



بررسی عملکرد زهکش های افقی در افزایش پایداری شیب های خاکی در بارندگی های شدید با شبیه سازی عددی

فرزین سلماسی*، علی حسین زاده دلیر، رضا نوروزی سرکارآباد

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ آبان ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۸ بهمن ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۹ بهمن ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

زهکش افقی
شکست شیب
ضریب اطمینان
SLOPE/W
SEEP/W

چکیده: هر ساله وقوع باران های شدید باعث ایجاد شکست در تعداد زیادی از شیب های خاکی می شود. در طول این باران ها، سطح آب زیرزمینی بالا آمده و باعث افزایش فشار آب منفذی و کاهش پایداری شیب می گردد. استفاده از زهکش های افقی روشی مؤثر و کم هزینه جهت کنترل پایداری شیب در این حالت می باشد. هدف از این تحقیق، بررسی عددی عملکرد زهکش های افقی در افزایش پایداری شیب های خاکی در شرایط بارندگی شدید می باشد. برای نیل به این هدف از نرم افزار SLOPE/W و SEEP/W که متعلق به بسته نرم افزاری Geo-Studio می باشند، استفاده شده است. نتایج نشان داد که افزایش طول، ضخامت و تعداد زهکش های افقی موجب افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی های شدید و حفظ پایداری شیب می گردد. همچنین بکارگیری زهکش های افقی در قسمت پایین شیب تأثیر بیشتری نسبت به بکارگیری زهکش های افقی در قسمت های وسط و بالای شیب در پایداری شیب خاکی دارد. طول نسبی زهکش برابر ۰/۴ برای افزایش پایداری شیب مناسب تشخیص داده شد. افزایش ضخامت زهکش افقی تأثیر مثبت بیشتری بر پایداری شیب نسبت به افزایش طول زهکش دارد.

۱- مقدمه

وزن آب باران بر محیط خاک اعمال می شود که همه این عوامل موجب کاهش ضریب اطمینان پایداری و افزایش احتمال شکست شیب می شود که می تواند خسارات مالی و جانی بسیاری را باعث گردد. روش استفاده از زهکش های افقی روشی مؤثر جهت خروج سریع تر آب باران و حفظ پایداری شیب می باشد. در این روش، آب به وسیله زهکش های افقی از محیط خاک خارج شده و به تبع آن پایداری شیب حفظ می گردد. با توجه به هندسه پیچیده شیب های خاکی و ناهمگن و ناهمسان بودن محیط خاک و همچنین حالت گذرا در هنگام بارندگی های شدید، طراحی زهکش های افقی کاری مشکل و حساس می باشد [۳]. مارتین و همکاران [۴] پیشنهاد کردند که استفاده از تعداد کمی زهکش در محل های مناسب شیب خاکی، بهتر از استفاده از تعداد زیادی زهکش در فواصل مساوی می باشد.

لاو و کنی [۵] کاربرد زهکش های افقی در حفظ پایداری شیب های رسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش پایداری شیب به ضریب تحکیم خاک، قطر زهکش ها، فاصله بین زهکش ها و زاویه و طول زهکش ها وابسته می باشد. همچنین نتایج نشان داد که پایداری شیب

با توجه به ساخت جاده ها و منازل مسکونی بسیاری بر روی شیب های خاکی در مناطق مختلف جهان، حفظ پایداری این شیب ها امری ضروری به حساب می آید. در مناطقی از جهان که با بارندگی های شدید مواجه هستند، امکان تخریب شیب های خاکی در زمان وقوع این بارندگی ها بالاست. شدت بارندگی معمولاً در طول مدت بارندگی مرتب تغییر می کند، لذا می توان از متوسط شدت بارندگی استفاده کرد. تعاریف متعدد و مقادیر متفاوتی برای بارش های شدید ارائه شده است. برای مثال در اوراسیای هند به منظور بررسی بارش های شدید در یک دوره ۲۰ ساله آستانه بالاتر از ۱۲۵ میلی متر در روز را به عنوان بارش شدید انتخاب کرده اند [۱]. در مطالعه ای دیگر که بر روی بارش های شدید نواحی غرب ایران انجام شده است، بارش شدید در یک روز به بارشی اطلاق شده که حداقل ۷۰ درصد بارش همان ماه را تشکیل دهد. در تحقیقی دیگر مسعودیان برای بررسی بارش های شدید یک روزه، آستانه یک روز با بارش بیش از ۱۰۰ میلی متر را پیشنهاد نموده است [۲]. برحسب ارتفاع بارندگی در هنگام وقوع بارندگی های شدید، نیروی مکش خاک و متعاقباً نیروی مقاومت برشی کاهش می یابد و همچنین

1 Martin et al., 1994
2 Lau and Kenney, 1984

نویسنده عهده دار مکاتبات: Salmasi@Tabrizu.ac.ir

قطعه رادرنظرمی گیرند [۱۰].

در تحقیق حاضر از دو نرم افزار SEEP/W و SLOPE/W جهت مطالعه تأثیر به کارگیری زهکش های افقی در حفظ پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی های شدید استفاده شده است. برای این منظور، بارندگی با شدتهای بارش ۲/۸۸، ۳/۲۴، ۳/۶ و ۳/۹۶ میلیمتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. این ارقام براساس مقادیر بارش حداکثر ۲۴ ساعته مرسوم در شهرستان تبریز ملاک عمل قرار گرفته است. بدین معنا که معمولا شدتهای بارش مذکور موجب اشباع خاک شده و سطح ایستایی را افزایش میدهند. هر دو نرم افزار فوق الذکر بخشی از بسته نرم افزاری Geo-Studio 2012 می باشند. مروری بر تحقیقات گذشته نشان داد که اثر باران با شدتهای متفاوت بر پایداری شیبها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین سعی میشود تا براساس متغیرهای موثر بر پایداری شیب، پس از شبیه سازی عددی، روابطی بعد توسط آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی ارائه گردد تا روشی مناسب و ساده را برای طراحان ایجاد نماید.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق عملکرد زهکش های افقی در کنترل فشار آب منفذی و حفظ پایداری شیب های خاکی در زمان وقوع بارندگی های شدید توسط دو نرم افزار SEEP/W و SLOPE/W مورد مطالعه قرار می گیرد. نرم افزار SEEP/W بر اساس روش المانهای محدود و نرم افزار SLOPE/W بر اساس روش تعادل حدی برنامه ریزی شده اند. ابتدا شیب خاکی مورد نظر در نرم افزار SEEP/W مدل میگردد. سپس با تعریف مصالح موجود و شرایط مرزی در نرم افزار SEEP/W، تغییرات فشار آب منفذی در شیب خاکی در زمان وقوع بارندگی بررسی میشود و با مدل سازی زهکش های افقی تأثیر این زهکش ها بر کاهش فشار آب منفذی بررسی میگردد. در مرحله بعد، نتایج حاصله وارد نرم افزار SLOPE/W گردیده و تأثیر به کارگیری زهکش های افقی بر روی حفظ پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی شدید بررسی خواهد شد.

