



عملکرد زهکش‌های افقی و دودکشی در پایداری دیوار حائل شیب‌های خاکی

بهروز اوقاتی بخشایش^۱، میثم نوری^{۲*}، فرزین سلماسی^۳

- ۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- ۳- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

کلمات کلیدی:
سیستم زهکش
فشار آب منفذی
بارندگی‌های شدید
شیب خاکی
پایداری

خلاصه: به علت بارندگی‌های شدید، سطح آب زیرزمینی و فشار آب منفذی هر ساله افزایش می‌یابد که این عامل می‌تواند باعث شکست شیب‌های خاکی شود. دیوار حائل یکی از سازه‌هایی است که جهت افزایش پایداری شیب‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SLOPE/W پایداری شیب‌ها نسبت به شرایط هیدرولوژیکی بحرانی و با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W فشار حفره‌ای مازادی که باعث ناپایداری دیوار حائل با ارتفاع ۱۰ متر می‌گردد، مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد مطالعه عبارت‌اند از: شدت بارش‌ها، جنس خاک، موقعیت قرارگیری زهکش‌ها و قطر زهکش‌ها. همچنین نوع زهکش‌ها نیز به عنوان متغیر واقع شد و از دو نوع زهکش افقی و دودکشی استفاده شد. بر اساس نتایج حاصله، در شرایط بارش شدید در خاک‌های ریزدانه، استفاده از یک زهکش افقی نمی‌تواند پایداری دیوار حائل را تامین کند. این در حالی است که در شرایط مشابه و در خاک‌های درشت دانه، پایداری دیوار حائل توسط یک زهکش افقی تامین می‌شود و زهکش قادر به تخلیه آب مازاد از پشت دیوار خواهد بود. همچنین نتایج بدست آمده برای زهکش‌های دودکشی نشان دهنده پایداری دیوار حائل توسط این زهکش‌ها در بحرانی‌ترین شرایط می‌باشد. در رابطه با محاسبه فشار منفذی و گشتاورهای واژگونی روابط بی‌بعد خطی و غیرخطی رگرسیونی ارائه گردید. روابط رگرسیونی از لحاظ دقت در سطح بالایی قرار دارند و می‌توان از آنها نتایج قابل قبولی را انتظار داشت.

نگهداری خاک در اختلاف سطح به کار می‌رود. کاربرد این سازه‌ها بیشتر در احداث راه‌ها و شاهراه‌ها است [۱]. زمانی می‌توان از دیوار حائل با اطمینان استفاده کرد که دیوار توان مقابله با برآیند بارهای وارد شده از طرف خاک را که عامل واژگونی^۴ یا لغزش هم تلقی می‌شود داشته باشد. پس در این خصوص نیاز به زهکشی و کاهش فشار منفذی در مواقع بارش‌های جوی و یا بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی احساس می‌شود.

پایداری شیروانی‌های خاکی در زندگی روزمره کنونی بشر نقش تاثیر گذاری دارد، چون در بسیاری از موارد کنترل شیب‌ها در مقابل

4 Overturning

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.

۱- مقدمه
همه ساله با وقوع بارش‌های جوی و بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی، فشار منفذی^۱ در شیب‌های خاکی افزایش می‌یابد و خطر بالقوه‌ای را برای شیب‌های خاکی به خصوص برای خاک‌های ریزدانه به وجود می‌آورد. از این رو در شیب‌هایی که خطرات ریزش^۲ آن‌ها می‌تواند هزینه‌های بالا یا تلفات جانی را به بار آورد، نیاز به ساخت دیوارهای حائل^۳ بیشتر احساس می‌شود. دیوار حائل معمولاً جهت

