

اثر طول زهکش افقی بر دبی نشتی، نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در سد خاکی همگن توسط شبیه سازی عددی



فصلنامه علمی تخصصی

مهندسی و مدیریت ساخت

سال اول، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵

نویسنده مسئول:

علی محمود

آدرس ایمیل:

Ali.mahmoud.edu@gmail.com

علی محمود*

کارشناس ارشد مهندسی سازه های آبی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

محمد بدخشان

کارشناس ارشد مهندسی سازه های آبی دانشگاه تبریز

ابوذر سیفی

کارشناس ارشد مهندسی سازه های آبی دانشگاه تبریز

چکیده:

به دلیل نقش موثر سد های خاکی در تامین نیاز های آبی و نیز ایجاد خطرات بالقوه برای جوامع پایین دست آنها، مسائل مربوط به ایمنی سدهای خاکی ضمن ساخت و نیز در دوران بهره برداری از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق به مطالعه و مقایسه کارایی استفاده از زهکش افقی، در کاهش اثرات سوء نشت از مقطع یک سد خاکی همگن فرضی پرداخته شده است. دبی نشت از پی و بدنه و نیز گرادیان خروجی حداکثر در پنجه سد با بهره گیری از نرم افزار Seep/W مبتنی بر روش اجزای محدود محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش طول زهکش افقی متناسب با دبی نشتی از سد بوده و نسبت عکس با نیروی زیر فشار دارد. همچنین با افزایش طول زهکش افقی کمی بر گرادیان هیدرولیکی افزوده می شود، ولی افزایش آن در محل آب خروجی از پنجه نبوده و لذا خطر ساز نخواهد بود.

کلمات کلیدی: نشت، زهکش، زیر فشار، گرادیان خروجی، نرم افزار Seep/W

The Effect On The Leakage Flow Along The Horizontal Drainage, Power, Drifted And Hydraulic Gradient In Homogeneous Earth Dam By Numerical Simulation



V. 01 No. 03 - autumn 2016

Corresponding author:

Ali Mahmoud

Email address:

Ali.mahmoud.edu@gmail.com

Ali Mahmoud*

Hydraulic Structures Engineering Islamic Azad University of Kerman

Mohammad Badakhshan

Hydraulic Structures Engineering University of Tabriz

Abozar Seifi

Hydraulic Structures Engineering University of Tabriz

تقاطع خط فریاتیکی با شیب پایین دست، پایداری سد خاکی را به خاطر وجود پتانسیل رگاب (پاییننگ) به دلیل گرادیان خروجی زیاد تحت تاثیر قرار می دهد. موقعی که خاکریز سد ناهمگن است و یا ناحیه پایین دست سد خاکی نفوذپذیری مشکوک دارد، از زهکش افقی برای نگه داری خط فریاتیکی داخل بدنه سد استفاده می شود تا امکان زهکشی را به خاکریز و فونداسیون داده و بدین ترتیب رگاب از داخل آنها محدود شود. از این رو خط فریاتیکی نباید شیب پایین دست را قطع کند.

صیادزاده و زمردیان (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار انسیس به بررسی نشست و گرادیان هیدرولیکی زیر پی سدهای نفوذ ناپذیر (بتنی) پرداخته و نتایج را برای سهولت طراحی به صورت نمودارهای بی بعد ارائه نمودند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۰) معادله عمومی جریان آب در خاک را در شرایط اشباع غیر همگن و غیر همسان به روش احجام محدود منفصل حل کرده و نتایج را با آزمایش بر روی مدل فیزیکی در یک تانک تراوش مقایسه کردند.