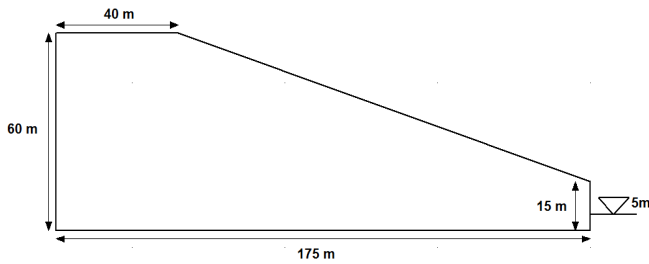
$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1)$$

بر اساس قانون داری برای جریان سیال در محیط متخلخل خواهیم داشت:

در رابطه ۱، v_i و k_i به ترتیب مؤلفه های سرعت سیال و نفوذپذیری محیط متخلخل در راستای x, y, z هستند.

$$q = -kA \frac{\partial h}{\partial l} \quad (2)$$

خاکی با افزایش قطر زهکش ها و کم کردن فاصله بین زهکش ها افزایش می یابد. پیشنهاد می شود که طول زهکش ها تا سطح لغزش بحرانی ادامه یابد. محرمی و همکاران [۶] به بررسی عملکرد زهکش های افقی در پایداری شیب پوسته بالادست سد خاکی در تخلیه سریع پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع با افزایش تعداد زهکش ها افزایش می یابد. ملک پور و همکاران [۷] به بررسی تأثیر زهکش افقی بر پایداری سد خاکی همگن در شرایط تخلیه سریع پرداختند که در این تحقیق در یک مدل سد خاکی همگن تأثیر طول و ضخامت زهکش افقی بر پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع مورد بررسی قرار گرفت. به ازای ابعاد مختلف زهکش، بلافاصله پس از افت سطح آب محدوده تغییرات ضریب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق به ترتیب ۲/۶ - ۱/۵ - ۲/۲ و ۱/۳ - بدست آمد که با گذشت زمان تحت تأثیر زهکش با حداکثر طول و ضخامت موثر به ترتیب ۲-۳ و ۳-۲ افزایش یافت. علاوه بر این به ازای نسبت افت سطح آب کمتر از ۰/۳، زهکش با نسبت طول ۰/۴۳ (طول زهکش به عمق آب مخزن) به ازای تمامی ضخامت ها پایداری را ایجاد کرد. برای نسبت های بزرگتر افت سطح آب نیز، نسبت طول زهکش ۰/۷۱ با ضخامت متوسط، پایداری در مقابل لغزش را تأمین نمود. محمود و همکاران [۸] به بررسی اثر طول زهکش افقی بر دبی نشستی، نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در سد خاکی همگن توسط شبیه سازی عددی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش طول زهکش افقی متناسب با دبی نشستی 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. صبا و همکاران [۹] به مطالعه تعیین آستانه لغزش پایداری شیروانی و بهینه یابی حجم عملیات خاکریزی سد خاکی با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک پرداختند. تحلیل پایداری شیروانی به منظور تعیین ضریب اطمینان در سطح لغزش مورد نظر و تعیین محتمل ترین فرایند گسیختگی و کمترین ضریب اطمینان مربوط به آن انجام می گیرد. کاربرد الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، تعیین محتمل ترین فرایند گسیختگی آستانه لغزش (تعیین حداقل ضریب اطمینان) می باشد. همچنین یکی دیگر از کاربردهای الگوریتم ژنتیک در این تحقیق بهینه کردن حجم عملیات خاکریزی سد می باشد به گونه ای که حداقل ضریب اطمینان (آستانه لغزش) حاصل شود. مهدوی و همکاران روش های تعادل حدی در نرم افزار SLOPE/W را بررسی و اعلام کردند که تفاوت اصلی هریک از روش ها، در ارضا و عدم ارضای تعادل نیروها و تعادل گشتاور آن ها جهت پایداری هر قطعه از سطح لغزش خاکی است و در پایان توصیه کردند که روش هایی مانند مورگنسترن-پرایس و اسپنسر انتخاب شوند که هر دو تعادل نیروها و گشتاورها را ارضا نموده و اثر تمامی نیروهای وارد بر

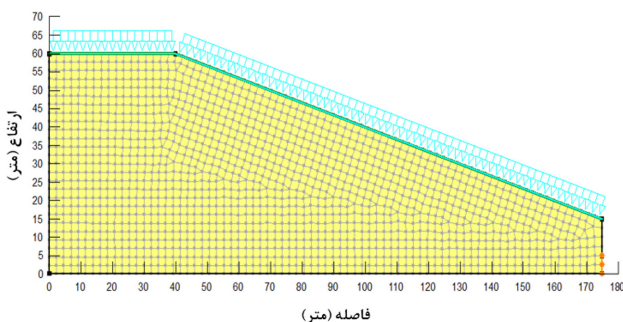


شکل ۱. مقطع شیب خاکی مورد مطالعه

Fig1. Cross section of the earthen slope in this study

در شکل ۲ مقطع عرضی شیب خاکی بدون زهکش همراه با شبکه بندی مدل و بارش روی سطح خاک نشان داده شده است. در این مرحله اطلاعات تحلیل حالت ماندگار (پایا) به عنوان شرایط اولیه تحلیل حالت گذرا به نرم افزار داده شد و با اعمال بارندگی ۲۷۶/۵ میلی متر در طول ۴ روز با شدت ۲/۸۸ میلی متر بر ساعت، شرایط تغییر سطح آب زیرزمینی در طول این بارندگی در ۱۰ گام های زمانی مدل سازی شد. اعمال این مقدار بارندگی طی ۴ روز موجب اشباع شدن خاک و ایجاد رواناب میگردد. در شکل ۳ منحنیهای هم فشار رسم شده اند. منحنی با فشار صفر، نماینده سطح ایستابی است که پایینتر از آن خاک بر اثر بارش ۴ روزه به حالت اشباع درآمده است.

شکل ۴ منحنیهای هم فشار مقطع عرضی شیب خاکی با یک زهکش به طول ۶۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر در ارتفاع ۲۰ متری را نمایش میدهد. تغییر در کانتورهای هم فشار بر اثر وجود زهکش در مقایسه با شکل ۳ به وضوح دیده میشود. سطح ایستابی پایینتر افتاده و منحنیهای هم فشار فشرده تر شده اند. در شکل ۵ شیب خاکی با نصب پنج زهکش به طول ۷۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر در ارتفاعهای ۲۰، ۲۱، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ متری با شدت بارش ۲/۸۸ میلی متر بر ساعت نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ارقام شدت بارشها بر اساس مقادیر مرسوم در شهرستان تبریز ملاک عمل قرار گرفته است. بدین معنا که معمولاً شدتهای بارش مذکور موجب اشباع خاک و ایجاد رواناب میگردد.



شکل ۲. مقطع عرضی شیب خاکی بدون زهکش (همراه با شبکه بندی مدل و بارش روی خاک)

Fig2. Cross section of earthen slope without drainage (including meshing and precipitation)

با توجه به قانون پیوستگی، دبی نشت از رابطه ۲ محاسبه میگردد:

در رابطه ۲، q دبی نشت بر حسب مترمکعب بر ثانیه، k ضریب نفوذپذیری بر حسب متر بر ثانیه، A سطح مقطع جریان بر حسب مترمربع و $\frac{\partial h}{\partial t}$ شیب هیدرولیکی (گرادیان هیدرولیکی) جریان می باشند [۱۱].

