

## The Effect of Multi-layer Foundation on Seepage Flow Parameters under the Diversion Dams

MOHSEN KARIMI POUCH<sup>1</sup>, KHALIL AZHDARY<sup>1\*</sup>, SEYYED HOSSEIN HOSSEINI<sup>1</sup>, ROZBEH MOAZEN ZADEH<sup>1</sup>,

HASSAN GOLI<sup>1</sup>

1. Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

(Received: March. 29, 2019- Revised: May. 19, 2019- Accepted: May. 21, 2019)

### ABSTRACT

In this study seepage factors in two-layered and three-layered foundation of a diversion dam was investigated experimentally. Results showed by increasing the upstream head, outlet discharge increases. The trend of discharge increase was similar and the variations range was high for  $d_{50}=0.6$  mm and  $d_{50}=1.25$  mm, but the range of discharge variations was low for  $d_{50}=0.24$  mm. For two-layered foundations, the arrangement of  $D_{50}=0.2$  mm and  $D_{50}=1.2$  mm with 465mm upstream head was the best performance for piping control. Also the arrangement of  $D_{50}=0.6$  and  $D_{50}=0.2$  mm without cutoff had the least seepage discharge (about 0.266 mlit/s). In the presence of cutoff, the best performance for piping control was obtained for the arrangement of  $D_{50}=0.6-0.2$  mm and the seepage discharge was about 0.066 mlit/s. The arrangements of  $D_{50}=1.2$  mm,  $D_{50}=0.6$  mm without cutoff and  $D_{50}=0.6$  mm,  $D_{50}=0.2$  mm with cutoff had the best performance for hydraulic gradient control which were about 0.002 and 0.0011 for 410 mm upstream head, respectively. For three-layered foundation, the arrangements of  $D_{50}=0.2$  mm,  $D_{50}=0.6$  mm,  $D_{50}=1.2$  mm and  $D_{50}=1.2$  mm,  $D_{50}=0.6$  mm,  $D_{50}=0.2$  mm showed the best performance for piping control so that piping was happened in 490 and 480mm upstream heads, respectively. The best arrangements in terms of seepage discharge control, without and with cutoff were respectively ( $D_{50}=0.2$  mm,  $D_{50}=0.6$  mm,  $D_{50}=1.2$  mm) and ( $D_{50}=0.2$  mm,  $D_{50}=1.2$  mm,  $D_{50}=0.6$  mm) with 410mm upstream head, in which the seepage discharges were obtained about 0.533 and 0.433 mlit/s, respectively. The results of this study showed that the multi-layered foundations could be considered as an effective alternative in reduction of outlet gradient and control of piping and seepage discharge.

**Keywords:** Hydraulic potential, Cutoff, Two-layered and three-layered foundation, Seepage discharge, Hydraulic gradient.

## تأثیر پی چند لایه بر روی پارامترهای جریان نشت از زیر سدهای انحرافی

محسن کریمی پوچ<sup>۱</sup>، خلیل اژدری<sup>۱\*</sup>، سید حسین حسینی<sup>۱</sup>، روزبه موذن زاده<sup>۱</sup>، حسن گلی<sup>۱</sup>

۱. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۳۱)

### چکیده

در این تحقیق پارامترهای نشت در پی مطبق دو لایه و سه لایه یک سد انحرافی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش هد بالادست مقدار دبی خروجی افزایش می‌یابد. روند افزایش برای دانه‌بندی  $d_{50}=0.6\text{ mm}$  و  $d_{50}=1.2\text{ mm}$  میلی‌متر مشابه و محدوده تغییرات زیاد بوده اما برای دانه‌بندی  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  میلی‌متر محدوده تغییرات دبی کم است. برای پی‌های دو لایه بهترین عملکرد در کنترل جوشش، آرایش  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  و  $d_{50}=1.2\text{ mm}$  و با هد بالادست ۴۶۵ میلی‌متر بود. همچنین آرایش  $d_{50}=0.6\text{ mm}$  و  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  حداقل دبی نشت را بدون حضور پرده آب‌بند در حدود ۰/۲۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه داشت. در حضور پرده آب‌بند نیز بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت آرایش  $d_{50}=0.6\text{ mm}$  بود و دبی نشت در حدود ۰/۰۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. در کنترل گرادیان هیدرولیکی، در حالت بدون پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند بهترین عملکرد به ترتیب مربوط به آرایش  $d_{50}=0.6\text{ mm}$ ،  $d_{50}=1.2\text{ mm}$  و  $d_{50}=0.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.6\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر در حدود ۰/۰۰۲ و ۰/۰۱۱ بود. در آرایش سه لایه، آرایش‌های  $d_{50}=0.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=1.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.6\text{ mm}$  و  $d_{50}=0.6\text{ mm}$ ،  $d_{50}=1.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشتند به طوری که به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر و ۴۸۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. بهترین آرایش به لحاظ کنترل دبی نشت بدون حضور پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند آرایش  $d_{50}=0.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=1.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.6\text{ mm}$  و  $d_{50}=0.6\text{ mm}$ ،  $d_{50}=1.2\text{ mm}$ ،  $d_{50}=0.2\text{ mm}$  بود که مقدار دبی نشت به ترتیب در حدود ۰/۵۳۳ و ۰/۴۳۳ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست آمد. بررسی نتایج پی‌ها نشان داد که استفاده از پی‌های چند لایه می‌تواند راهکاری مؤثر در کاهش گرادیان هیدرولیکی، کنترل پدیده جوشش و دبی نشت باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل هیدرولیکی، پرده آب‌بند، پی دو لایه و سه لایه، دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی.

### مقدمه

از جمله سازه‌های آبی که به منظور کنترل جریان در مسیر رودخانه‌ها ساخته می‌شود، سدهای انحرافی هستند که معمولاً بر روی پی‌های آبرفتی ساخته می‌شوند. از مشکلات این پی‌ها می‌توان به مسئله نفوذ جریان به داخل آن‌ها و پدیده نشت اشاره کرد که هدررفت جریان، افزایش نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی را به دنبال دارد و در طولانی مدت پایداری سازه را به خطر انداخته سبب خسارات مالی و جانی خواهد شد. از این رو محققین به بررسی راهکارهای مختلفی جهت کنترل پدیده نشت پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از کف‌بند و دیواره‌های آب‌بند اشاره کرد. در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره شده است.

نتایج پژوهش عده‌ای از پژوهشگران نشان می‌دهد که استفاده از پرده آب‌بند در کاهش نشت و گرادیان هیدرولیکی از پی سازه‌های آبی اثر مثبتی داشته است (Vicent et al., 2010; et al.,

عوامل مؤثر بر نشت از پی دایک‌های ساحلی توسط (Sedghi Asl et al., 2012) بررسی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد نسبت طول بهینه بلانکت به عمق آب مخزن و عمق پرده آب‌بند به ضخامت پی، به منظور حداقل کردن دبی نشت و کنترل فرسایش درونی، به ترتیب ۸ و ۰/۸ است. بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پرده آب‌بند بر نشت از پی‌های مطبق در سدها توسط (et al., 2012) Pour Eskandar) مطالعه شد. ایشان رفتار هیدرولیکی پرده آب‌بند با عمق‌های نفوذ مختلف برای خاک‌هایی با سه نوع ضریب آب‌گذری و دو لایه‌بندی را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. مقادیر نشت و فشار پی‌زومتری را در بیست و هشت نقطه از مدل فیزیکی برداشت و با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی نمودند. مقدار خطای مدل عددی به طور متوسط ۰/۲۸ درصد بود که حاکی از تطابق خوب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است.

کاهش زیر فشار بالادست کفبند است. اثرات روش‌های مختلف کنترل نشت در زیر دایک‌های ساحلی با بهره‌گیری از یک مدل آزمایشگاهی توسط Sedghi Asl *et al.*, 2010) بررسی شد. ایشان طول بهینه بلانکت و عمق بهینه دیواره‌های سپری را به گونه‌ای ارائه کردند که مقدار نیروی زیر فشار وارد بر دایک حداقل گردد. ایشان همچنین نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از تئوری‌های بلای و لین در شرایط متناظر قیاس نموده و نتیجه گرفتند روش لین مقدار نیروی زیر فشار و احتمال بروز پدیده جوشش را کمتر از روش بلای برآورد می‌کند. در یک مطالعه موردی توزیع فشار بالابرنده به کمک چهار روش تئوری لین، بلای و خوسلا و روش عددی تفاضل محدود توسط (Abedi Koupaei, 1991) محاسبه گردید. او بیان کرد که مقدار فشار بالابرنده تخمین زده شده توسط تئوری لین و بلای از تئوری خوسلا و روش تفاضل محدود کمتر است. مدل پیشنهاد شده توسط (Abolpour, 1994) زیر فشار وارد بر سازه‌های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد، مدل فوق در محاسبه زیر فشار و زیرشویی از روش‌های لین، بلای، خوسلا و شبکه جریان استفاده کرده و میزان خطای بدست آمده آن در مقایسه با داده‌های پی‌زومتری سد درودزن حدود ۴ درصد بود. تاثیر موقعیت و زاویه پرده آب‌بند در کاهش نیروی زیر فشار توسط (Mansuri *et al.*, 2014) بررسی گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه‌دار کردن پرده آب‌بند در بالادست سد انحرافی نسبت به راستای قائم تاثیر زیادی در کاهش نیروی زیر فشار دارد. تاثیر پرده آب‌بند بر روی نشت از زیر سدها توسط (Zinal, 2011) بررسی شد. او نتیجه گرفت که بهترین زاویه برای کاهش دبی نشت، نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی به ترتیب ۶۰، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه است. تاثیر دیواره آب‌بند و زهکش در کاهش نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی به صورت عددی توسط (Ghobadian and Khodaei, 2009) بررسی گردید. آن‌ها نتیجه گرفتند، احداث دیواره آب‌بند در هر شرایطی گرادیان خروجی را نسبت به حالت بدون دیواره آب‌بند کاهش می‌دهد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان خروجی مربوط به حالتی است که پرده آب‌بند در پنجه نصب شود و هرچه زهکش دورتر از پاشنه نصب شود تاثیر آن در کاهش گرادیان خروجی و نیروی زیر فشار بیشتر است. بررسی نیروی زیر فشار، گرادیان خروجی، دبی نشت در شرایط حضور یک دیوار سپری و بلانکت در بندهای انحرافی توسط (Khalili Shayan and Amiri Tokaldany, 2014) صورت گرفت. آنها معادلاتی بدون بعد برای تغییرات عمق پرده آب‌بند و فاصله از مبدا ارائه نمودند، همچنین قوانین لین، بلای و خوسلا را با روش عددی اجزای محدود مقایسه نموده و به این نتیجه