نصرالهی (۱۳۹۰) به بررسی ترکیب های مختلف عمق ترانشه و بلانکت رسی برای کاهش نشست از سد خاکی ستارخان اهر پرداخت و به این نتیجه رسید که ترکیب بتوی رسی و ترانشه آب بند میزان نشست از پی را بیشتر کاهش می دهد. موهبت زاده و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی شبیه سازی فیلتر و زهکش در برآورد نشست در سد های خاکی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش میزان گرادیان هیدرولیکی در نزدیکی دیواره آیند می تواند منجر به ایجاد رگاب شود و در این خصوص لازم است برای مهار آن تدابیر مقتضی اتخاذ گردد. کتابداری و سپیانی (۱۳۹۰) به بررسی برآورد فشار هیدرولیکی و تراوش در بستر چند لایه ای سدهای بتنی با استفاده از روش المان مرزی پرداختند. نتایج نشان داد که روش المان مرزی، ابزاری مناسب جهت محاسبه نیروی زیر فشار و تراوش در زیر سدهای بتنی می باشد.

بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در تخمین میزان نشست از هسته رسی سدهای خاکی غیر همگن توسط روشی و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار نشست آب را با دقت زیادی نسبت به سایر روش ها محاسبه می کند. خدائشاس و یار احمدی (۱۳۹۰) به بررسی مقایسه آنالیز دو بعدی و سه بعدی تراوش از سدهای خاکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش عرض دره، نتایج آنالیز تراوش سه بعدی نسبت به نتایج آنالیز دو بعدی به واقعیت نزدیکتر می گردد. در تحقیق جعفر زاده و یار احمدی (۱۳۹۰) در خصوص آنالیز دو بعدی و سه بعدی تراوش آب از سد خاکی هاله نتایج حاکی از تطابق رفتارنگاری ابزار دقیق با شبیه سازی حاصل از تحلیل سه بعدی است. منافور و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی عملکرد هسته مرکزی سد شهر جای ارومیه در مقابله با نشست پرداختند و نتایج حاصل از مدل عددی و اندازه گیری های میدانی نشان داد که رفتار هسته مرکزی سد در برابر نشست آب در تطابق قابل قبولی با معیارهای تراوشی لحاظ شده در طراحی اولیه سد شهر جای ارومیه می باشد.

خلیلی شایان و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی ارزیابی روش های کاهش اثرات نشست و زیرشویی در سدهای خاکی پرداختند. ایشان بیان داشتند که بهترین روش جهت کنترل نشست و گرادیان خروجی به کارگیری دیواره سپری در موقعیت میانی پی همراه با پوشش کامل سنتتیک می باشد. قبادیان و خدایی (۱۳۸۸) به بررسی تاثیرات دیواره آب بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیر سازه های 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 آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیواره آب بند) کاهش می یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان خروجی در موقعیتی که دیواره ی آب بند در پایین دست احداث شود، دیده می شود. برپی و والت (۲۰۰۸) به بررسی مدل سازی نفوذ آب در درز های فونداسیون پرداختند. میشر و سینگ (۲۰۰۵) به مطالعه روش های عددی برای تعیین مقدار تراوش و مکان هندسی خط فریاتیکی پرداختند. ایشان همچنین کاربرد یک فیلتر را مورد بررسی قرار دادند و موقعیت مناسبی را نیز برای آن پیشنهاد کردند. باگو و چاهار (۲۰۰۴) به مطالعه تعیین طول زهکش افقی در سدهای خاکی همگن با لحاظ اثر موینگی خاک پوسته پایین دست پرداختند. در این تحقیق برای محاسبه فاصله خط فریاتیکی با شیب پایین دست و نیز طول زهکش افقی معادله تحلیلی صریح به دست آمده است.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر زهکش افقی سد خاکی بر سه معیار مهم طراحی شامل گرادیان هیدرولیکی، دبی نشست و نیروی زیر فشار است. برای این منظور سد خاکی همگن با پی نفوذپذیر و دارای زهکش افقی توسط نرم افزار Seep/w شبیه سازی می گردد. متغیر های طراحی شامل طول های متفاوت زهکش می باشند.