با توجه به معادله پیوستگی، برای سیال تراکم ناپذیر که (جرم مخصوص سیال) در آن مقداری ثابت است داریم:

$$\frac{\partial(v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = \frac{1}{\rho_f} \left[-s \frac{\partial h}{\partial t} + Q(x, y, z, t) \right]$$

در رابطه ۳، s ضریب ذخیره آب در خاک، Q دبی جریان اضافه شده یا برداشت شده از خاک و h بار آبی کل یا پتانسیل آب در خاک میباشد. با جایگذاری قانون داری در معادله ۳، برای محیط همگن و دارای نفوذپذیری ثابت k خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_f} s \frac{\partial h}{\partial t} - Q(x, y, z, t)$$

در مسائل حالت پایدار (مستقل از زمان) $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ می باشد و معادله پیوستگی به معادله پواسون برای جریان تراکم ناپذیر تبدیل می شود (رابطه ۵).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -\frac{Q(x, y, z, t)}{\rho_f}$$

با ساده سازی معادله ۵ برای خاک غیر اشباع، معادله حرکت آب در خاک در حالت دوبعدی بدست خواهد آمد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

در رابطه (۶)، t زمان و θ محتوای حجمی آب (رطوبت حجمی) می باشند [۱۲].

ضمناً قابل ذکر است که دیمانسیون جمله اول و دوم در معادله ۶، به شرح ذیل می باشد:

$$\frac{1}{L} \left(\frac{L}{T} \times \frac{L}{L} \right) = \frac{1}{T}$$

از آنجا که در یک معادله، دیمانسیون تمامی جملات می بایست برابر باشد، دیمانسیون Q نیز $1/T$ می باشد که نتیجه می شود، Q در این معادله معرف دبی در واحد حجم خاک می باشد. همچنین با توجه به جمله چهارم معادله $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ ، از آنجا که دیمانسیون این جمله نیز $1/T$ است، نتیجه می شود که پارامتر θ ، بی بعد می باشد.

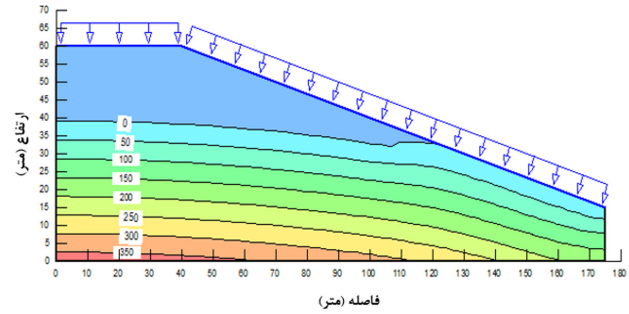
در این پژوهش شیب خاکی همگن با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ فرض شده است. شیب خاکی مفروض دارای ۶۰ متر ارتفاع، ۱۷۵ متر طول کل و ۴۰ متر طول زمین مسطح می باشد.

جدول ۱. مصالح به کار رفته در آنالیز پایداری شیب

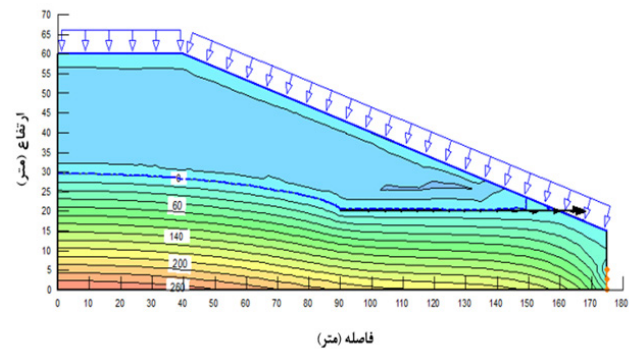
Table 1. Materials used in the factor of safety analysis

پارامترها	شیب خاکی	زهکش افقی
هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)	۸×۱۰ ^{-۷}	۸×۱۰ ^{-۴}
kx/ky	۱	۱
محتوای آب اشباع (مترمکعب بر متر مکعب)	۰/۴۵	۰/۴۵
محتوای آب باقی مانده (مترمکعب بر متر مکعب)	۰/۰۵	۰/۰۵
معیار شکست	موهر- کلمب	موهر- کلمب
وزن مخصوص خاک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۸	۱۹
زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۲۶	۳۵
چسبندگی خاک (کیلو پاسکال)	۵	۲

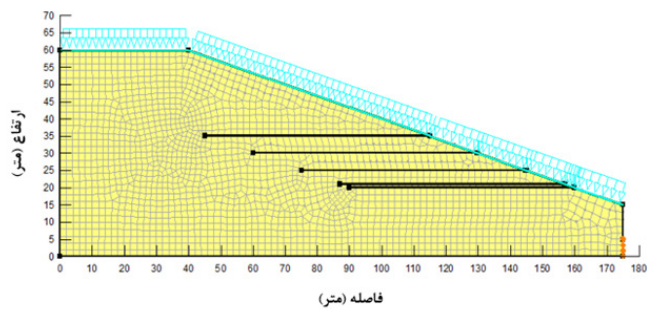
از آنجا که جریان غیراشباع می باشد باید تابع محتوای آب و تابع هدایت هیدرولیکی تعریف شوند که به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که منحنی های شکل های ۵ و ۶ با استفاده از محتوای اشباع آب خاک (مترمکعب بر متر مکعب) و محتوای باقی مانده خاک (مترمکعب بر متر مکعب) که هر دو جزو خصوصیات خاک میباشند، بدست آمده است. ضمناً نوع خاک لوم رسی فرض شده و ترسیم منحنی مشخصه خاک با توجه به پایگاه داده های نرم افزار تولید میشود. روش دیگر تولید منحنی مشخصه خاک، اندازه گیری رطوبت در برابر مکش های مختلف نمونه خاک در آزمایشگاه است که در این تحقیق روش اول مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق برای بررسی پایداری شیب خاکی از روش تعادل حدی (LEM) بر طبق روش مورگنسترن-پرایس استفاده شده است. در این روش تعادل لنگرها و تعادل نیروها به طور همزمان در نظر گرفته میشود که امتیاز این روش محسوب میگردد. در حالی که در روش جانبی فقط تعادل نیروها و در روش بیشاب تعادل لنگرها در نظر گرفته میشوند. همچنین در روش مورگنسترن-پرایس تمام نیروهای درگیر در تعادل، خصوصاً نیروهای جانبی قطعات مجاور در نظر گرفته میشوند و بر دقت کار می افزایند. نرم افزار SLOPE/W سطح گسیختگی را بصورت دایره های در نظر میگیرد. مطالعاتی که کولمن در سال ۱۸۷۵



شکل ۳. منحنی های هم فشار مقطع عرضی شیب خاکی بدون زهکش (ارقام بر حسب کیلو پاسکال)
Fig3. Cross section for pressure contours (kPa) of earthen slope without drainage

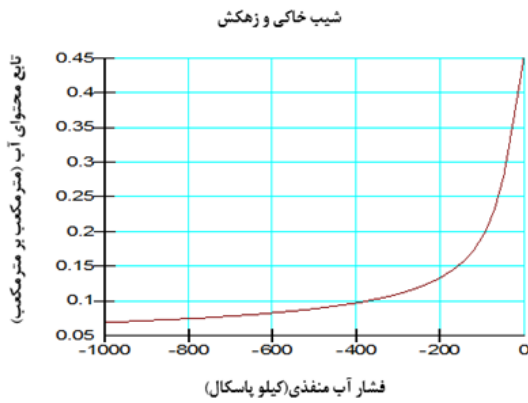


شکل ۴. منحنی های هم فشار مقطع عرضی شیب خاکی با یک زهکش به طول ۶۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر در ارتفاع ۲۰ متری (ارقام بر حسب کیلو پاسکال)
Fig4. Cross section for pressure contours (kPa) of earthen slope with a drain 60 m long and 100 mm thick at 20 m height



