 0.01, respectively. For three -layered arrangement without and with cut off, the best performance for controlling the hydraulic gradient were 0.6-0.2-1.2 and 0.2-0.6-1.2 mm, respectively so that for 410 mm upstream head, hydraulic gradient was about 0.024 and 0.034, respectively. For two-layered arrangement without and with cut off, the best performance in controlling of seepage discharge obtained for arrangements of 0.2-0.6 and 0.6-0.2 mm, respectively. For three-layered arrangement without and with cut off, the best performance in controlling of seepage discharge obtained for arrangements of 0.2-1.2-0.6 and 0.2-0.6-1.2 mm, respectively. Investigation of results for single-layered and multi-layered foundations showed that using multi-layered foundations could be considered as an effective alternative in controlling of piping phenomenon, reducing hydraulic gradient and seepage discharge.

**Keywords:** Hydraulic potential, Piping phenomenon, Cut off, Multi-layered foundations, Seepage discharge, Dam, Hydraulic gradient.



Shahrood University of Technology  
Faculty of Agriculture  
M.Sc.Thesis in Water Structures Engineering

## **Experimental investigation of seepage through multi-layered foundations**

By:

Mohsen Karimi Pouch

Supervisor:

Dr. Khalil Azhdari

Dr. Seyyed Hossein Hosseini

Advisor:

Dr. Rozbeh Moazen Zadeh

M.Sc. Hasan Goli

September ۲۰۱۸