۲- مواد و روش ها

الف- معادلات اساسی بکار رفته در تحلیل ها

دبی نشست از قانون دارسی پیروی می کند:

$$q = -kA \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \quad (1)$$

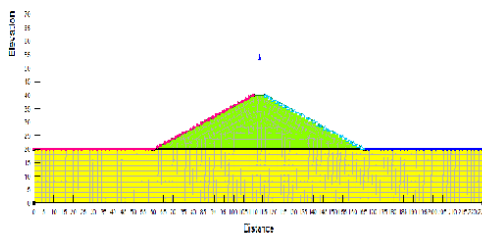
که در آن q دبی نشست (متر مکعب بر ثانیه)، k ضریب نفوذپذیری (متر در ثانیه)، A سطح مقطع جریان آب و خاک (متر مربع) و $\frac{\partial h}{\partial l}$ شیب هیدرولیکی جریان است. معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پواسون است که شکل تعمیم یافته معادله معروف لاپلاس است:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = q \quad (2)$$

که در آن k_x و k_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر در ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی به توده خاک (متر مکعب بر ثانیه در واحد سطح) است. رابطه فوق برای جریان در شرایط دائمی و خاک همگن صادق است. حل معادله پواسون یکی از مسائل پیچیده ریاضی است و روش های عددی زمینه ای برای حل معادلات دیفرانسیل و تبدیل آنها به مجموعه ای از معادلات جبری است. از جمله نرم افزارهایی که برای حل معادله پواسون با استفاده از روش اجزا محدود مورد استفاده قرار می گیرد، نرم افزار Seep/w است.

ب- نحوه شبیه سازی عددی

در این مطالعه سد خاکی همگن با ابعاد نشان داده شده در شکل (۱) فرض شده است. در تعیین شرایط مرزی، بار آبی با پتانسیل بالادست ۲۸ متر و بار آبی پایاب برابر ۲۰ متر فرض گردید. همچنین کف و دیوارهای سمت راست و چپ پی و دیواره شیبدار پایین دست پوسته سد نفوذ ناپذیر (دبی برابر صفر) می باشد. در ضمن گره های اطراف زهکش دارای فشار اتمسفر (فشار صفر) است. شیب بالادست و پایین دست پوسته سد خاکی برابر ۱:۷H:۲ و شیب بالادست و پایین دست هسته سد خاکی برابر ۱:۷H:۲۵ می باشد که به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته می شود. محاسبه دبی نشست و گرادیان خروجی در تمام حالات از روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Seep/W (جزئی از بسته نرم افزاری Geo Studio ۲۰۰۷) انجام گردید. تعداد المان های مدل دو بعدی سد ۲۵۹۷ می باشد. با توجه به عدم تاثیر گذاری تغییر طول و عمق پی مدل بر محل خروج آب از بدنه سد و با در نظر گرفتن محدودیت نرم افزار از نظر مدل سازی و تعداد المان، مدلی با گستردگی طولی ۲۲۵ متر و عمق پی ۲۰ متر در نظر گرفته شد. شبیه سازی نشان داد که مقدار دبی عبوری و نیز گرادیان های هیدرولیکی آن با مدل های عمیق تر و طولی تر از خود تفاوت بسیار اندکی دارد. نفوذپذیری اجزای تشکیل دهنده سد خاکی به شرح جدول (۱) می باشد.



شکل (۱): مقطع تیپ سد خاکی مورد مطالعه (مدل مبنا)

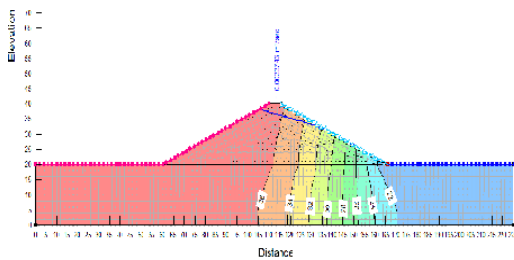
جدول (۱): نفوذ پذیری مصالح مورد استفاده در اجزای سد

نوع مصالح	Ksat (m/sec)
پوسته	۰/۰۰۱
فیلتر	۰/۱
پی	۰/۰۰۰۰۱

علاوه بر شبیه سازی عددی مدل مینا (شکل ۱)، چهار مدل دیگر دارای طول زهکش افقی مختلف در نظر گرفته شد. به طوری که نسبت طول زهکش ها ی افقی به طول ۴۶/۵ متری پایین دست در پی سد به ترتیب برای نمونه زهکش افقی با طول ۲۳/۲۵ متری و ۴۶/۵ متری از پنجه سد، که نشانگر نسبت طول های نسبی ۰/۵ و یک هستند، در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است. همانطوری که در شکل های ۲ و ۳ دیده می شود، در جاهایی که دقت بیشتری مد نظر بوده (اطراف زهکش) از المان های ریزتری استفاده شده است.