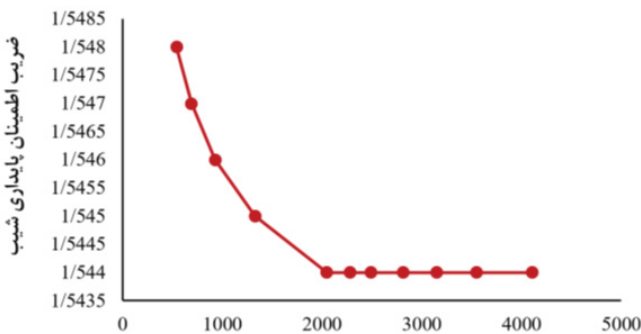
شکل ۵. مقطع عرضی شیب خاکی با پنج زهکش به طول ۷۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر در ارتفاع های ۲۰، ۲۱، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ متری
Fig5. Cross section of earthen slope including five drainages with 70 m long and 100 mm thick at 20, 21, 25, 30 and 35 m heights

برخی از مشخصات ژئوتکنیکی مصالح به کار رفته در آنالیز عددی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۷. تابع محتوای آب در مصالح شیب خاکی و زهکش افقی
Fig7. Water content function in earthen slope and horizontal drainage materials

جهت تعیین تعداد شبکه مناسب برای شبیهسازی مدل، آزمون مستقل از شبکه انجام شد. برای این منظور، در تعداد شبکههای مختلف ضریب اطمینان پایداری شیب در گام زمانی آخر در حالت بکارگیری یک زهکش افقی به طول ۷۰ متر در ارتفاع ۲۰ متری بدست آمد که نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. قابل ذکر است که در ابتدا شبکهبندی درشت در SEEP/W انجام گرفت و بارش ۲۷۶/۵ میلیمتری در ۴ روز روی خاک ایجاد شد تا سطح ایستابی در خاک پدیدار گردید. پس از اجرای SEEP/W فشار آب منفذی درون خاک محاسبه گردید و نتیجه فشارهای منفذی وارد SLOPE/W شده تا ضریب اطمینان بدست آید. سپس شبکهبندی ریزتر میشد و مجدداً فشارهای آب منفذی در SEEP/W محاسبه و نتایج وارد SLOPE/W میگردد. نتیجه کار در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۸. آزمون مستقل از شبکه
Fig8. Mesh-independent test

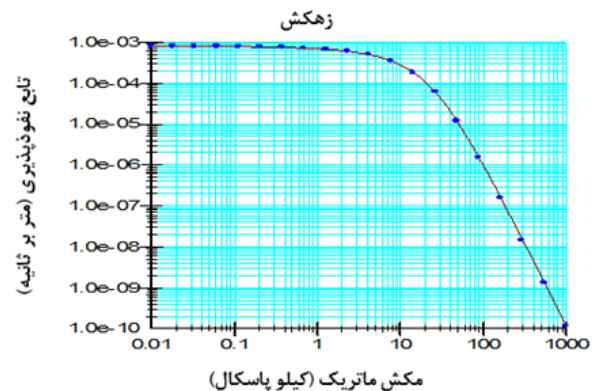
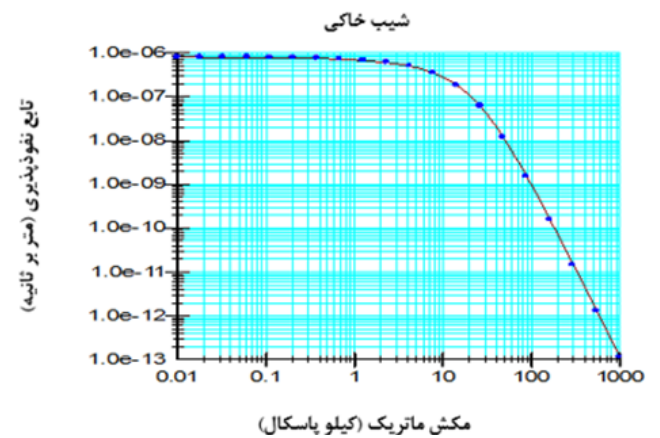
باتوجه به شکل ۷ مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد شبکهها تا ۲۰۰۰ شاهد تغییر در ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی هستیم، اما در تعداد شبکه های بالاتر از ۲۰۰۰، نتایج یکسانی از نظر ضریب اطمینان پایداری شیب بدست آمده است و با افزایش تعداد شبکهها تغییری در ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی بوجود نمی‌آید و ضریب اطمینان پایداری

انجام داده بود، سطح گسیختگی را بصورت صفحه‌های تعریف کرد که بیشتر برای شیبهایی متشکل از خاکهای درشت دانه (قلوه سنگ و شن) و زاویه شیب نزدیک به عمود صادق میباشد. مطالعاتی که بعد از کولمن، کمیته ژئوتکنیک سوئد انجام داد به این نتیجه رسید که اکثراً در طبیعت سطح گسیختگی قطاعی از یک دایره میباشد و از آن پس اکثراً سطح گسیختگی بصورت دایره‌های در نظر گرفته میشود.

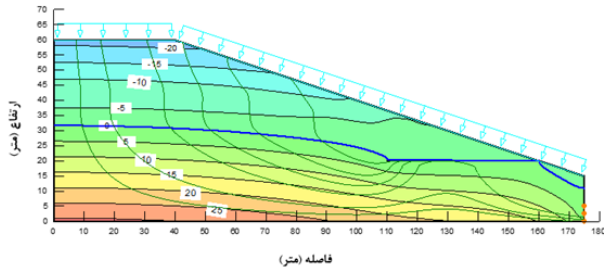
در روش تعادل حدی ضریب اطمینان (F) برابر با نسبت مقاومت برشی خاک به تنش برشی لازم برای قرار دادن شیب در وضعیت تعادل حدی (آستانه لغزش) طبق رابطه ۸ میباشد.

$$F = \frac{C'}{C'_m} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_m} \quad (8)$$

در رابطه ۸، C' و φ' پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌باشند که با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کلمب تعیین میشوند و C'm و φ'm مقدار لازم پارامترهای مقاومت برشی برای قرار دادن شیب خاکی در آستانه لغزش میباشد.