بررسی پدیده نشت و چگونگی حرکت زه‌آب زیرزمینی در پی یک سد قوسی در چین توسط (Yifeng *et al.*, 2016) صورت گرفت. این محققین برای مطالعه موضوع، تحقیقات زمین‌شناسی گسترده‌ای در پی سد مزبور انجام دادند. یافته‌های مدلسازی و عددی حاصل از تحقیق فوق، مقدار دقیق نشت موجود در پی سد و نیز نحوه حرکت زه‌آب زیرزمینی در آن محل را شناسایی نمود و در جهت کنترل نشت فوق الذکر گام موثری برداشته شد. تغییرات گرادیان هیدرولیکی بحرانی با وجود پرده آب‌بند در پی-های شنی و سنگریزه‌ای سازه‌های آبی توسط (Luo *et al.*, 2012) مطالعه شد و در جهت کنترل گرادیان هیدرولیکی راهکار مناسبی ارائه نمودند. حل تئوریک نشت زیر کفبند با وجود پرده آب‌بند در سازه‌های آبی توسط (Arun *et al.*, 2012) ارائه گردید. این محققین معادلات متعدد ریاضی را بسط دادند. معادلات صریح توسعه یافته آنها از یافته‌های اصلی تحقیق منجر به یافتن مشخصات مختلف نشت، از جمله فاکتور گرادیان خروجی بعنوان راهنمای کاربردی شد. تغییرات گرادیان هیدرولیکی پایین دست سرریزهای نصب شده روی پی‌های نفوذپذیر و خاکهای فرسایش-پذیر درجه اهمیت بکارگیری پرده آب‌بند در این نوع خاک‌ها را نشان می‌دهد (Goel and Pillai, 2010; Quanyi *et al.*, 2018). طبقه‌بندی جدیدی از مکانیسم کنترل نشت از پی سازه‌های آبی در تحقیقات (Yifeng *et al.*, 2010) آمده است. در این پژوهش فرآیند نشت با مدل‌های ریاضی خاصی تحلیل گردیده و برای کنترل پدیده نشت مدل‌های محاسباتی ارائه شد. همچنین برای ارزیابی عملکرد و طراحی سیستم کنترل نشت از نظر اقتصادی راهکارهای مبتنی بر مدل‌سازی پیشنهاد گردید. مقدار نشت زیر سازه‌های هیدرولیکی در خاکهای غیرایزوتروپ و غیرهمگن به روش آنالیز احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفت (Ashraf, 2013). در این مورد توابع احتمالاتی متعددی بسط داده شد. این موضوع در بررسی گرادیان هیدرولیکی جریان غیر خطی توسط (Liu *et al.*, 2016) ارزیابی گردید. همچنین یافته‌های برخی از محققین نشان می‌دهد که برای حفاظت و پایداری سدها بویژه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای صرف کردن زمان و هزینه دریافتن راه حل مشکل پدیده نشت بعلا اهمیت مسئله، توجیه‌پذیر است (Hongqi and Fudong, 2016; Pedro *et al.*, 2009).

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 توسط (Shaikh Rezazadeh Nikoo *et al.*, 2012) انجام گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بهترین مکان قرارگیری دیواره سپری جهت کاهش نشت و شیب خروجی در انتهای کفبند و جهت

که در آن فشار آب منفذی،  $\rho_w$  چگالی آب و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد. نشت آب از پی سد انحرافی را می‌توان با استفاده از معادله دوبعدی جریان تحلیل نمود. تحت شرایط جریان غیرماندگار، معادله دیفرانسیل جزئی جریان آب در یک خاک غیراشباع و غیرهمگن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{wx} \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{wy} \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + q = m_2^w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$m_2^w$  ضریب تغییر حجم آب با توجه به تغییر در مکش ماتریک و  $t$  زمان است. این معادله بیانگر آن است که مجموع تغییرات سرعت جریان در جهت  $x$  و  $y$  به اضافه‌ی دبی جریان اضافی با تغییر حجمی آب نسبت به زمان برابر است (Schnellmann et al., 2010). در این تحقیق پی سد اشباع و جریان ماندگار در نظر گرفته شد.

**مدل آزمایشگاهی:** آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. مدل آزمایشگاهی شامل مخزن مکعب مستطیلی نشت و نفوذ به طول ۱/۸۵، عرض ۰/۵۵ و ارتفاع ۱ متر از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. سیستم جریان آب در آن چرخشی بوده و دبی توسط یک الکتروپمپ با قدرت ۰/۵ اسب بخار تامین می‌شد. ضخامت پی و ارتفاع سازه ۰/۸۵ متر لحاظ شدند. برای مصالح پی از سه نوع دانه‌بندی که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده استفاده گردید. برای پی پنج ردیف پی‌زومتر در نظر گرفته شد که در هر ردیف تعداد ۱۵ عدد پی‌زومتر قرار داشت که در مجموع تعداد ۷۵ پی‌زومتر به منظور قرائت پتانسیل فشاری مورد استفاده قرار گرفت. پی‌زومترها برای سهولت قرائت روی تابلویی مخصوص و مدرج نصب شده بودند. شکل (۱) تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده و محل قرارگیری پی‌زومترها را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح به مخزن بالادست و پایین‌دست فلوم شبکه‌ای توری با شماره ۱۵۰ در حدفاصل مخازن مذکور با پی نصب شد و روی هر کدام از مخزن‌ها خط‌کش مدرجی جهت نشان دادن ارتفاع آب چسبانده شد. ضخامت پی ۳۹ سانتی‌متر بوده که برای آن سه نوع ذره با دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. براساس استاندارد بریتانیا (BS) خاک‌های مورد استفاده در محدوده ماسه ریز، متوسط و درشت قرار می‌گیرند.

رسیدند که روش خوسلا مقادیر حقیقی‌تری را برای برآورد نیروی زیرفشار در سازه‌های آبی ارائه می‌دهد. تأثیر سپرهای قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده جوشش در پی سازه‌های آبی بوسیله (Yousefi et al., 2015) مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت استفاده از پرده آب‌بند قائم و به ازای نسبت عمق پرده به ضخامت پی ۰/۳۴ و بیشترین تراز آب بالادست، پدیده جوشش رخ نمی‌دهد و مقدار دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی در محدوده مجاز قرار دارند. همچنین نتایج پژوهش عده‌ای از پژوهشگرانی که در سال‌های مختلف برای کنترل مقدار نشت و گرادیان خروجی در پی سازه‌های آبی مطالعاتی انجام داده‌اند نشان می‌دهد که استفاده از دیوار آب‌بند در کاهش این فاکتورها موثر بوده و لذا بهتر است تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گیرد (Hedayati et al., 2015; Alnealy and Obead et al., 2014; Ren et al., 2015; Alghazali, 2015). اهمیت استفاده از دیوار آب‌بند در پی سدها در تحقیقات (Moharrami et al., 2014; Rostami et al., 2012) نیز بیشتر تأکید شده است. همانطور که اشاره شد مطالعات کمی در مورد بررسی پارامترهای نشت در پی‌های چند لایه و قابلیت‌های این پی‌ها در کنترل پارامترهای نشت صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به کاهش دبی نشت، گرادیان خروجی و کنترل پدیده‌ی جوشش اشاره کرد. از این رو در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی نشت از پی‌های مطبق دو لایه و سه لایه سد انحرافی با آرایش‌های مختلف تحت شرایط جریان ماندگار پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم:

جریان آب در خاک‌های اشباع و غیر اشباع را می‌توان با استفاده از معادله داریسی بررسی نمود (Fredlund and Rehardjo, 1993). طبق قانون داریسی سرعت جریان عبوری از یک توده خاک متناسب با گرادیان هیدرولیکی بوده که می‌توان آنرا به صورت زیر بیان نمود:

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $v_w$  سرعت جریان آب،  $k_w$  ضریب نفوذپذیری و  $\frac{\partial h_w}{\partial y}$  گرادیان هیدرولیکی در جهت  $y$  می‌باشد. تراز هیدرولیکی کل بصورت زیر بیان می‌شود:

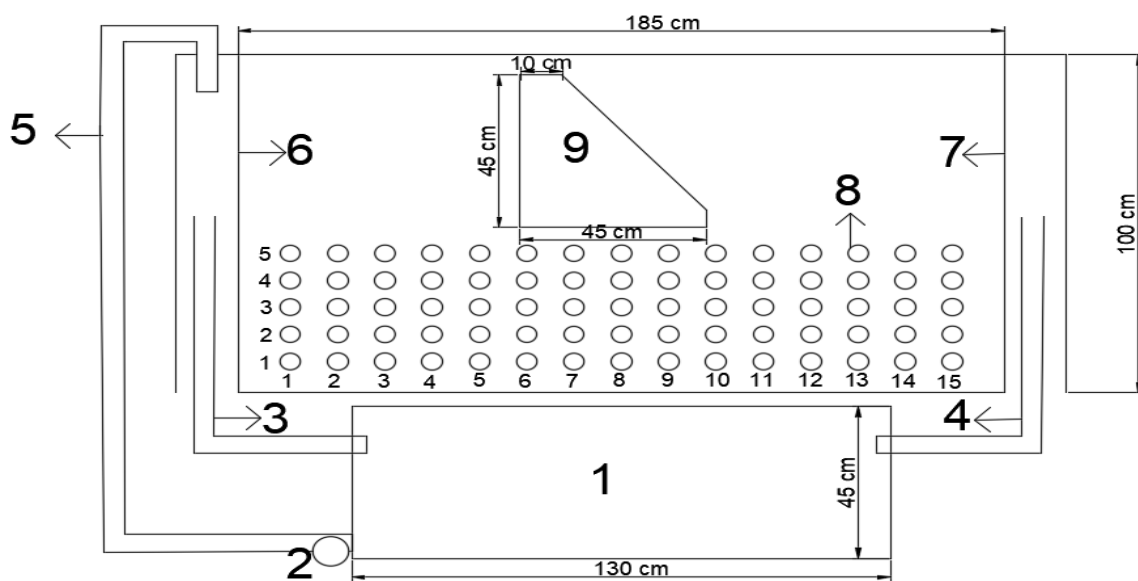
$$h_w = y + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (\text{رابطه ۲})$$

جدول ۱- اندازه ذرات و هدایت هیدرولیکی مصالح خاکی بکار رفته در لایه‌های خاک

اندازه متوسط ذرات خاک (mm)d <sub>50</sub>	۰/۲	۰/۶	۱/۲
هدایت هیدرولیکی (m/s)	۰/۰۰۰۲۴۵	۰/۰۰۰۵۵۱	۰/۰۰۱۲۰۴

دانه‌بندی سه نوع خاک به‌کاررفته در پی مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

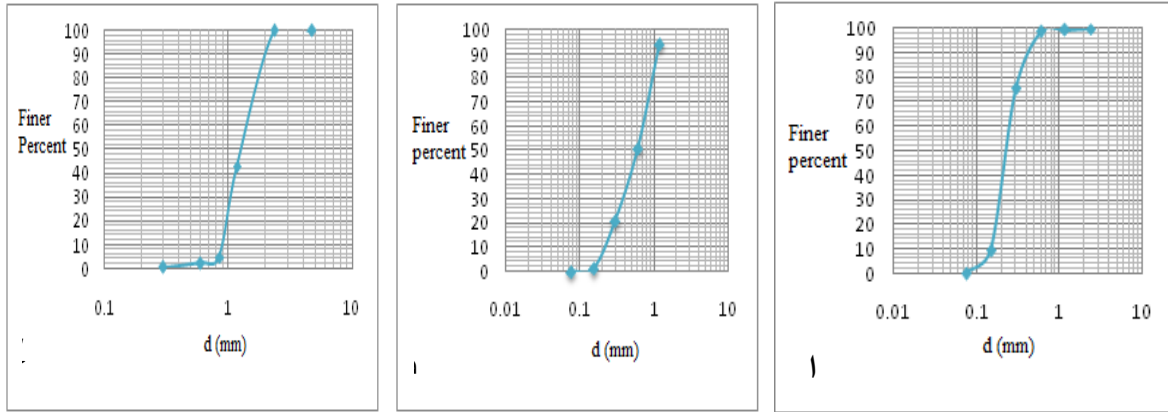
آزمایش دانه‌بندی خاک‌ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. شکل (۲) منحنی



شکل ۱- تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و محل قرارگیری پی‌زومترها

کوبیده و سطح آن با کاردک صاف و تراز شد. مدل سد مورد استفاده در آزمایش‌ها شیشه‌ای و دارای طول ۴۵، عرض ۵۵ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر بود که در حدفصل پی‌زومترهای شماره ۶۶ تا ۷۰ قرار گرفت. با روشن کردن پمپ پس از آن که جریان خروجی از پی به حالت ماندگار رسید مقادیر فشار پی‌زومتری برای پی‌زومترهای لایه‌های مختلف برداشت شد. این کار با تغییر آرایش مصالح پی برای شرایط مختلف تکرار شده و داده‌ها جمع‌آوری شدند. جدول (۲) کلیه پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

در مدل آزمایشگاهی مذکور پرده‌ی آب‌بند از جنس پی‌وی‌سی، و موقعیت قرارگیری آن، پاشنه سد بود. همچنین حد فاصل شبکه‌های توری ابتدا و انتهای دستگاه با مصالح درشت به عنوان فیلتر پر شد. با توجه به آرایش مدل، دانه‌بندی‌های متفاوت را روی لایه غیرقابل نفوذ (خاک رس به ضخامت ۴ سانتی‌متر) قرار داده و تا ارتفاع ۳۹ سانتی‌متر کوبیده شد. لوله ورودی مخزن آب بالادست و پایین‌دست را در ارتفاع بالاتر از سطح پی تنظیم کرده و آب توسط پمپ به مخزن پمپاژ شد. پس از چند روز خاک اشباع شده و آب اضافی بالای آن را خالی کرده و دوباره خاک را



شکل ۲- منحنی دانه بندی الف- ۰/۲ میلی متر ب- ۰/۶ میلی متر ج- ۱/۲ میلی متر

جدول ۲- پارامترهای مورد بررسی در آزمایشها

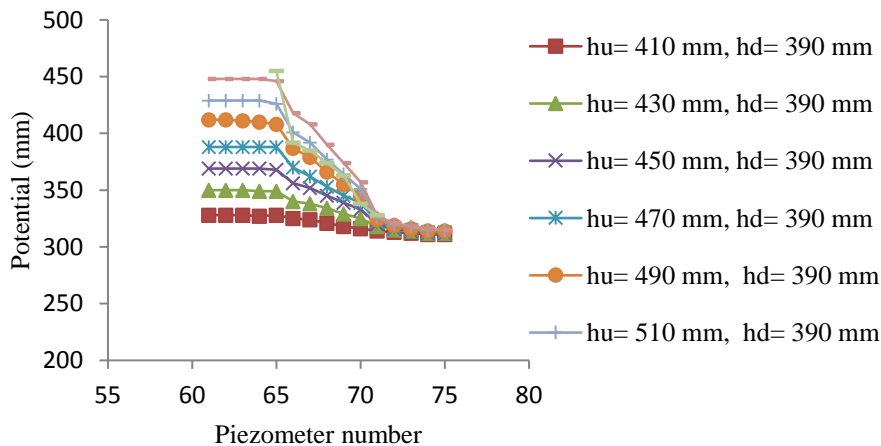
پارامترها	توضیحات
هد بالادست (mm) $h_u$	۳۹۰، ۴۱۰، ۴۳۰، ۴۵۰، ۴۷۰، ۴۹۰، ۵۱۰، ۵۳۰، ۵۵۰، ۵۷۰، ۵۹۰
هد پایین دست (mm) $h_d$	۱۳۰، ۲۶۰، ۳۹۰
قطر متوسط ذرات (mm) $D_{50}$	۰/۲، ۰/۶، ۱/۲
تعداد لایه های خاک	تک لایه، دو لایه، سه لایه
ارتفاع پرده آب بند (cm)	۴/۵، ۹، ۱۳/۵

## نتایج و بحث

### تاثیر هد بالادست بر روی پتانسیل جریان، دبی نشت و گرادیان خروجی در پی یک لایه

شکل (۳) تغییرات پتانسیل را در طول لایه زیر سطح به ازای هد پایین دست ۳۹۰ میلی متر برای پی تک لایه با دانه بندی ۰/۲ میلی متر نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است به ازای هدهای کم، تغییرات زیادی در مقدار پتانسیل مشاهده نشد. برای یک هد ثابت با رسیدن جریان به زیر سد (پیزومتر ۶۶، اولین

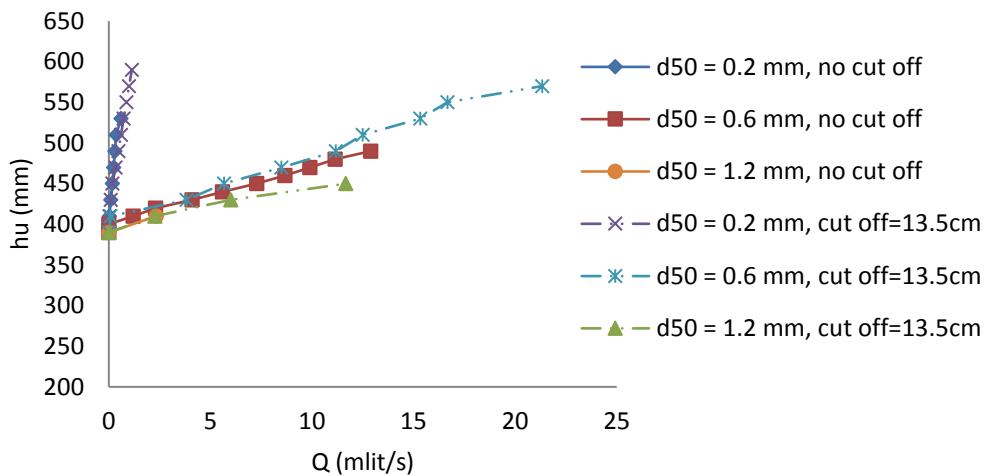
پیزومتر در زیر پاشنه سد) با حرکت افقی جریان در داخل پی مقدار پتانسیل کاهش یافت. این روند برای هدهای مختلف یکسان بود و با افزایش هد بالادست مقدار افت پتانسیل در قسمت زیر سد افزایش یافت. در این شرایط به ازای هد بالادست ۵۴۰ میلی متر در پایین دست سد جوشش اتفاق افتاد و شیب افت پتانسیل در زیر سد ماکزیمم بود. (در کلیه شکلها  $h_u$  نشان دهنده هد بالا دست و  $h_d$  نشان دهنده هد پایین دست می باشد)



شکل ۳- تغییرات پتانسیل برای پی با  $D_{50}=0.2 \text{ mm}$  و  $h_d=390 \text{ mm}$

محدوده تغییرات دبی کم و شیب تغییرات تند است که دلیل آن را می‌توان نفوذپذیری کم پی ۰/۲ میلی‌متر دانست. استفاده از پرده آب‌بند تغییری در روند تغییرات دبی نداشت بلکه فقط وقوع پدیده جوشش را به تاخیر انداخت.