- 1 Pore pressure
- 2 Land-slide
- 3 Retaining wall

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: meysamnouri71@gmail.com



فرسایش و رانش در مناطق مهم همچون جاده‌ها، مناطق مسکونی، سدها و... عاملی برای ایجاد خطرات مالی و جانی می‌باشد. از این رو در صورت بارش باران‌های شدید، سطح آب‌های زیرزمینی به سرعت بالا آمده و باعث افزایش فشار منفذی شده و مقاومت برشی خاک به مراتب پایین می‌آید و خطر ریزش شیروانی‌های خاکی افزایش می‌یابد. به همین دلیل زهکشی در این شرایط حتی با وجود دیوار حائل مقاوم نقش حیاتی را می‌تواند ایفا کند. برای مثال در ۲۳ جولای ۱۹۹۴ در دیوار حائل کوون لونگ لاو^۱ در هنگ کنگ پس از بارش‌های جوی رانش زمین شدیدی رخ داد و در نتیجه آن ۵ نفر جان خود را از دست دادند [۲]. در اجرای زهکشی دیوار حائل روش‌های گوناگونی را به کار می‌گیرند که از کاربردی‌ترین آنها استفاده از زهکش‌های افقی و زهکش‌های دودکشی می‌باشد. اولین مورد استفاده از زهکش‌های افقی در کالیفرنیا مشاهده شد. استنتون [۳] گزارش موفقیت آمیز استفاده از زهکش‌های افقی برای پایداری شیب‌های بزرگ را اعلام کرد و از آن پس مورد‌های تاریخی منتشر شده از کشورهای زیادی، تأثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیب‌ها و خاکریزها را تحت شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی مختلف اعلام کرده‌اند [۱۰-۴]. با توجه به اهمیت موضوع مطالعات مختلفی صورت گرفته است. پانگ و اس. وی. اس [۱۱] در مطالعه‌ای که هدف آن تعیین منابع آبی زهکشی و توصیف یک الگوی صحیح و معمول برای حرکت آب و خروج آن از زهکش‌های افقی بوده است، دیوار حائلی را به ارتفاع ۸ تا ۱۰ متر مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به الگوی تراوش می‌توان منبع آب نشتی را به دست آورد و با نصب سیستم زهکشی نامنظم (در نقاط و موقعیت‌های مختلف) می‌توان آب سطحی را از آن به نحو خوبی خارج ساخت. این تحقیق یک گزارش عملی از نصب سیستم زهکشی با الگوی نامنظم نیز بوده است که پس از نصب زهکش به مطالعه و تفحص بر روی آن پرداخته شده است.

فیشمن [۱۲] در مطالعه‌ای به بررسی پایداری شیب‌های خاکی پرداخته است. این تحقیق در مورد دیوارهای حائل بتنی و سطح تماس آن‌ها با بستر سنگی می‌باشد که در مورد مکانیزم لغزش، واژگونی و کج شدن‌های محدود بحث می‌کند. این تحقیق نشان داده است که در قسمت سطح تماس دیوار حائل با بستر، زمانی لغزش می‌تواند رخ دهد که پارامترهای برشی فونداسیون تضعیف شده باشد،

در غیر این صورت لغزش رخ نخواهد داد. در رابطه با کج شدن یا شکستگی جزئی و محدود در دیوارهای حائل که بیشترین درصد وقوع را به خود اختصاص می‌دهد، این تحقیق آشکار کرده است که شکست پاشنه بالادست دیوار و فشار بیش از حد در این قسمت می‌تواند عامل اصلی این موضوع باشد و موجب گسیختگی دیوار از پی در پاشنه بالادست آن نیز شود. کلکویناس و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای به بررسی زلزله بر روی دیوارهای حائل پیش ساخته بلوکی پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده هماهنگی و همخوانی بسیار خوبی با مدل‌های تئوریک داشته و درک بهتری از عملکرد پیچیده این عوامل را می‌دهد. این تحقیق صرفاً به منظور اعمال اثر زلزله بوده و پایداری دیوار در مقابل لغزش‌های شدید را بررسی کرده است. بلیک و همکاران [۱۴] در راستای پیش‌بینی فشار مضاعف حفره‌ای به دلیل بارش‌های شدید جوی، به روش المان محدود دیوار حائلی را مدل کرده‌اند و تأثیر زهکش‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، توصیه محقق به استفاده از زهکش‌های افقی یا همان لوله‌ای بوده است تا تعامل بین مقدار فشار حفره‌ای خاک پشت دیوار حائل و پایداری دیوار حائل بیشتر شود. محرمی و همکاران [۱۵] با بررسی تأثیر زهکش‌های افقی در پایداری شیب‌های خاکی در حالت تخلیه سریع، استفاده از زهکش در رقوم پایین تر را مناسب توصیه کرده‌اند و بیان داشته‌اند که افزایش تعداد زهکش‌ها موجب افزایش پایداری می‌گردد. راهاراجو و همکاران [۱۶] با مطالعه دو شیب خاکی، به بررسی موقعیت بهینه زهکش‌های افقی پرداخته‌اند [۱۷]. مطالعات محققین مذکور نیز در بارندگی‌های شدید صورت گرفته است و آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به این که بارندگی‌ها در مدت زمان کوتاهی رخ می‌دهند با استفاده از حالت تحلیلی پایا نمی‌توان پایداری شیب‌ها را مورد بررسی قرار داد. شیوا کمار و همکاران [۱۸] پایداری شیب‌ها را به روش المان محدود بررسی کرده‌اند و بیان داشته‌اند که در زمان تخلیه سریع نیاز به بررسی جدی پایداری شیب‌ها وجود دارد. ویسونادهام و همکاران [۱۹] با مقایسه دیوار حائل تقویت شده حاوی زهکش دودکشی و دیوار حائل تقویت شده بدون زهکش دودکشی، کاهش ۷۶ الی ۷۸ درصد را در مقادیر فشار آب حفره‌ای در صورت استفاده از زهکش دودکشی را گزارش دادند. بکمان و لوهر [۲۰] در مطالعه‌ای به جای استفاده از سوراخ آب^۲ برای زهکشی دیوارهای