دبی نشت از پی و بدنه افزایش می یابد. به طوری که مقدار دبی نشت از پی و بدنه به ترتیب برای طول زهکش پنجه ای ۱۱/۶۲۵، ۲۳/۲۵، ۳۴/۸۷۵ و ۴۶/۵ متری نسبت به حالت مینا برابر با ۸/۷۱٪، ۶۸/۷۵٪، ۱۵۳/۱۳٪، ۲۹۴/۳۹٪ خواهد شد. شیب منحنی نشت از سد برای نسبت طول زهکش افقی برابر ۰/۷۵ تا یک بیشتر شده است که بیانگر تاثیر بیشتر این طول در افزایش دبی نشتی است. لازم به یادآوری است هر چند زهکش افقی در پایین دست سد، بر میزان دبی نشتی از سد می افزاید، ولی این افزایش جزئی است و زهکش مانع پدیده زیر شویی پی یا پاپینگ می گردد که اثرات مثبت آن باعث شده امروزه اکثر سدهای مدرن خاکی دنیا مجهز به سیستم زهکش باشند.

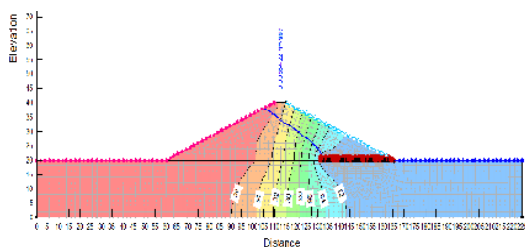
شکل (۵) سد خاکی مدل مینا را پس از شبیه سازی عددی نشان می دهد. در شکل مذکور منحنی های هم پتانسیل بدنه سد و پی آن، خط فریاتیک و نیز دبی نشتی از سازه دیده می شوند.



شکل (۵): نمایش خطوط هم پتانسیل روی سد خاکی مدل مینا

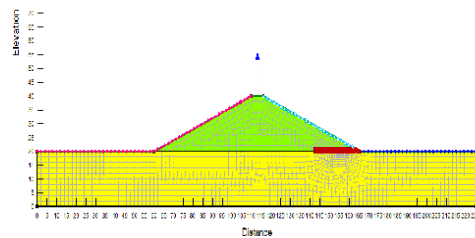
شکل ۵ نشان می دهد که در حالت عدم بکارگیری فیلتر در پنجه ی سد خاکی، خط فریاتیک شیب پایین دست را قطع می کند و باعث ناپایداری شیب پایین دست می شود. برای اینکه پایداری شیب پایین دست حفظ شود لازم است که در پنجه ی سد خاکی از فیلتر استفاده شود تا امکان زهکشی را به خاکریز و فونداسیون داده و بدین ترتیب رگاب از داخل آنها محدود شود. از این رو خط فریاتیک نباید شیب پایین دست را قطع کند.

شکل (۶) سد خاکی با زهکش افقی به طول ۳۴/۸۷۵ متر (طول نسبی ۰/۷۵) پس از شبیه سازی عددی را نشان می دهد. در شکل مذکور منحنی های هم پتانسیل بدنه سد و پی آن، خط فریاتیک و نیز دبی نشتی از سازه دیده می شوند. مشاهده می گردد که خط فریاتیک از شیب بدنه پایین دست فاصله گرفته و بر پایداری شیب می افزاید. لذا می توان وجه پایین دست را با شیب تند تری احداث کرد و در هزینه ها صرفه جویی کرد. ضمناً مطابق شکل ۶، دبی نشتی از بدنه سد برابر ۰/۰۸۵۴۲۲ متر مکعب بر ثانیه در واحد طول سد می باشد.