شکل (۴) تغییرات دبی جریان را در برابر هد بالادست برای پی با دانه‌بندی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش هد بالادست مقدار دبی خروجی افزایش می‌یابد که روند افزایش برای دانه‌بندی ۰/۶ و ۱/۲۵ میلی‌متر مشابه و شیب تغییرات آن ملایم بوده اما برای دانه‌بندی ۰/۲۴ میلی‌متر



شکل ۴- تغییرات دبی در برابر هد بالادست برای پی با دانه‌بندی‌های مختلف

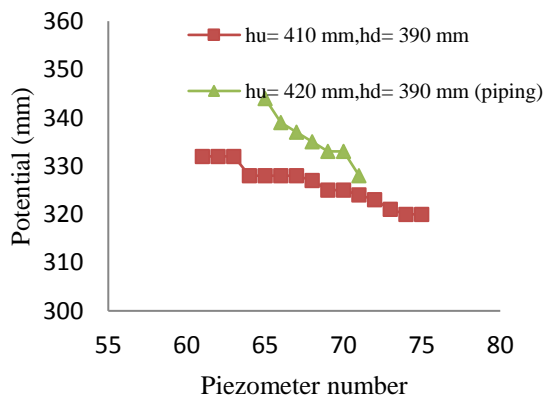
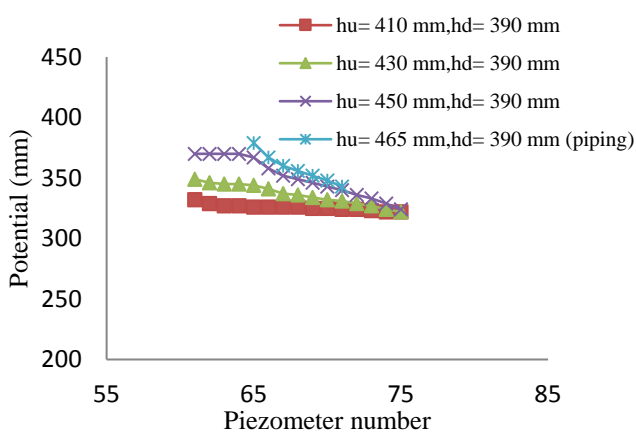
لایه دوم پی درشت‌دانه‌تر می‌باشد، جریان پس از ورود به لایه دوم، بیشتر بواسطه حرکت افقی از این لایه خارج شده و کمتر به سمت پنجه منحرف شده که نتیجه‌ی آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه بود، به همین دلیل جوشش به تاخیر افتاد به طوری که برای لایه دوم با دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر، عملکرد نسبت به دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر بهتر بود و جوشش برای آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر در هد بالادست ۴۶۵ میلی‌متر و برای آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر در هد بالادست ۴۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاد.

#### آرایش پی‌های دو لایه

با توجه به دانه‌بندی ذرات (۰/۲، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر)، شش نوع آرایش برای پی‌های دو لایه ممکن است. ضخامت هر لایه تقریباً نصف کل ضخامت پی (۱۹/۵ سانتیمتر) در نظر گرفته شد. در ادامه نتایج مربوط به آن‌ها ارائه شده است (ترتیب لایه‌ها در پی از بالا به پایین، در متن از سمت چپ به راست نوشته شده است).

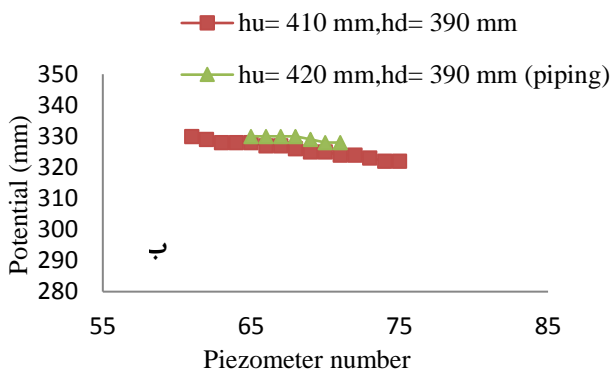
#### آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر و ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است در شرایطی که

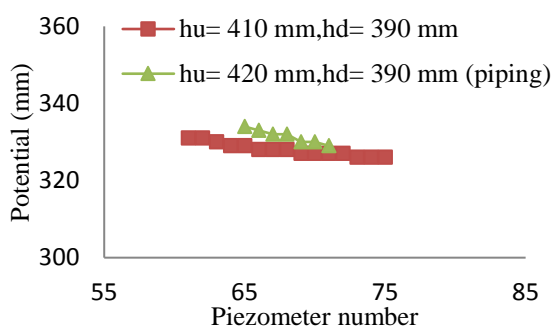


شکل ۵- تغییرات پتانسیل الف- آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر بدون پرده آب‌بند ب- آرایش ۰/۲-۱/۲ میلی‌متر بدون پرده آب‌بند

بواسطه‌ی عبور قسمت عمده‌ی جریان از آن، 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 به ازای هد بالادست ۴۲۰ میلی‌متر جوشش اتفاق افتاد. دلیل آن بالاتر بودن هدایت هیدرولیکی لایه اول و انرژی بیشتر آن در قسمت خروجی است. البته برای آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر مقدار پتانسیل در زیر سد در مقایسه با آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر کمی کمتر بود که دلیل آن را می‌توان خروج بیشتر جریان از لایه با دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر در مقایسه با دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر دانست. در هر دو آرایش وزن مستغرق ذرات با دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر در قسمت پنجه، یک عامل مقاوم در برابر نیروی تراوش است (شکل‌های ۷-الف و ۷-ب).



شکل ۶- تغییرات پتانسیل الف- آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بندب- آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند



شکل ۷- تغییرات پتانسیل الف- آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند ب- آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر، بدون پرده آب‌بند

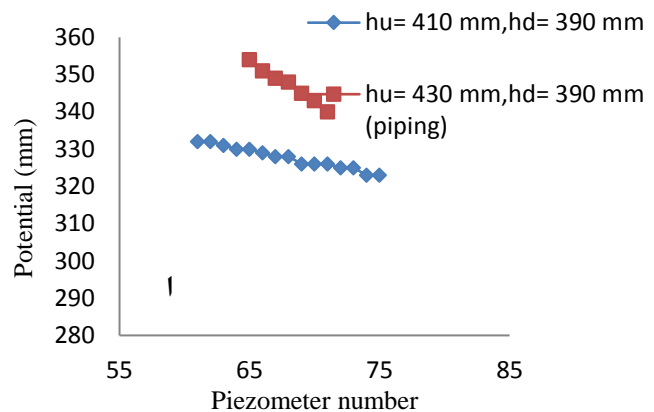
در این آرایش به منظور جلوگیری از وقوع پدیده جوشش باید در قسمت پنجه اقدامات حفاظتی انجام داد (شکل ۸-الف). بررسی نتایج نشان داد که ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها از سطح به کف در کنترل دبی نشت تاثیرگذار است، به طوری که برای دو آرایش ۰/۶-۰/۲ و ۰/۲-۰/۶ برای یک هد بالادست ثابت، آرایش ۰/۶-۰/۲ در کنترل دبی نشت موثرتر است، که علت آن را می‌توان نفوذپذیری پایین لایه ۰/۲ میلی‌متر و نقش آن در کاهش جریان

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

در این شرایط برای هدهای بالادست کم، روند تغییرات پتانسیل برای هر دو آرایش تقریباً یکسان بود. می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که در بررسی پدیده جوشش در پی‌های دو لایه‌ای، اگر خاک سطح دارای اندازه متوسط باشد، عملاً دانه‌بندی لایه دوم تاثیری بر روی کنترل پدیده جوشش نخواهد داشت، هرچند که لایه دوم دانه‌بندی ریز (۰/۲ میلی‌متر) و یا درشت (۱/۲ میلی‌متر) داشته باشد. با توجه به مطالب فوق، برای آرایش ۰/۶-۰/۲ و ۰/۶-۱/۲ میلی‌متر به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۳۰ میلی‌متر و ۴۲۰ میلی‌متر جوشش اتفاق افتاد (شکل‌های ۶-الف و ۶-ب).