نرم افزار SEEP/W در مطالعات مختلف به وفور صورت گرفته است. خلیلی شایان و امیری تکلدانی [۲۳] در مطالعه‌ای مقادیر نشت و زیرفشار حاصل از نرم افزار و مقادیر آزمایشگاهی را مورد مقایسه قرار داده‌اند که مقایسه آن‌ها نشان دهنده دقت بسیار بالای نرم افزار بوده است که میانگین مربعات خطا (MSE) برابر $0/00000007$ حاصل شده است. هم چنین سازمان مهندسی ارتش آمریکا (USBR) در سال ۲۰۱۴ مطالعات خود را با مدل سازی توسط SEEP/W انجام داده است و دقت بالای نرم افزار را در مطالعات خود بیان داشته است [۲۴].

۲-۲- معرفی نرم افزار SLOPE/W

نرم افزار SLOPE/W از مجموعه نرم افزاری GEOSTUDIO می باشد که جهت بررسی سطوح شیب دار و تعیین ضریب اطمینان در طراحی شیب می باشد که این عمل در نرم افزار از طریق روش های تعادل حدی مانند بیشاب، جانبو و روش ابتدایی و یا از طریق روش های مورگنسترن و پرایس، اسپنسر و GLE صورت می گیرد [۲۱]. در نرم افزار SLOPE/W برخلاف دیگر نرم افزارهای مجموعه نرم افزاری GEOSTUDIO از روش المان محدود استفاده نمی شود و شامل مجموعه ای از روش های ترسیم برای تحلیل پایداری شیب می باشد [۲۵]. شکل ۱ دیوار حائل فرضی در این تحقیق و زهکش های مورد را نشان می دهد. دو نوع زهکش مورد مطالعه، زهکش دودکشی و زهکش افقی در شکل مشخص شده اند. پارامترهای مورد مطالعه نیز در جدول ۱ مشخص شده اند.

با توجه به پارامترهای متعددی که در پایداری دیوار حائل نقش دارند، بررسی همه آن‌ها در یک مطالعه ممکن نیست. پارامترهای مهم و موثر انتخاب شده و در این تحقیق مورد مطالعه و مدل سازی قرار گرفتند که عبارت‌اند از: ارتفاع مختلف لوله زهکش روی دیوار (در نوع زهکشی لوله‌ای)، شدت بارش‌های مختلف، ضخامت لایه فیلتر زهکشی (در نوع زهکش دودکشی) و جنس خاک پشت دیوار حائل. پارامترهایی همچون ارتفاع دیوار حائل، ضخامت دیوار حائل، شکل فونداسیون دیوار، موقعیت سنگ بستر، جنس دیوار حائل و شیب خاک پشت دیوار حائل از زمره پارامترهایی می باشند که از پیش تعیین شده و در تمامی مدل‌ها به صورت ثابت اعمال شده اند. جدول ۱ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها را نشان می دهد. در این