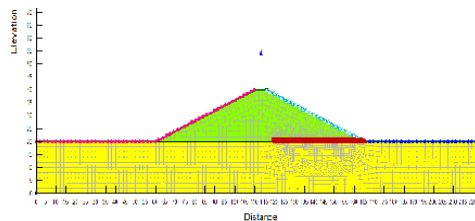


شکل (۶): خطوط هم پتانسیل در مقطع سد خاکی با زهکش افقی به طول ۳۴/۸۷۵ متر از پنجه سد

نمودار توزیع زیر فشار در پی سد در شکل ۷ ارائه گردیده است. با توجه به شرایط مرزی برای زهکش (فشار صفر یا اتمسفر)، در محدوده زهکش مقادیر زیر فشار صفر گردد. مقادیر زیر فشار در زیر سد خاکی سیر نزولی را به خود گرفته است (مقادیر زیر فشار در زیر سد خاکی تقریباً شبیه به سد بتنی می باشد با این تفاوت که در سد خاکی، در درون سد نیز جریان آب وجود داشته که باعث ایجاد فشار آب می گردد). با توجه به نمودار (۷) می توان به این نتیجه رسید که با افزایش طول زهکش افقی، زیر فشار در زیر سد خاکی کاهش می یابد. کاهش نیروی زیر فشار به دلیل عبور راحت تر آب نشتی است



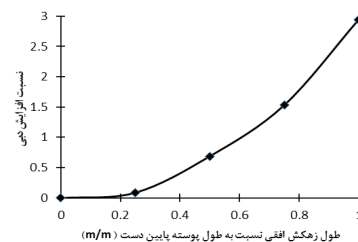
شکل (۲): مقطع سد خاکی با زهکش افقی به طول ۲۳/۲۵ متر از پنجه سد



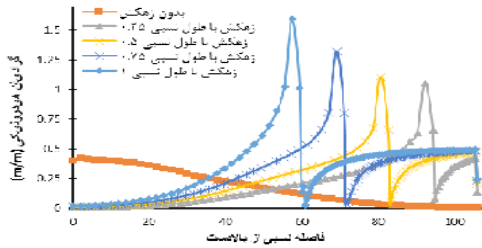
شکل (۳): مقطع سد خاکی با زهکش افقی به طول ۴۶/۵ متر از پنجه سد

۳- نتایج و بحث

به منظور مطالعه تاثیر طول زهکش افقی بر تغییر مقادیر دبی نشت، گزاردان خروجی و نیروی زیر فشار، زهکش افقی در پنجه با طول های ۱۱/۶۲۵، ۲۳/۲۵، ۳۴/۸۷۵ و ۴۶/۵ متری در نظر گرفته شده است. تحلیل مقادیر دبی نشت برای مقطع-ای مورد مطالعه قرار می گیرد که موقعیت قرار گیری آن در ۵۳ متری از پنجه سد را با L نمایش دهیم، فاصله پنجه سد تا محل ۴۶/۵ متری از پنجه سد را با L نمایش دهیم، در این صورت نسبت طول زهکش افقی به طول L برابر مقادیر صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و یک در نظر گرفته شده است. در شکل (۴) نتایج حاصل از شبیه سازی عددی برای محاسبه دبی نشتی از بدنه و پی سد ارائه گردیده است. در ضمن در محور عمودی شکل (۴) از درصد افزایش دبی نشتی نسبت به حالت مینا (بدون وجود زهکش در شکل ۱) استفاده شده است.



شکل (۴): دبی عبوری از سد در شرایط طول زهکش های افقی مختلف (۴) ملاحظه می گردد که با افزایش طول زهکش افقی، مطابق شکل (۴)



شکل (۹): اثر طول زهکش افقی بر تغییرات گرادیان هیدرولیکی
۴- نتیجه گیری

- با افزایش طول زهکش افقی دبی نشت افزایش می یابد ولی وجود زهکش باعث کاهش خطر بروز پدیده زیرشویی می باشد.
- با افزایش طول زهکش افقی مقادیر نیروی زبر فشار کل کاهش می یابد.
- در محدوده ورود خط نشت به زهکش افقی با توجه به اینکه نفوذ پذیری زهکش صد برابر نفوذپذیری پوسته سد می باشد، افزایش گرادیان به وقوع پیوسته است.
- با افزایش طول های نسبی زهکش افقی، گرادیان هیدرولیکی خروجی پنجه سد تقریباً به گرادیان ۰/۵ مماس می گردند.