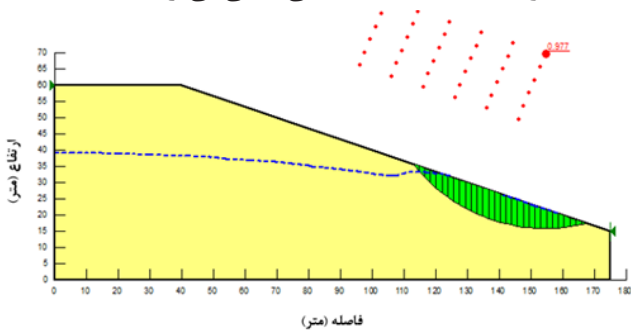


شکل ۶. تابع نفوذپذیری خاک در مصالح شیب خاکی و زهکش افقی
Fig6. Soil permeability function in earthen slope and horizontal drainage materials



شکل ۱۰. منحنی‌های هم‌فشار و خطوط جریان در خاک شیبدار بعد از ۴ روز بارندگی با شدت ۲/۸۸ میلی‌متر بر ساعت (زهکش افقی در ارتفاع ۲۰ متری با طول ۵۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر است) Fig10. Pressure contours and flow lines in soil after 4 days of precipitation with intensity of 2.88 mm/h (horizontal drainage with 20 m high, 50 m long and 100 mm thick)

در ادامه اطلاعات فشار آب منفذی بدست آمده در نرم افزار SLOPE /W بازخوانی گردید و نحوه تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیب در طول ده روز بارندگی شدید محاسبه شد که اطلاعات ضریب اطمینان پایداری شیب در آخرین گام زمانی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، ضریب اطمینان پایداری شیب در انتهای دوره ۴ روزه بارندگی به ۰/۹۷ رسیده است. از آنجا که ضریب اطمینان پایداری کوچکتر از یک به معنی شکست شیب خاکی می‌باشد، نتیجه‌گیری می‌شود که در این حالت در صورت عدم نصب زهکشهای افقی در شیب خاکی و خارج نمودن آب اضافی، شیب شکست خورده و باعث خسارات جانی و مالی می‌گردد.



شکل ۱۱. ضریب اطمینان پایداری شیب بعد از ۴ روز بارندگی با شدت ۲/۸۸ میلی‌متر بر ساعت Fig11. The factor of safety after 4 days of precipitation with intensity of 2.88 mm/h

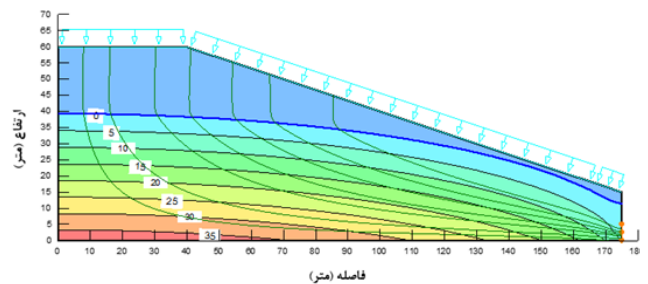
با مدل سازی بارندگی شدید با شدتهای ۲/۸۸، ۳/۲۴، ۳/۶ و ۳/۹۶ میلی متر بر ساعت بر شیب خاکی بدون کارگذاری زهکش افقی، تأثیر افزایش شدت بارندگی بر کاهش پایداری شیب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۱۱ آورده شده است. با بررسی نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد افزایش شدت بارندگی همواره موجب افزایش فشار آب منفذی در شیب گردیده و موجب بحرانی‌تر شدن وضعیت شیب خاکی می‌گردد که می‌بایست با کارگذاری زهکشهای افقی با

شیب خاکی در مقدار ۱/۵۴۴ ثابت می‌ماند. بنابراین نتیجه می‌گردد که تعداد شبکه مناسب برای این مدل سازی ۲۰۰۰ می‌باشد و نیازی به بکارگیری تعداد شبکه‌های بیشتر نیست زیرا زمان محاسبات را افزایش میدهد.

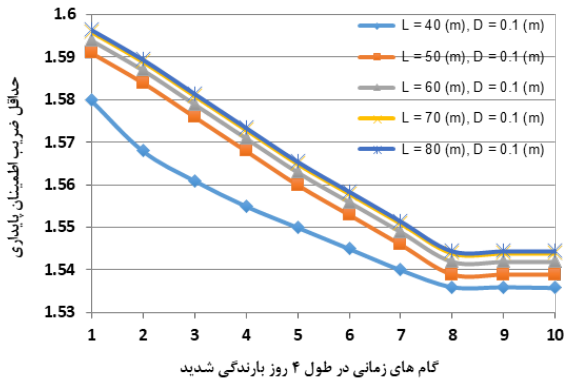
۳- نتایج و بحث

بارندگی ۲۷۶/۵ میلی‌متر در طول ۴ روز با شدت ۲/۸۸ میلی‌متر بر ساعت بر شیب خاکی اعمال شد. از آنجا که این بارندگی با شدت بالا و در مدت زمان کوتاه بر شیب خاکی اعمال میشود موجب بالا رفتن فشار آب منفذی و کاهش پایداری شیب می‌گردد. جهت بررسی این روند ابتدا در نرم افزار SEEP /W بارندگی با شدت مذکور بر شیب خاکی شبیه سازی شد و تغییرات فشار آب منفذی در طول ۱۰ بازه زمانی بررسی گردید. بدین معنا که طول مدت بارندگی شدید ۴ روزه به ۱۰ بازه مساوی تقسیم گردید. به عنوان نمونه مشخصات فشار آب منفذی آخرین گام زمانی در شکل ۸ نمایش داده شده است. سطح آب زیرزمینی (خط فریاتیك) به رنگ آبی است و در زیر آن کانتورهای فشار آب منفذی (بر حسب متر) درج شده است. روی خط فریاتیك فشار صفر دیده میشود. روی شکل ۸ چند خط جریان نیز ترسیم شده است.

در شکل ۹ منحنیهای هم‌فشار و خطوط جریان در خاک شیبدار بعد از ۴ روز بارندگی با شدت ۲/۸۸ میلی‌متر بر ساعت با زهکش در ارتفاع ۲۰ متری، با طول ۵۰ متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ارائه شده است. سطح آب زیرزمینی (خط فریاتیك) به رنگ آبی است و در زیر آن کانتورهای فشار آب منفذی با علامت مثبت (بر حسب متر) و در بالای آن با علامت منفی دیده میشوند. فشار آب منفذی با علامت منفی بیانگر غیر اشباع بودن محیط متخلخل است و روی خط فریاتیك فشار صفر دیده میشود. ضمناً روی شکل ۸ چند خط جریان نیز ترسیم شده است و مشاهده می‌گردد که جهت جریان از سمت چپ به راست بوده و زهکش افقی در پایین دست شیب به عنوان جمع کننده جریان زیر سطحی عمل مینماید.



شکل ۹. منحنیهای هم‌فشار و خطوط جریان در خاک شیبدار بعد از ۴ روز بارندگی با شدت ۲/۸۸ میلی‌متر بر ساعت (سطح شیبدار بدون زهکش افقی است) Fig9. Pressure contours and flow lines in soil after 4 days of precipitation with intensity of 2.88mm/h (slope without any horizontal drainage)



شکل ۱۴. مقایسه تأثیر طول زهکش‌های افقی

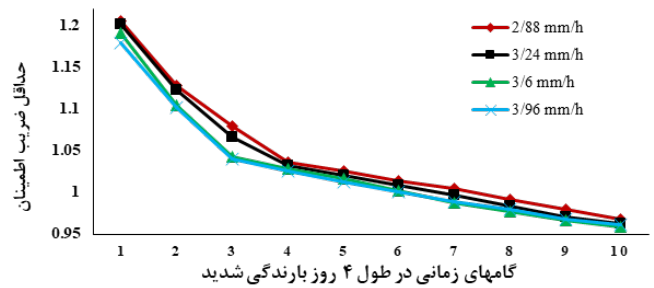
برافزایش ضریب اطمینان پایداری شیب

Fig14. Comparison of the effect of horizontal drainage length on increasing factor of safety

با توجه به شکل ۱۳، کارگذاری یک زهکش افقی به طول ۴۰ متر در ارتفاع ۲۰ متری شیب خاکی سبب گردیده که ضریب اطمینان پایداری شیب در اولین گام زمانی دوره بارندگی شدید ۱/۵۷۹ باشد که پس از چهار روز بارندگی شدید و در گام دهم، این مقدار به ۱/۵۳۵ می‌رسد که در مقایسه با ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی عدم کارگذاری زهکش افقی افزایش چشمگیر پایداری شیب خاکی ملاحظه می‌گردد. بنابراین مشاهده می‌گردد حتی کارگذاری یک زهکش افقی به طول ۴۰ متر می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر پایداری شیب خاکی داشته باشد. افزایش طول زهکش افقی از ۷۰ متر به ۸۰ متر تأثیری در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی نداشته است. لذا در مدل خاکی بررسی شده در این تحقیق طول ۷۰ متر به عنوان طول بهینه زهکش افقی انتخاب شده و در تمامی مدل‌های بعدی این تحقیق از زهکش‌های افقی به طول ۷۰ متر استفاده شده است.