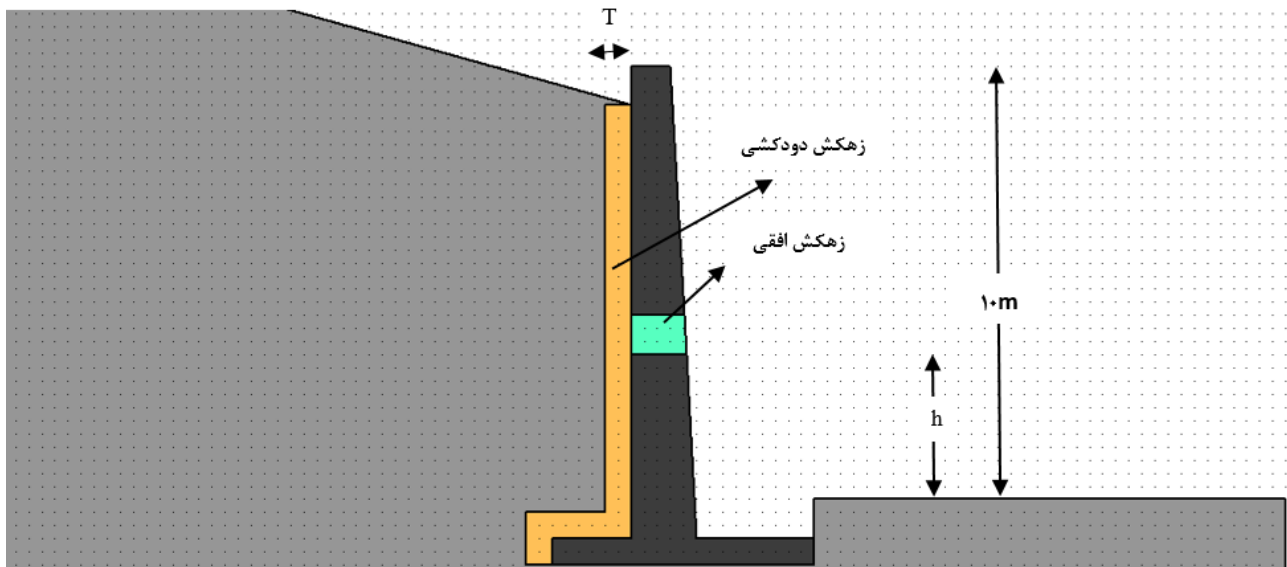
حائل شیب‌های خاکی، از زهکش‌هایی با قابلیت نگهداری جداگانه استفاده کردند. به عبارتی زهکش‌های ارائه شده در این گزارش از دو قسمت تشکیل شده‌اند، یک قسمت ثابت درون دیوار حائل و یک فیلتر با قابلیت ترمیم و نگهداری، که در این گزارش استفاده از این زهکش‌ها به جای سوراخ آب توصیه شده است.

با توجه به فقدان نتایج قابل استفاده برای طراحی و اجرای سیستم‌های زهکشی دیوار حائل، نیاز به روابط و معیارهای طراحی بیش از پیش احساس می شود. هم چنین پایداری شیب‌ها در صورت وجود انواع زهکش مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از انواع زهکش‌ها صورت نگرفته است. در این تحقیق عملکرد زهکش‌های افقی و دودکشی در کنترل فشار آب منفذی و حفظ پایداری شیب‌های خاکی در زمان وقوع بارندگی‌های شدید توسط دو نرم افزار SEEP/W و SLOPE/W [۲۱] مورد مطالعه قرار می گیرد. ابتدا شیب خاکی مورد نظر در نرم افزار SEEP/W مدل می شود، سپس با تعریف مصالح موجود و شرایط مرزی، تغییرات فشار آب منفذی در زمان وقوع بارندگی شدید بررسی می شود و با مدل سازی زهکش‌های افقی و دودکشی تأثیر این زهکش‌ها بر کاهش فشار آب منفذی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس نتایج حاصله وارد نرم افزار SLOPE/W گردیده و تأثیر بکارگیری زهکش‌های افقی و دودکشی بر روی حفظ پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی شدید مورد بررسی قرار می گیرد. در نهایت سعی می شود روابط رگرسیونی برای محاسبه نیروها و گشتاور واژگونی وارد بر دیوار حائل ارائه شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی نرم افزار SEEP/W