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

در این حالت با توجه به اینکه لایه اول درشت دانه‌تر می‌باشد و

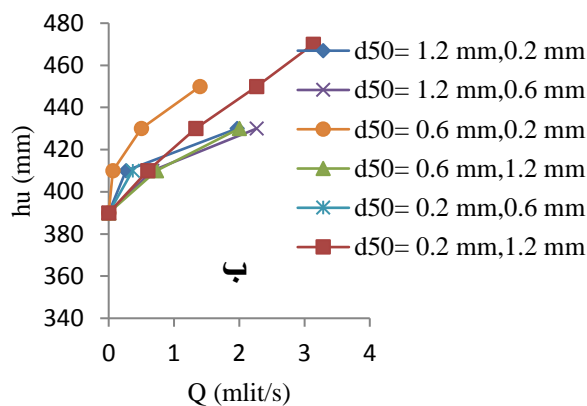


#### دبی نشت

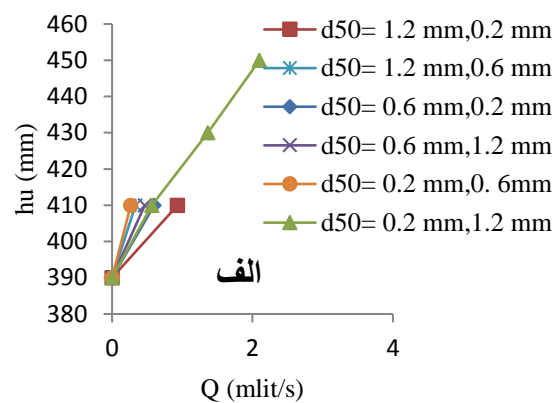
بررسی روند تغییرات دبی نشت برای هدهای بالادست مختلف نشان داد که بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت مربوط به شرایطی است که پی، ریزترین دانه‌بندی را داشته باشد، زیرا هر چه دانه‌بندی ریزتر باشد، هدایت هیدرولیکی خاک کمتر و در نتیجه مطابق رابطه‌ی داری نیز دبی عبوری حداقل خواهد بود. بنابراین آرایش ۰/۶-۰/۲ میلی‌متر حداقل دبی نشت را داشت، البته



پرده آب‌بند، روند تغییرات دبی خروجی را برای هدهای بالاتر نسبت به شرایط بدون پرده آب‌بند تغییر داد. آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر نیز بهترین عملکرد را در کنترل پدیده جوشش داشت، البته روند آن تقریباً مشابه حالت بدون پرده آب‌بند بود، با این تفاوت که به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر جوشش اتفاق افتاد که دلیل آن را می‌توان نقش پرده آب‌بند در افزایش طول مسیر و افت پتانسیل دانست.



شکل ۸- تغییرات دبی در برابر هد بالادست الف- آرایش‌های دو لایه، بدون پرده آب‌بند ب- آرایش‌های دو لایه، با پرده آب‌بند



ب). کاربرد پرده آب‌بند در واقع عملکرد آرایش لایه‌ها را در کاهش گرادیان خروجی تغییر می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۹-ب می‌توان نتیجه گرفت که در حضور پرده آب‌بند ترتیب آرایش لایه‌ها از کف به سطح، عملکرد بهتری را در کاهش گرادیان خروجی نشان می‌دهد.

#### آرایش پی‌های سه لایه

با توجه به سه نوع دانه‌بندی ذرات (۱/۲-۲/۱۰-۶/۲) میلی‌متر) و سه لایه، در مجموع شش آرایش ممکن است که ضخامت هر لایه با توجه به ضخامت کل پی، ۱۳ سانتیمتر بود.

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

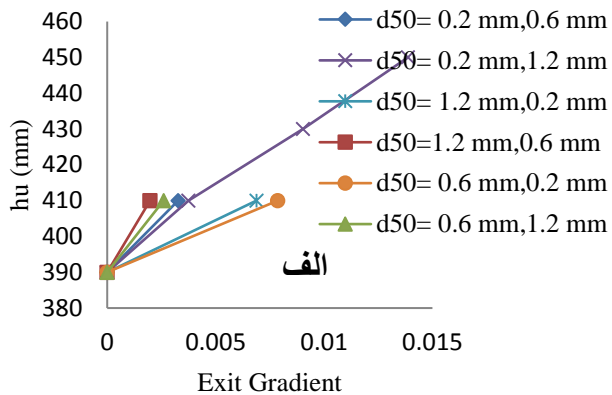
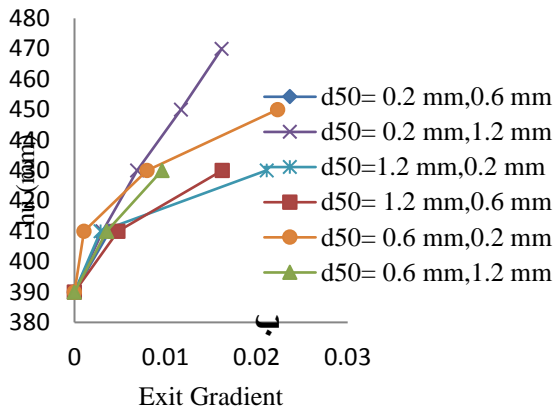
در شرایطی که دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در لایه‌ی دوم قرار دارد، جریان ورودی به لایه‌ی ۱/۲ میلی‌متر، با توجه به نفوذپذیری کمتر لایه دوم، کمتر از این لایه عبور خواهد کرد که نتیجه آن افزایش پتانسیل، نیروی تراوش در لایه‌ی اول و احتمال وقوع جوشش است. به‌طوری‌که به ازای هد بالادست ۴۱۵ میلی‌متر جوشش اتفاق افتاد (شکل ۱۰-الف). 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 شده و جوشش در هد بالادست ۴۴۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل ۱۰-ب).

ورودی بالادست به داخل پی دانست. مقدار دبی عبوری در این آرایش ۰/۲۶۶ میلی‌لیتر بر ثانیه بود. در حضور پرده آب‌بند نیز بهترین عملکرد در کنترل دبی نشت مربوط به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر بود. با توجه به ارتفاع ۱۳/۵ سانتیمتری پرده آب‌بند، در مقایسه با حالت بدون پرده آب‌بند، وجود پرده آب‌بند سبب انحراف جریان به سمت لایه پایین‌تر شده و به دلیل نفوذپذیری کم لایه دوم، دبی نشت کاهش یافت (شکل ۸-ب). همچنین نصب

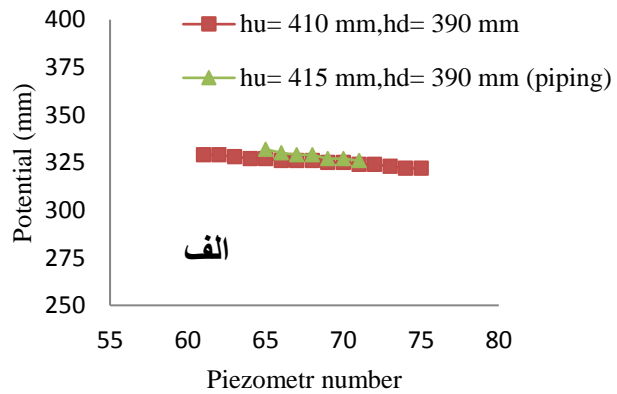
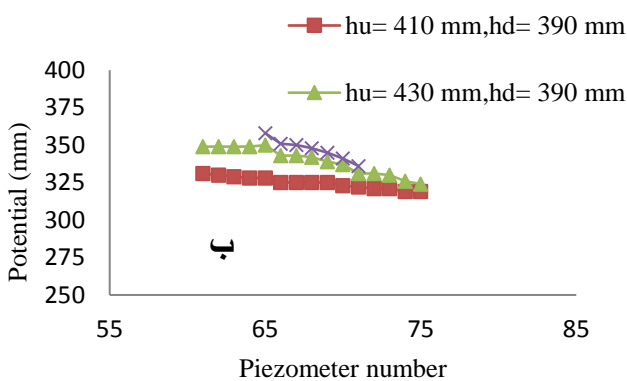
#### گرادیان هیدرولیکی

در آرایش‌های دو لایه، در حالت بدون پرده آب‌بند بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۲ بود (شکل ۹-الف). علت آن دانه‌بندی درشت پی و افت پتانسیل کم جریان در این نوع دانه‌بندی است. مقایسه آن با آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر (۰/۰۰۲۶) نیز نشان می‌دهد که هرچه لایه نزدیک سطح درشت‌دانه‌تر باشد، مقدار افت پتانسیل و در نتیجه گرادیان خروجی آن کمتر است به طوری که برای آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر گرادیان خروجی در حدود ۰/۰۲۳ کاهش یافته است. در این حالت نیز بهترین آرایش در به تاخیر انداختن پدیده جوشش مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۲ میلی‌متر است که علت آن وجود دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در نزدیک سطح و نفوذپذیری پایین‌تر آن است.

در حالتی که در قسمت پاشنه از پرده آب‌بند استفاده می‌شود، بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۰/۲-۰/۶ میلی‌متر بود. با توجه به طول پرده آب‌بند که بخش عمده‌ای از ضخامت لایه اول را در بر می‌گیرد، بیشتر جریان عبوری از لایه ریزدانه در کف عبور کرده و طول مسیر جریان نیز افزایش می‌یابد که نتیجه‌ی آن کاهش گرادیان هیدرولیکی است. به طوری که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر، گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۰۱۱ بود (شکل ۹-ب).



شکل ۹- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست الف - آرایش‌های دو لایه، بدون پرده آب‌بندب- با پرده آب‌بند



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

می‌توان آرایش صعودی ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و نزولی ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر دانست. علت عملکرد مناسب مدل صعودی ناشی از حرکت راحت‌تر جریان به درون لایه‌های پایین‌تر و زهکشی افقی در این لایه‌ها است و در آرایش صعودی ناشی از وزن مستغرق بیشتر ذرات با توجه به دانه‌بندی درشت‌تر لایه اول در قسمت پنجه و افت پتانسیل ناچیز در طول ردیف نزدیک سطح است، که کاهش گرادیان خروجی و نیروی تراوش را به دنبال دارد (شکل ۱۳- الف).