مراجع

[۱] جعفر زاده ف، یار احمدی ن. ۱۳۹۰. مقایسه نتایج آنالیز دو بعدی و سه بعدی تراوش آب از سد های خاکی ساخته شده در دره های تنگ (مطالعه موردی سد هاله). ششمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

[۲] خدا شناس س ر، یار احمدی ی. ۱۳۹۰. مقایسه آنالیز دو بعدی و سه بعدی تراوش از سد های خاکی با استفاده از نرم افزار ۳D/seep و seep/w. ششمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

[۳] خلیلی شایان ح، شیخ رضا زاده نیکون، امیری تکدانی ا. ۱۳۹۰. ارزیابی روش های کاهش اثرات نشت و زیرشویی در سد های خاکی، یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[۴] روشنی ا، فر سادی زاده د، سلماسی ف. ۱۳۹۰. بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در تخمین میزان نشت به عنوان عامل هدر رفت منابع آب سطحی از هسته رسی سد های خاکی غیر همگن. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

[۵] صیادزاده ف، م ع زمریدان. ۱۳۹۰. تعیین خصوصیات جریان و زبر فشار در پی های لایه دار سد های نفوذ ناپذیر با استفاده از نمودارهای بی بعد. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۴، شماره ۱، صفحه های ۷۹-۹۲.

[۶] قبادیان ر، خدایی ک. ۱۳۸۸. تاثیرات دیواره آبنده و زهکش بر نیروی زبر فشار و گرادیان خروجی زبر سازه های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش اجزای محدود. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۳، شماره ۴، صفحه های ۱۴۸-۱۶۰.

[۷] قبادیان ر، خلج م، محمدی ک. ۱۳۹۰. اثر پرده آب بند بر موقعیت خط نشت آزاد و دبی تراوش در سد های خاکی با استفاده از روش عددی حجم های محدود. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۴، شماره ۱، صفحه های ۹۳-۱۰۲.

[۸] کتابداری م ج، سببانی ح. ۱۳۹۰. برآورد فشار هیدرولیکی و تراوش در بستر چند لایه سد های بتنی با استفاده از روش المان مرزی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

[۹] موهبت زاده آ، مشعل م، هدایت ن. ۱۳۹۰. بررسی اثر شبیه سازی فیلتر و زهکش در برآورد نشت در سد های خاکی (مطالعه ی موردی خاکی کرخه خوزستان). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

[۱۰] موهبت زاده آ، مشعل م، هدایت ن. ۱۳۹۰. تحلیل نشت در سد های خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم افزار seep/w (مطالعه ی موردی خاکی کرخه خوزستان). ششمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

[۱۱] موهبت زاده آ، مشعل م، هدایت ن. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر شبیه سازی خاک نیمه چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

[۱۲] منافیور م، بهرامی فر ا، کولانی مطلق ک. ۱۳۹۰. بررسی عملکرد هسته ی مرکزی سد شهر چای ارومیه در مقابله با نشت از شبیه سازی عددی و نتایج ابزار دقیق. ششمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

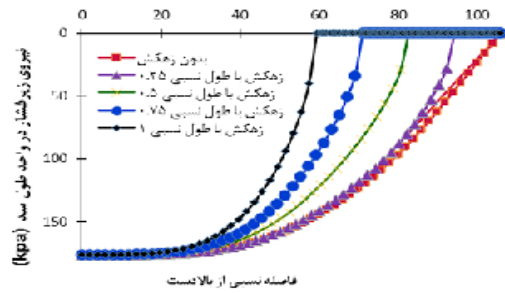
[۱۳] نصر الهی م. ۱۳۹۰. بررسی ترکیب های مختلف عمق ترانشه و پلانکت رسی برای کاهش نشت از سد خاکی (مطالعه سد ستارخان). پایان نامه ی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده ی کشاورزی، دانشگاه تبریز.