با مدل‌سازی یک زهکش افقی ۷۰ متری در ارتفاع ۲۰ متری شیب خاکی به ترتیب با ضخامت‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، تأثیر افزایش ضخامت زهکش‌های افقی بر افزایش کارایی آنها در حفظ پایداری شیب خاکی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۱۴، با افزایش ضخامت زهکش‌های افقی تأثیر آنها در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که نمودار زهکش افقی به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر بر نمودار زهکش افقی به ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر منطبق است. به بیان دیگر، افزایش ضخامت زهکش از ۱۵۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر تأثیری بر افزایش کارایی زهکش‌های افقی نداشته است. هم‌چنین از ضخامت زهکش ۱۰۰ میلی‌متر به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر، افزایش ناگهانی در ضریب اطمینان رخ داده است. لذا به نظر می‌رسد بهترین حالت برای طراحی زهکش ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر خواهد بود. زیرا همانطور که قبلاً گفته شد به ازای ضخامت ۲۰۰ میلی‌متری زهکش، افزایش ضریب اطمینان بسیار جزئی است.

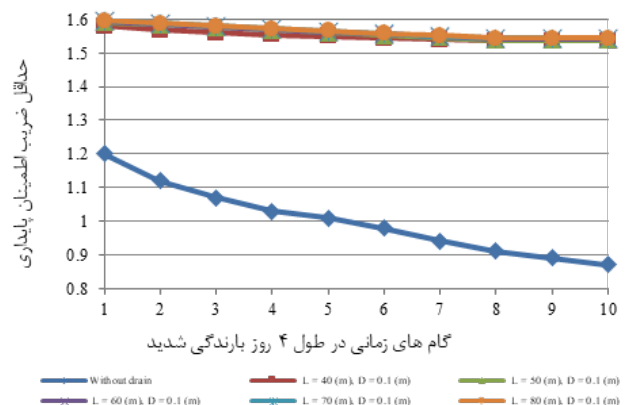
طول، ضخامت یا تعداد بیشتر، پایداری شیب خاکی را تضمین کرد.



شکل ۱۲. تأثیر شدت بارش بر ضریب اطمینان پایداری شیب

Fig12. The effect of precipitation intensity on the factor of safety

با مدل‌سازی یک زهکش افقی در ارتفاع ۲۰ متری شیب خاکی با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب به طول‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ متر، تأثیر افزایش طول زهکش‌های افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی در طول چهار روز بارندگی شدید در ۱۰ گام زمانی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ در حالت عدم کارگذاری زهکش افقی، ضریب اطمینان پایداری شیب در اولین گام زمانی دوره بارندگی شدید ۱/۲۰۵ بوده و از گام پنجم به بعد، ضریب اطمینان پایداری شیب کمتر از ۱ شده و در آخرین گام دوره بارندگی به ۰/۹۷ می‌رسد که به معنای شکست شیب خاکی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، اختلاف بسیار زیادی بین نمودار مدل اول با نمودارهای مدل دوم تا ششم وجود دارد و به کارگیری زهکش افقی در تمامی حالات موجب افزایش قابل توجهی در ضریب اطمینان پایداری شیب در طول بارندگی گردیده است. به منظور محاسبه طول بهینه زهکش در مدل مفروض، نمودار مدل‌های دوم تا ششم در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفته است.

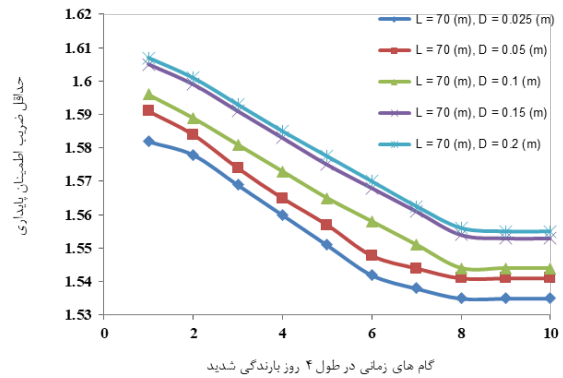


شکل ۱۳. تأثیر افزایش طول زهکش‌های افقی بر

افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب

Fig13. The effect of increasing the length of horizontal drainage on increasing the factor of safety

در مرحله بعدی با مدل سازی یک زهکش افقی ۷۰ متری با ضخامت ۱۰۰ میلیمتری در شیب خاکی به ترتیب در ارتفاع های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ متری، تأثیر محل قرارگیری زهکشها بر کارایی آنها در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این بررسی در این شکل ۱۶ آورده شده است. با توجه به مدل های بررسی شده در این قسمت نتیجه می شود به کارگیری زهکش افقی در قسمت پایین شیب خاکی موجب حصول بهترین نتیجه می شود و با افزایش ارتفاع نصب زهکش های افقی عملکرد آنها به شدت کاهش می یابد. زهکش های نصب شده در قسمت پایین شیب خاکی توانسته اند عملکرد خود را در طول بارندگی بهتر از زهکش های نصب شده در قسمت وسط و بالای شیب خاکی حفظ کنند.

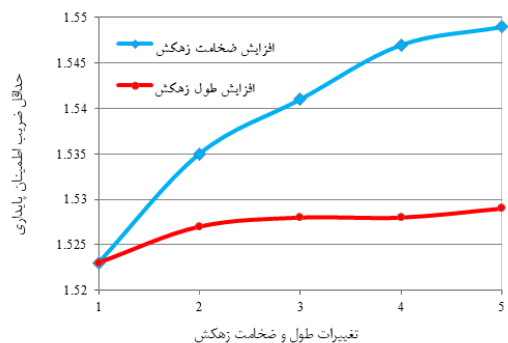


شکل ۱۵. تأثیر افزایش ضخامت زهکش های افقی

بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب

Fig15. The effect of increasing the thickness of horizontal drainage on increasing the factor of safety