کاربرد پرده آب‌بند نیز علاوه بر افزایش طول مسیر جریان عبوری از داخل پی، نیروی تراوش را کاهش داده که نتیجه آن به تاخیر افتادن پدیده جوشش می‌باشد که برای آرایش‌های سه لایه نیز استفاده از پرده آب‌بند برای دو آرایش صعودی ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و نزولی ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را داشت و به ترتیب پدیده جوشش به ازای هد بالادست ۴۹۰ میلی‌متر و ۴۸۰ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل ۱۳- ب).

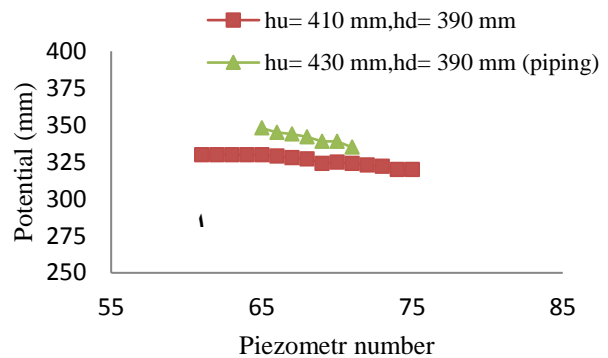
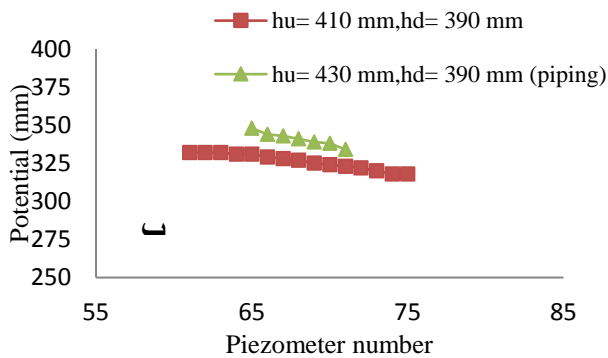
#### آرایش ۰/۲-۰/۲-۰/۶ و ۰/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر

همان‌طور که در شکل‌های (۱۱- الف و ۱۱- ب) مشخص است برای دو آرایش روند تغییرات پتانسیل تفاوت چندانی با هم نداشت به طوری که برای هر دو آرایش، جوشش به ازای هد بالادست ۴۳۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که آرایش لایه دوم و سوم تاثیری بر روی جریان ورودی به لایه اول ندارد.

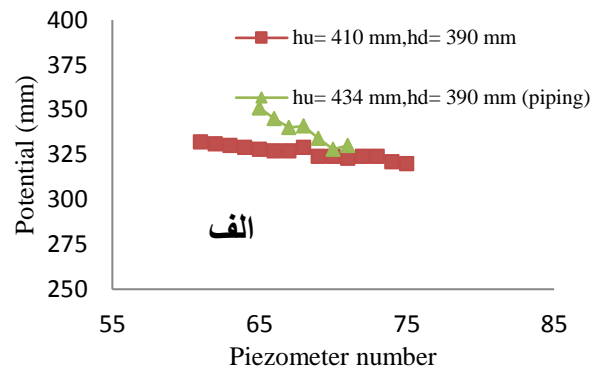
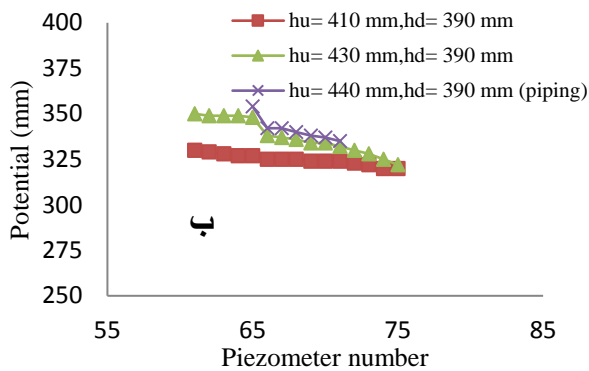
#### آرایش ۰/۲-۰/۶-۰/۲ و ۰/۲-۰/۲-۰/۶ میلی‌متر

در دو آرایش ۰/۲-۰/۶-۰/۲ و ۰/۲-۰/۲-۰/۶ میلی‌متر، روند تغییرات پتانسیل تقریباً مشابه هم بود و پدیده جوشش برای هر دو مدل به ترتیب به ازای هد بالادست ۴۴۰ و ۴۳۴ میلی‌متر اتفاق افتاد (شکل‌های ۱۲- الف و ۱۲- ب). در این حالت با توجه به دانه‌بندی لایه‌ی دوم و سوم، جریان عبوری بیشتر از آن‌ها عبور کرده و زهکشی لایه‌ی اول راحت‌تر اتفاق افتاده که نتیجه آن کاهش پتانسیل در قسمت خروجی است.

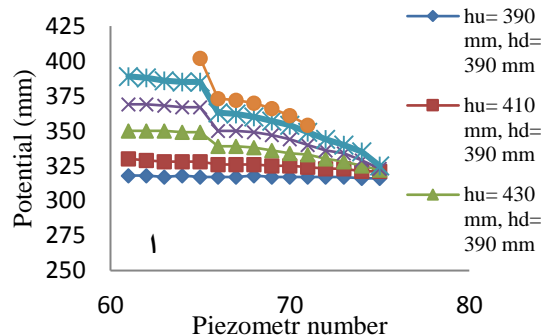
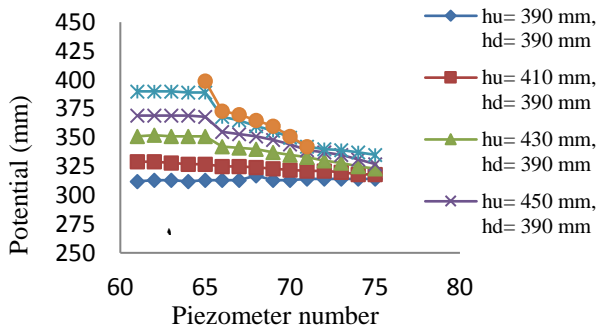
در آرایش‌های سه لایه بهترین مدل‌ها را در کنترل جوشش



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



شکل ۱۲- تغییرات پتانسیل الف-آرایش سه لایه ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلیمتر، بدون پرده آب‌بندب- آرایش سه لایه ۰/۲-۰/۶-۱/۲ میلیمتر، بدون پرده آب‌بند



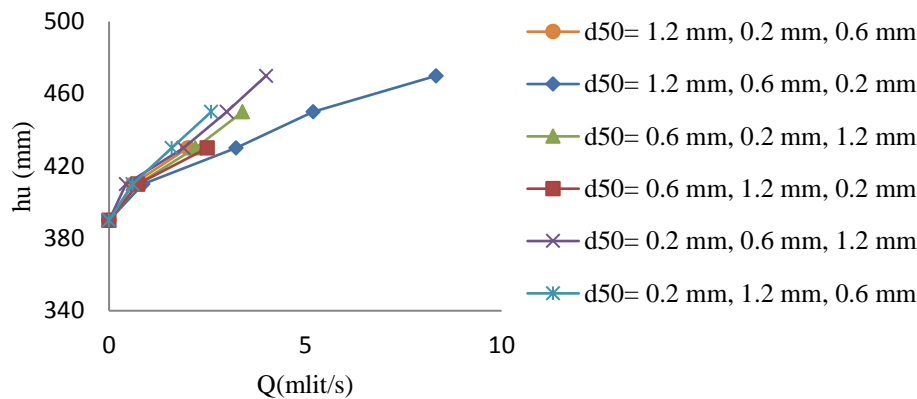
شکل ۱۳- تغییرات پتانسیل الف- آرایش سه لایه ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلیمتر، بدون پرده آب‌بندب- آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلیمتر، با پرده آب‌بند

ریزدانه نزدیک سطح قرار دارد با ورود جریان به داخل پی، با توجه به نفوذپذیری کم دانه‌بندی ۰/۲ میلیمتر، بیشترین افت انرژی اتفاق افتاد که نتیجه آن کاهش گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت 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 و دبی نشت خواهد شد. استفاده از پرده آب‌بند در لایه اول، با افزایش طول مسیر، عملکرد این لایه را در کاهش دبی نشت افزایش داد.

#### دبی نشت

در حالت بدون پرده آب‌بند بهترین آرایش به لحاظ کنترل دبی نشت را می‌توان مربوط به آرایش صعودی ۰/۲-۱/۲-۰/۶ میلیمتر دانست که در هد ۴۱۰ میلی‌متر، دبی نشت آن در حدود ۰/۵۳۳ بود. دلیل آن را می‌توان نفوذپذیری کم لایه اول دانست.