[14] Mishra G. C. and Singh A. K. 2005. Seepage through a levee. International Journal of Geomechanics, ASCE, 5(1): 74-79.

[15] Bhagu R. and Chahar J., 2004. Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 6(5):130-145.

[16] Barpi F. and Valente S. 2008. Modeling water penetration at dam-foundation joint. Engineering Fracture Mechanics, 75(): 629-642.

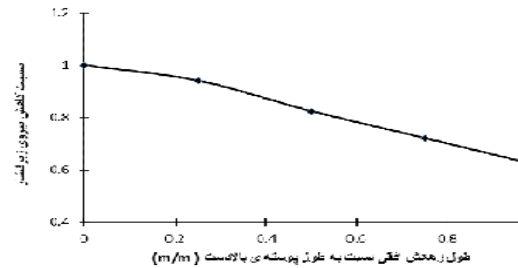
که از طریق زهکش افقی پنجه ی سد میسر می گردد. روشن است که کاهش نیروی زبر فشار بر پایداری سد در برابر لغزش و یا واژگونی می افزاید.



شکل (۷): توزیع زبر فشار در پی سد ناشی از طول زهکش افقی در پنجه سد

برای درک بهتر، توزیع زبر فشار کل در زیر سد، شکل (۸) ارائه شده است. در شکل (۸) اثر تغییر طول زهکش افقی سد بر کل نیروی زبر فشار (بالابرنده) نشان داده شده است. در واقع این شکل از مساحت زیر منحنی شکل (۷) تولید شده است. ملاحظه می شود که با افزایش طول زهکش افقی مقدار نیروی زبر فشار کل کاهش می یابد.

به طوری که شدت کاهش زبر فشار کل به ترتیب برای طول زهکش پنجه ای ۱۱/۶۲۵، ۲۳/۲۵، ۳۴/۸۷۵ و ۴۶/۵ متری نسبت به حالت مینا برابر با ۵/۸۳، ۱۷/۵۳، ۲۷/۸۳، ۳۸/۲۷ خواهد شد. لازم به ذکر است که عموماً نیروی زبر فشار عامل خطر سازی در پایداری سد های خاکی به شمار نمی روند. زیرا شیب های بالادست و پایین دست سد های خاکی موجب ایجاد مقطع گسترده ای با وزن زیاد می گردد که نیروی وزن سد به مراتب بیشتر از نیروی زبر فشار بوده و عامل خطر سازی نمی باشد.



شکل (۸): اثر طول زهکش افقی در پنجه سد بر زبر فشار کل در پی سد خاکی

در شکل (۹) اثر وجود و عدم وجود زهکش افقی در پنجه سد خاکی بر روی گرادیان هیدرولیکی نشان داده شده است. شکل (۹) نشان می دهد که روند گرادیان هیدرولیکی در سد خاکی بدون زهکش، روند کاهشی می باشد (با توجه به اینکه طول سد خاکی بیشتر می باشد بمراتب طول خزش نیز بیشتر شده و از نیروی آب می کاهد). همچنین در محدوده زهکش افقی (با توجه به اینکه نفوذ پذیری زهکش صد برابر نفوذ پذیری پوسته سد می باشد) افزایش گرادیان به وقوع پیوسته است. علاوه بر آن در هنگام ورود آب از یک نوع خاک به نوع دیگر خاک (با هدایت هیدرولیکی متفاوت)، چون تحت تاثیر آن قرار می گیرد، در بدو ورود به زهکش افزایش گرادیان را داریم که نیازمند فیلتر می باشیم. اما گرادیان هیدرولیکی خروجی از گرادیان خروجی بحرانی (یک کمتر بوده و خطر ساز نمی باشد. ملاحظه می شود که منحنی های گرادیان هیدرولیکی مر بوطه به نسبت طول های زهکش متفاوت، نهایتاً به مقدار ۰/۵ مماس می گردند که این مقدار نصف گرادیان هیدرولیکی بحرانی (عدد یک) است. لذا افزایش طول زهکش افقی باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی خروجی نگردیده و در طراحی نیاز به ملاحظات خاص نمی باشد.