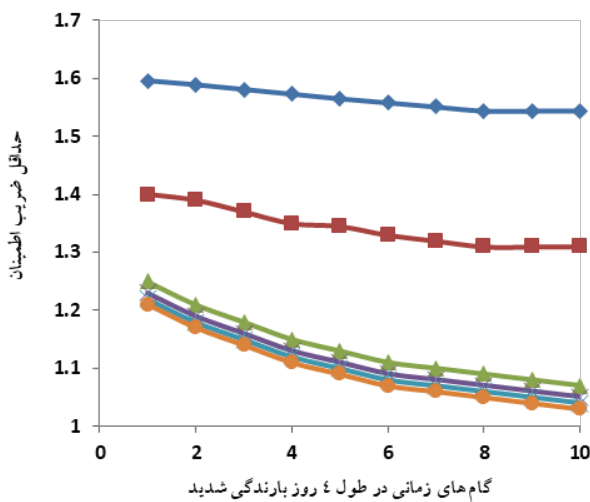
تأثیر افزایش طول و ضخامت زهکش های افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی با یکدیگر مقایسه گردید (شکل ۱۵). بدین منظور ابتدا زهکشی به طول ۵۰ متر و ضخامت های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی متر در ارتفاع ۲۰ متری شیب خاکی در نظر گرفته شدند و ضریب اطمینان پایداری شیب در آخرین گام زمانی دوره چهار روزه بارندگی شدید محاسبه گردید. سپس با ثابت نگه داشتن ضخامت زهکش افقی در ۲۵ میلی متر و افزایش طول زهکش افقی به ۷۵، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۵۰، ۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ متر، تأثیر افزایش طول زهکش افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵، در هر دو حالت افزایش ضخامت و طول زهکش های افقی، ضریب اطمینان پایداری شیب افزایش یافته، اما افزایش ضخامت زهکش افقی نصب شده تأثیر بسیار بیشتری در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب نسبت به افزایش طول زهکش دارد. قابل ذکر است که در محور افقی، ارقام ۱ تا ۵ بیانگر طول ۵۰ تا ۸۰ متر زهکش با ضخامت ۲۵ تا ۲۰۰ میلی متر میباشند.



شکل ۱۶. تأثیر افزایش طول و ضخامت زهکش های

افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی

Fig16. The effect of increasing the length and thickness of horizontal drainage on increasing the factor of safety



شکل ۱۷. تأثیر محل نصب زهکش افقی بر افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب

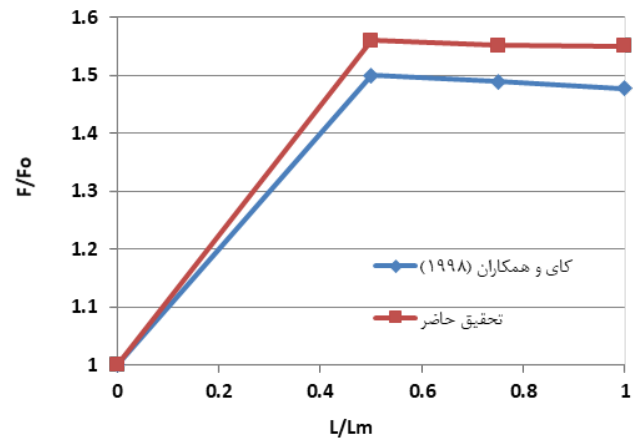
Fig17. The effect of horizontal drainage installation on increasing the factor of safety

مقایسه نتایج مدل عددی برای شبیه سازی تأثیر طول زهکش بر پایداری شیب های خاکی با مدل SLOPE/W و SEEP/W نشان می دهد که نتایج عددی این تحقیق با نتایج کای و همکاران [۱۳] که مطالعه ای بر تأثیر طول زهکش بر پایداری شیب با آنالیز سه بعدی المان محدود پرداخته اند، تقریباً روند یکسانی دارد (شکل ۱۷). با توجه به شکل ۱۶، با افزایش نسبت طول زهکش، پایداری نسبی شیب های خاکی افزایش می یابد. بیشترین اختلاف نتایج دو تحقیق برابر ۴/۷۱ درصد می باشد که مقدار ناچیزی می باشد و این مقدار بیانگر تطابق خوب نتایج این دو تحقیق می باشد.

لازم به ذکر می باشد که L طول زهکش در مدل های مختلف، Lm بزرگترین طول فرض شده در تحقیق، F ضریب اطمینان پایداری شیب

شیب در حالت با زهکش به حالت بدون زهکش) به عنوان پارامتر وابسته و L/H (نسبت طول زهکش به ارتفاع آن از کف شیب)، D/H (نسبت ضخامت زهکش به ارتفاع آن از کف شیب) و K/I (نسبت هدایت هیدرولیکی خاک به شدت بارش) به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است این معادلات برای محدوده شبیه‌سازی شده معین، یعنی به ازای $D/H > 0.01$ ، $L/H > 4$ و $K/I > 1$ ، برای ارزیابی و دقت فرمول رگرسیونی در تعیین پایداری شیب از شاخصهای آماری استفاده شده است. معیارهای ارزیابی صحت تخمین مورد استفاده در این تحقیق شامل ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میباشند. با توجه به جدول ۲ ملاحظه میشود که معادله رگرسیونی خطی در تخمین از دقت کمتری نسبت به معادله غیرخطی برخوردار است. برای معادله غیرخطی ضریب تبیین برابر 0.803 و جذر میانگین مربعات خطا برابر 0.000258 بدست آمد. در شکل ۱۸، نتایج مدل عددی (SEEP/W) در مقابل نتایج معادله رگرسیون غیرخطی رسم گردیده است. ملاحظه میگردد که نقاط دادهها در اطراف خط با شیب ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که حاکی از دقت معادله برازش داده شده است.

در مدل‌های مختلف و F/F_0 ضریب اطمینان پایداری شیب در حالت مبنا (بدون زهکش) میباشد.



شکل ۱۸. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیق کای و همکاران (۱۹۹۸)
Fig18. Comparison of the results of the present study with Cai et al. (1998)

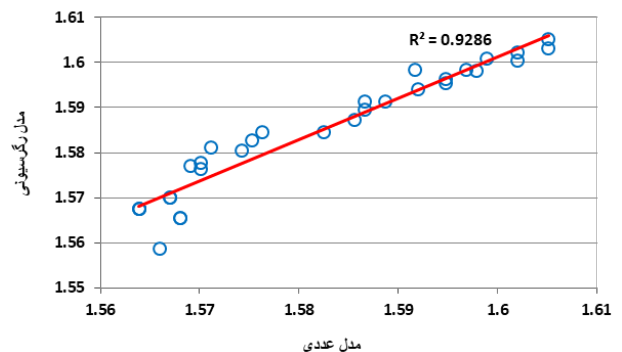
به منظور برآورد ضریب اطمینان پایداری شیب، معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم افزار SPSS ۲۰ به دست آمده است [۱۴]. در این محاسبات پارامتر F/F_0 (نسبت ضریب اطمینان پایداری

جدول ۲. معادله رگرسیون خطی و غیرخطی برای به دست آوردن ضریب اطمینان پایداری شیب
Table2. Linear and nonlinear regression equations to calculate the factor of safety

معادله	R^2	RMSE
$\frac{F}{F_0} = 2,184 * \left(\frac{D}{H}\right) + 0.005 * \left(\frac{L}{H}\right) + 0.099 * \left(\frac{K}{I}\right) + 1.462$	0.799	0.0012
$\frac{F}{F_0} = 1,153 * \left(\frac{D}{H}\right)^{0,009} + 0,455 * \left(\frac{L}{H}\right)^{0,031} + 0,024 \left(\frac{K}{I}\right)^{81,031}$	0.929	0.0014