استفاده از پرده در پاشنه سد آب‌بند نیز تاثیر زیادی در کنترل دبی نشت آرایش‌های مختلف سه لایه داشت. در این حالت آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلیمتر بهترین عملکرد را نشان داد و مقدار دبی نشت ۰/۴۳۳ به دست آمد (شکل ۱۴). هنگامی که لایه

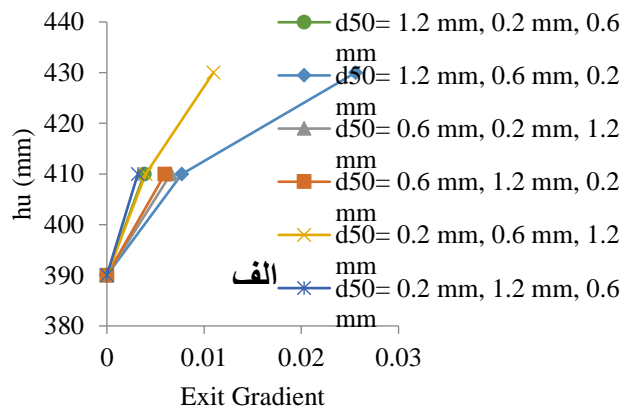
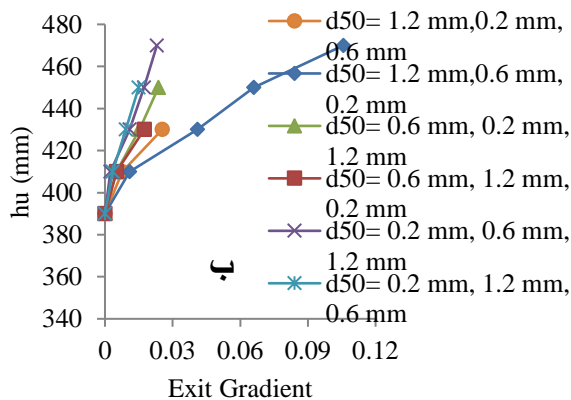


شکل ۱۴- تغییرات دبی جریان در برابر هد بالادست برای آرایش‌های مختلف سه لایه در حضور پرده آب‌بند

آب‌بند که تمام ضخامت لایه اول را در بر می‌گیرد، بیشتر جریان عبوری از لایه‌های درشت‌دانه در کف عبور کرده که نتیجه آن کاهش نیروی تراوش در قسمت پنجه بود. این شرایط به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر و گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۲۵ ایجاد شد که در مقایسه با حالت بدون پرده آب‌بند در حدود ۲۲٪ کاهش نشان داد (شکل ۱۵-ب). همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است استفاده از پرده آب‌بند شیب تغییرات گرادیان خروجی را در برابر هد بالادست افزایش داد.

### گرادیان خروجی

در حالت بدون پرده آب‌بند بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۰/۶-۲/۲ میلی‌متر بود که به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر و گرادیان هیدرولیکی در حدود ۰/۰۳۲ اتفاق افتاد. علت را می‌توان کاهش دبی عبوری از لایه اول و زهکشی و خروج افقی جریان در لایه‌های دوم و سوم دانست (شکل ۱۵-الف). در شرایطی که در قسمت پاشنه از پرده آب‌بند استفاده شود، بهترین عملکرد نیز مربوط به آرایش ۰/۶-۱/۲-۰/۲ میلی‌متر بود. با توجه به طول پرده



شکل ۱۵- تغییرات گرادیان خروجی در برابر هد بالادست الف- آرایش‌های سه لایه، بدون پرده آب‌بند ب- با پرده آب‌بند

لایه و سه لایه، افت پتانسیل مشابه هم بود و بهترین عملکرد مربوط به آرایش سه لایه ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود که در حدود ۴۱/۱۷٪ پتانسیل را کاهش داد. علت آن را می‌توان زهکشی و حرکت افقی بخشی از جریان از لایه‌ی دوم و سوم دانست (شکل ۱۷).

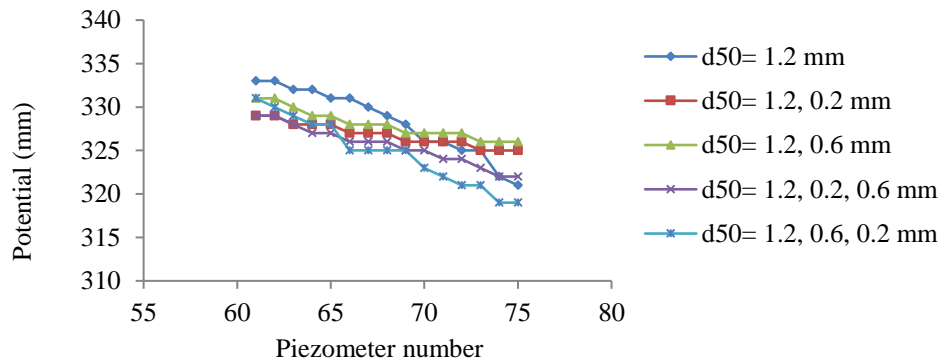
برای دانه‌بندی ۰/۶ میلی‌متر نیز آرایش‌های دو لایه یا سه لایه سبب افت پتانسیل در طول ردیف نزدیک سطح خواهد شد که برای آرایش‌های سه لایه مقدار افت در مقایسه با تک لایه ناچیز است، اما برای آرایش‌های دو لایه عملکرد بهتر بوده، به‌طوری‌که مقدار کاهش افت برای آرایش ۱/۲-۰/۶ میلی‌متر در حدود

مقایسه تغییرات پتانسیل در آرایش‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه برای دانه‌بندی ۱/۲ میلی‌متر، آرایش دو لایه با دانه‌بندی ریزتر (۰/۲ یا ۰/۶ میلی‌متر)، مقدار افت پتانسیل در طول لایه حداقل خواهد بود و به ترتیب ۶۶/۶۷٪ و ۵۸/۳۳٪ نسبت به تک‌لایه (۱/۲ میلی‌متر) کاهش یافت. برای آرایش سه لایه نیز هنگامی که دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر در لایه دوم قرار می‌گیرد مقدار افت پتانسیل کمتر خواهد بود که مقدار آن نسبت به آرایش تک لایه ۴۱/۶۷٪ کاهش یافت (شکل ۱۶).

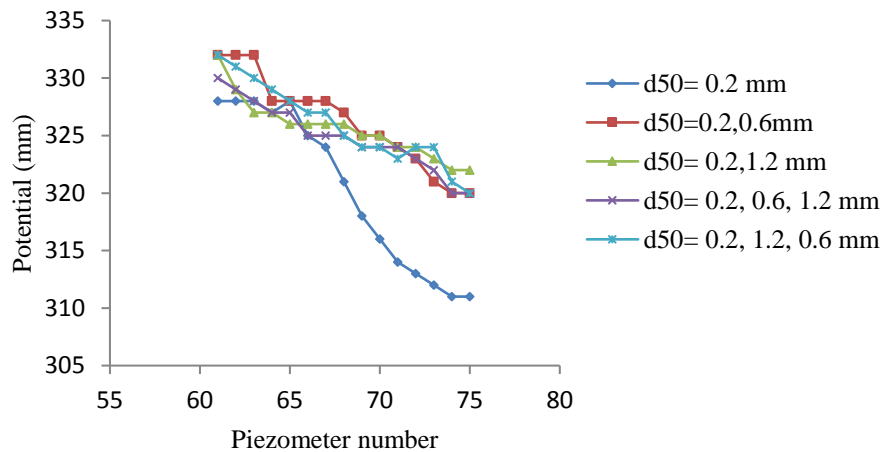
برای دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر، تقریباً برای همه آرایش‌های دو

لغزش حول پنجه، مهم و تاثیر گذار است. شبکه جریان و خطوط هم پتانسیل درحالتی که پرده آببند نصب نشده، توسط نرم افزار Seep/W ترسیم گردید (شکل ۱۹).

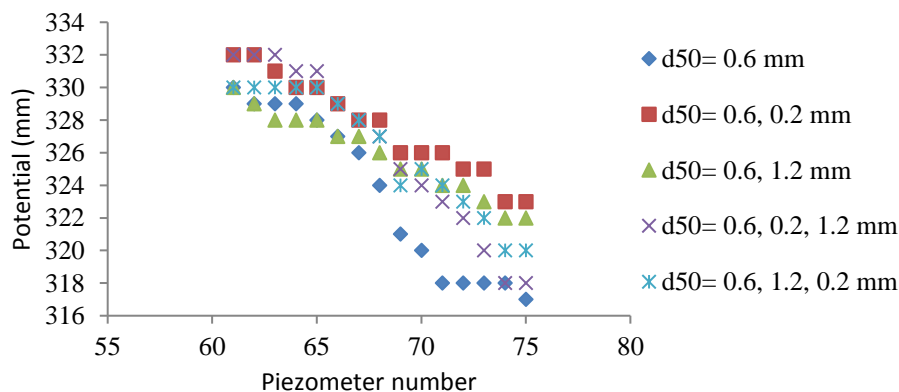
۳۸/۴۶ بود (شکل ۱۸). بررسی نتایج پی‌های تک لایه و چند لایه نشان داد که استفاده از پی‌های چند لایه می‌تواند راهکاری موثر در کاهش میزان افت پتانسیل باشد که در کاهش گرادیان خروجی، کنترل پدیده جوشش، دبی نشت و پایداری در برابر



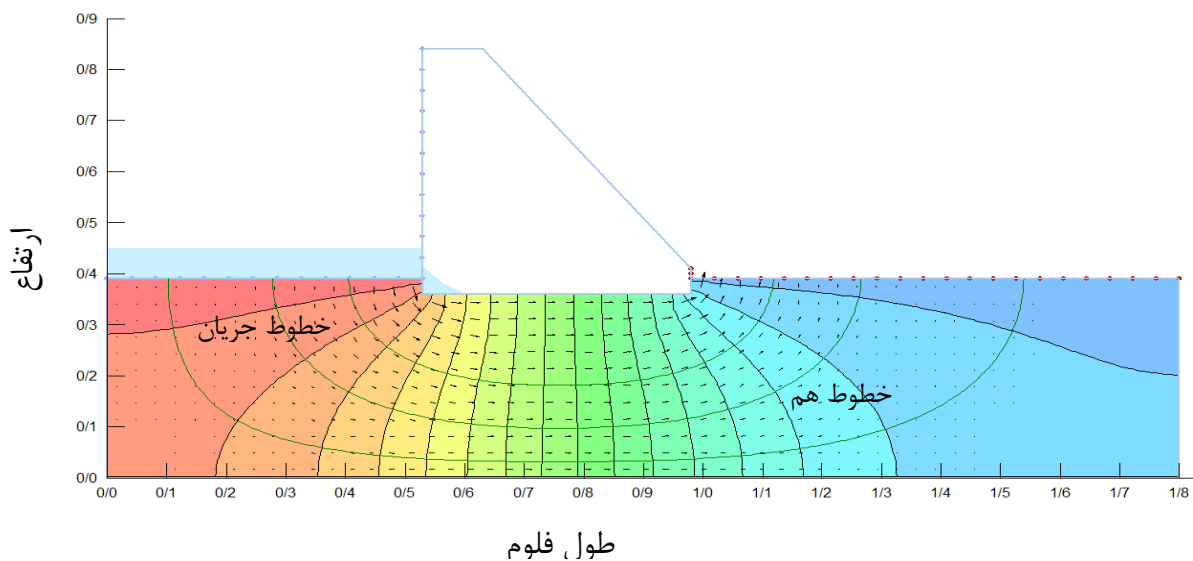
شکل ۱۶- تغییرات پتانسیل برای آرایش های مختلف دانه بندی ۱/۲ میلیمتر



شکل ۱۷- تغییرات پتانسیل برای آرایش های مختلف دانه بندی ۰/۲ میلیمتر



شکل ۱۸- تغییرات پتانسیل مربوط به آرایش های مختلف دانه بندی ۰/۶ میلیمتر



شکل ۱۹- ترسیم شبکه جریان و خطوط هم پتانسیل بدون نصب پرده آب بند

## نتیجه گیری

بهترین مدل‌ها را در کنترل جوشش می‌توان آرایش صعودی ۱/۲-۰/۲-۰/۰۲ میلی‌متر و نزولی ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر دانست. استفاده از پرده آب‌بند نیز تاثیر زیادی در کنترل دبی نشت آرایش‌های مختلف سه لایه داشت. در این حالت آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان داد و مقدار دبی نشت ۰/۴۳۳ میلی لیتر بر ثانیه به دست آمد. در کنترل گرادیان خروجی، در حالت بدون پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند به ترتیب بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر، با مقدار ۰/۰۰۳۲ و آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر با مقدار ۰/۰۰۲۵ به ازای هد بالادست ۴۱۰ میلی‌متر به دست آمد. بررسی نهایی نتایج نشان داد که استفاده از پی‌های چند لایه به صورت ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر می‌تواند راهکاری موثر در کنترل پارامترهای نشت باشد. همچنین استفاده از پرده آب‌بند مقدار نشت و گرادیان خروجی از زیر سد را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

در این تحقیق به بررسی پارامترهای نشت در پی‌های دو لایه و سه لایه تحت آرایش‌های مختلف پرداخته شد. نتایج نشان داد که برای پی یک لایه با دانه‌بندی ۰/۲ میلی‌متر، با افزایش هد بالادست مقدار افت در قسمت زیر سد افزایش یافت. در این شرایط به ازای هد بالادست ۵۴۰ میلی‌متر، در پایین دست سد جوشش اتفاق افتاد. استفاده از پرده آب‌بند تغییری در روند تغییرات دبی نداشت بلکه فقط وقوع پدیده جوشش را به تاخیر انداخت. برای پی دو لایه، آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر، بهترین عملکرد را در کاهش پتانسیل داشت و جوشش در هد بالادست ۴۶۵ میلی‌متر رخ داد. همچنین آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر نیز حداقل دبی نشت را داشت. در کنترل گرادیان خروجی در حالت بدون پرده آب‌بند، بهترین عملکرد مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر و با وجود پرده آب‌بند، مربوط به آرایش ۱/۲-۰/۶-۰/۲ میلی‌متر بود. در آرایش‌های سه لایه

## REFERENCES

- Abedi Koupaei, J. (1991). Investigation of effective factors on uplift pressure upon sustainability of diversion dams by using finite difference. Msc. Dissertation, University of Tarbiat Modarres, Iran. (in Farsi)
- Abolpour, B. (1994). Estimation methods of seepage, split and piping in hydraulic structures with computer modeling. Msc. dissertation, University of Shiraz, Iran. (in Farsi)
- Alnealy, H. K. T. and Alghazali, N. O. S. (2015). Analysis of seepage under hydraulic structures using slide program. *American Journal of Civil Engineering*, 3(4), 116-124.
- Arun, K. Jain, A. M. Lakshmi, N. and Reddi, M. (2012). Closed-Form theoretical solution for finite-depth seepage below flat apron with equal end cutoffs and a downstream step. *Journal of Hydraulic Engineering*, 17(12), 1358-1367.
- Ashraf, A. A. (2013). Stochastic analysis of seepage under hydraulic structures resting on anisotropic heterogeneous soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 101-104.
- Fredlund, D. G. and Rehardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley & Sons.
- Ghobadian, R. Khodaei, K. (2009). Effects of cutoff wall and drain on uplift pressure and exit gradient under hydraulic structure by numerical solution of general equation of fluid flow in soil using finite volume method. *Journal of water and soil*, 23(1), 148-160. (in Farsi)
- Goel, A. and Pillai, N. N. (2010). Variation of exit

- gradient downstream of weirs on permeable foundations. *Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1), 28–36.
- Hedayati, T. H. Lashkaripour, Gh. R. Ghafoori, M. and Abbas Ali, S. (2015). Assessment and presentation of a treatment method to seepage problems of the alluvial foundation of Ghordanloo Dam, NE Iran. *Journal of Geological Society of India*, 85, 377-384.
- Hongqi, M. and Fudong, C. (2016). Major Technologies for safe construction of high earth-rockfill dams. *Engineering*, 2, 498-509.
- Khalili Shayan, H. Amiri Tokaldany, H. (2014). Effects of blanket, drains, and cutoff wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structures. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4), 486-500.
- Liu, R. Li, B. and Jiang, Y. (2016). Critical hydraulic gradient for nonlinear flow through rock fracture networks: The roles of aperture, surface roughness, and number of intersections. *Advance Water Resources*, 88, 53–65.
- Luo, Y. L. Wu, Q. Zhan, M. L. and Sheng, J. C. (2012). Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states. *Rock Soil Mechanics*, 36, 73–78.
- Mansuri, B. Salmasi, F. Oghati, B. (2014). Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dams. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 1165-1173.
- Moharrami, A. Moradi, Gh. Hajjalilue Bonab, M. Katebi, J. and Moharrami, Gh. (2014). Performance of cut-off walls under hydraulic structures against uplift pressure and piping phenomenon. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 95–103.
- Obead, I. H. Al-Baghdadi, H. M. and Hamad, R. (2014). Reducing the impact of uplift pressures on the base of a concrete dam by configuration of drainage holes (hypothetical case study). *Civil and Environmental Research*, 6, 120–131.
- Pedro, J. A. John, T. M. N. and Timothy, D. S. (2009). Evaluation of seepage from an embankment dam retaining Fly Ash. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(6), 406-414.
- Pour Eskandar, S. Farsadizadeh, D. and Husseinzadeh Dalir, D. (2012). Experimental and numerical study of the effects of epithelium basement membrane seal the leak in the dam. In: *Proceedings of 11th Iranian Hydraulic Conference*, 7-9 Nov., University of Orumia, Iran, pp.714 -719. (In Farsi)
- Quanyi, X. Jian, L. Han, B. Hongtao, L. Yuying, L. and Xuanzheng, L. (2018). Critical Hydraulic Gradient of Internal Erosion at the Soil–Structure Interface. *Processes*, 92(6), 1-15.
- Ren, J. Shen, Z. Yang, J. and Li, B. (2015). Characteristic study on seepage field of dam under cutoff wall construction defects and freeze in winter. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(6), 1094-1098.
- Rostami, G. R. Esmaili, K. Ziaei, A. N. Ansari, H. Khodashenas, S. R. (2012). Study of the effect of porous media on water diversion of a river subsurface intake with cut-off wall. *Journal of water and Soil*, 26(4), 1032-1041. (in Farsi)
- Schnellmann, R.M. Busslinger, H. Schneider, R. and Rahardjo, H. (2010). Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology*, 114, 71-83.
- Sedghi Asl, M. Rahimi, H. Khaleghi, H. (2012). Laboratory Investigation of the seepage Control Measures under Coastal Dikes. *Experimental Techniques*, 36(1), 61-71.
- Sedghi Asl, M. Rahimi, H. Khaleghi, H. (2010). Experimental Analysis of Seepage Flow under Coastal Dikes. *Experimental techniques*, 34(4), 49-54.
- Shaikh Rezazadeh Nikoo, N. Khalaili Shayan, H. Amiri, E. (2012). 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. In: *Proceedings of 11th Iranian Hydraulic Conference*, 7-9 Nov., University of Orumia, Iran, pp.887-893. (in Farsi)
- Uday, A. M. and Hasan, H. M. (2016). Optimal location of drainage gallery under gravity dam by using finite element method. *International Journal Multidisciplinary Research Mod Educational*, 2, 611–622.
- Vicent, S. Van An, T. and Sung-Ryul, K. (2018). Numerical Investigation on Seepage Discharge Inside a Cylindrical Cut-off Wall. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(10), 51-60
- Xiong, H. Wang, Q. Gao, X. Zhou, W. and Gao, M. (2010). Stress deformation analysis of plastic concrete cutoff wall for the first stage cofferdam of Shawan hydropower station. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2, 197-203
- Yifeng, C. Ran, H. Chuangbing, Z. Dianqing, L. Guan, R. and Qinghui J. (2010) A new classification of seepage control mechanisms in geotechnical engineering. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(3), 209-222.
- Yifeng, C. Jiamin, H. Shaolong, T. and Chuangbing, Z. (2016). Characterization of transient groundwater flow through a high arch dam foundation during reservoir impounding. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 462-471.
- Yousefi, F. Sedghi Asl, M. Parvizi, M. (2015). 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*, 46(1), 59-70. (In Farsi)
- Zinal, E. (2011). The effects of cutoff wall angle on seepage under dams. *Journal of Engineering*, 17(5), 1109-1131.