۴- جمع بندی

وقوع بارش بر روی خاکهای شیبدار ضریب اطمینان پایداری اینگونه شبیهها را به خطر میاندازد. مخصوصا مواقعی که شدت بارش زیاد و مدت آن طولانی باشد. در این تحقیق از اطلاعات حداکثر بارشهای ۲۴ ساعته شهرستان تبریز برای بررسی پایداری شبیههای حاکی استفاده گردید. در زمانهای ابتدایی بارش، خاک غیراشباع است ولی بتدریج با طولانیتر شدن مدت بارش، سطح ایستابی ایجاد میگردد که حاکی از اشباع شدن عمقی از خاک است. لذا در شبیه سازی انجام شده در این تحقیق، منحنی رطوبتی خاک یعنی رابطه مکش-رطوبت خاک به نرم افزار SEEP/W به عنوان ورودی داده



شکل ۱۹. مقایسه مدل عددی و مدل رگرسیونی غیرخطی برای پایداری شیب با یک زهکش
Fig19. Comparison of numerical model and nonlinear regression model for the factor of safety with a drain

شیب دارد و بهتر است به جای افزایش طول زهکش‌های افقی، از زهکش‌های افقی با ضخامت بالاتر استفاده کرد. به نظر میرسد بهترین حالت برای طراحی زهکش ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر است. افزایش ضخامت زهکش‌های افقی تأثیر بیشتری از افزایش تعداد زهکش‌های افقی در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی دارد و بهتر است که به جای افزایش تعداد زهکش‌های افقی، از زهکش‌های افقی با ضخامت بالاتر استفاده کرد.

مراجع

- [1] M. Mohapatra, U.C. Mohanty, Some characteristics of very heavy rainfall over Orissa during summer monsoon season, *J. Earth Syst*, 114(1) (2005) 17-36.
- [2] M. Doostkamian, S.H. Mirmousavi, The study and analysis the clusters of heavy rainfall threshold in Iarn, *Geography and Development Iranian Journal* 13(41) (2016) 131-146.
- [3] M. Avarzamani, Numerical simulation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability with Seep/w and Slope/w software, M.Sc. Thesis in hydraulic structures, University of Tabriz, Iran, 2015. (In Persian)
- [4] R.P. Martin, K.L. Siu, J. Premchitt, Performance of horizontal drains in Hong Kong, Special Project Report, SPR 11/94, Hong Kong, 1994.
- [5] K.C. Lau, T.C. Kenney, Horizontal drains to stabilize clay slopes, *Canadian Geotechnical* 21(2) (1984) 241-249.
- [6] A. Moharrami, Y. Hassanzadeh, F. Salmasi, G. Moradi, G. Moharrami, Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions, *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5) (2014) 1957-1964.
- [7] A. Malekpour, D. Farsadzadeh, A. Hosseinzadeh Dalir, J. Sadrkarimi, Laboratory investigation on the effect of horizontal drain length and thickness on steady seepage flow through homogeneous earth dam, *Water and Soil Science- University of Tabriz*, 21(2) (2011) 51-63. (In Persian)
- [8] A. Mahmoud, M. Badakhshan, A. Seifi, the effect on the leakage flow along the horizontal drainage, power drifted and hydraulic gradient in homogeneous earth dam by numerical simulation, *Journal of Engineering and Construction Management* 1(3) (2016) 20-23. (In Persian).
- [9] H.R. Saba, M. Kamalian, I. Raiciszadeh, Gables slip threshold stability and optimal operation volume embankment navigation earth dam using combined neural network and genetic algorithms, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (DOI): 10.22060/ceej.2017.11051.4965 (2017). (In Persian)

شده است. پس از محاسبه فشار آب حفره‌ای داخل خاک به روش اجزای محدود در نرم افزار SEEP/W، نتایج به نرم افزار SLOPE/W وارد شده تا ضریب اطمینان در برابر پایداری به روش تعادل حدی بدست آید. نتایج حاکی از کاهش ضریب اطمینان پایداری در زمان وقوع بارش است. در مرحله بعد برای تثبیت شیب خاکی اقدام به در نظر گرفتن زهکش با قطرها و طولهای مختلف و در ارتفاعهای متغیر شد. کار این زهکشها جمع آوری آب در منطقه اشباع و کاهش فشار آب حفره‌ای داخل خاک است تا بدین وسیله بر پایداری شیب افزوده گردد. نتیجه شبیه سازی عددی نشان داد که کاربرد زهکش اثر مثبت زیادی بر افزایش پایداری شیب دارد. نمودارهای مختلفی برای تعیین ضریب اطمینان پایداری با زهکش در پای شیب ارائه شد. برای کاربردیتر نمودن نتایج تحقیق حاضر، اقدام به ارائه معادله رگرسیونی شد تا بتوان در طراحیها از آن استفاده نمود. معادله ارائه شده میتواند ضریب اطمینان پایداری شیب را بر حسب L/H (نسبت طول زهکش به ارتفاع آن از کف شیب)، D/H (نسبت ضخامت زهکش به ارتفاع آن از کف شیب) و K/I (نسبت هدایت هیدرولیکی خاک به شدت بارش) بدست دهد.

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به کارگیری زهکش‌های افقی در افزایش پایداری یک شیب خاکی در زمان وقوع بارندگی با شدتهای مختلف توسط شبیه‌سازی عددی بررسی گردید که اهم نتایج به صورت میباشند:

در تمام حالات، نصب زهکش‌های افقی موجب افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی در مقابل لغزشها گردید. افزایش طول زهکش‌های افقی تا اندازه ۰/۴ برابر طول کل افقی شیب خاکی موجب افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی می‌شود، اما گسترش طول این زهکشها به بیشتر از این مقدار موجب افزایش بیشتر ضریب اطمینان پایداری شیب نمی‌گردد و با وجود افزایش هزینه نصب زهکشها، نتایج مناسبتری در پایداری شیب خاکی حاصل نمی‌شود. نصب زهکش افقی در ارتفاعهای پایینتر شیب خاکی تأثیر بیشتری در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی نسبت به نصب زهکش افقی در ارتفاعهای وسط یا بالای شیب خاکی دارد. با افزایش ضخامت زهکش‌های افقی تأثیر این زهکشها در افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب بیشتر می‌گردد و با توجه به بررسی صورت گرفته نسبت طول به ضخامت زهکش‌های افقی معادل ۲۵۰ تا ۷۵۰ به عنوان نسبت بهینه پیشنهاد می‌گردد. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق افزایش ضخامت زهکش‌های افقی تأثیر بیشتری از افزایش طول زهکش‌های افقی در افزایش ضریب اطمینان پایداری

soils, K.N. Toosi University, Tehran, 2009. (In Persian)

[13] F. Cai, K. Ugai, A. Wakai, Q. Li, Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis, *Journal of Computers and Geotechniques*, 23 (1998) 255-275.

[14] SPSS (Version 20), Statistical package for social science (SPSS) software version 20.

[10] S. Behrouzinia, H. Ahmadi, N. Abbasi, Dynamic properties of seepage and stability on upstream slope of an unsaturated homogeneous earth dam subjected to rapid drawdown, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(1) (2015) 19-36.

[11] Geo-Slope Version 7.1.0 User manual, Geo Slope International, Calgary, 2012.

[12] H. Ghasemzadeh, Seepage in saturated and unsaturated

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Salmasi, A. Hosseinzadeh Dalir, R. Norouzi Sarkarabad, Investigation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rainfall conditions by numerical simulation, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)491-502.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13739.5468