نرم افزار SEEP/W از مجموعه نرم افزاری GEO-STUDIO می باشد [۲۱]. این نرم افزار بر اساس روش المان محدود^۱ امکان مدل سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل را در اختیار کاربر قرار می دهد. این نرم افزار قادر است علاوه بر شبیه سازی جریان در محیط‌های اشباع، جریان در محیط‌های غیراشباع را هم مدل سازی کند که در مدل سازی واقعی جریان‌های آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد یک حسن بزرگ به شمار می آید [۲۲]. اعتبار سنجی



شکل ۱. دیوار حائل به ارتفاع ۱۰ متر، زهکش دودکشی و زهکش افقی مورد مطالعه

Fig. 1. The retaining wall with 10 m height including horizontal and chimney drainage

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها

Table 1. The values of used parameters in models

مقادیر مورد استفاده	پارامترهای موثر
۸، ۶، ۴، ۲، ۰ متر	فاصله زهکش افقی از کف دیوار (h)
۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ سانتی‌متر	ضخامت لایه فیلتر زهکش دودکشی (T)
۱۵، ۵ میلی‌متر در ساعت	شدت بارش‌های جوی (P)

۲ روز بارش بی‌وقفه و شدید ۲۴۰ میلی‌متر و ۷۲۰ میلی‌متر را شامل می‌گردد در نظر گرفته شد.

شرایط مرزی در نظر گرفته برای مدل‌سازی عبارت‌اند از: فشار صفر برای خروجی زهکش‌ها، شدت بارش به عنوان شرط مرزی ورودی به دیوار حائل. همچنین در این نرم‌افزار، زهکش‌ها و دیوار حائل به صورت مصالح با نفوذپذیری‌های مختلف قابل تعریف‌اند.

۲-۳- نحوه محاسبه نیروی مخرب و گشتاور واژگونی از طریق فشار حفره‌ای

از آنجایی که نرم افزار SEEP/W قابلیت محاسبه نیروی وارد بر دیوار از طرف خاک و یا گشتاور واژگونی را ندارد، راه دیگری برای محاسبه نیروی وارد شده استفاده گردیده است. رابطه (۱) بین فشار (P) و نیرو (F) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطالعه برای رسیدن به نتیجه‌ای قابل استفاده در واقعیت از سه نوع خاک مختلف در پشت دیوار حائل استفاده شده‌است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

کاهش اندازه المان‌ها در نرم‌افزار Seep/W، افزایش دقت نتایج خروجی را در بر خواهد داشت. به همین علت مدل‌های مختلفی با اندازه المان‌های متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد تا جایی که کاهش اندازه المان‌ها، دیگر تاثیری در نتایج خروجی نداشته باشد و از آن به عنوان آزمون مستقل بودن المان‌ها یاد می‌شود [۳۴]. برای رسیدن به تعداد المان‌های مناسب در این مطالعه، آزمون مستقل بودن المان‌ها صورت گرفت و تعداد المان ۴۴۷۱۶ مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل‌ها برای آنالیز نشت از حالت ناپایا استفاده شد و چون ورودی بارش براساس زمان می‌باشد و لذا زمان تاثیر زیادی روی تحلیل می‌تواند بگذارد، بدین منظور ۱۰۰ گام زمانی را که مجموعاً

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی خاک‌ها [۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲]

Table 2. Hydraulic property of soils

پارامترها	سیلت	سیلت لوم	رس
K_{sat}	$5/0.52 \times 10^{-6}$ (متر بر ثانیه)	$2/1.07 \times 10^{-6}$ (متر بر ثانیه)	$1/712 \times 10^{-6}$ (متر بر ثانیه)
K_x/K_y	۱	۱	۱
مقدار رطوبت اشباع	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۵۱
محتوی آب باقی مانده	۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۱
معیار لغزش	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb
وزن واحد جرم	۱۸/۲۴ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۸/۴۳ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۸/۸۶ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
ϕ	۲۹ درجه	۲۵/۳ درجه	۲۳/۱ درجه
چسبندگی	۳/۴ کیلو پاسکال	۵ کیلو پاسکال	۷/۸ کیلو پاسکال

برای بی‌بعد سازی نیروی وارد بر دیوار نیز نیروی وارد بر دیوار که بر حسب کیلو نیوتن می‌باشد بر وزن دیوار بر حسب کیلو نیوتن تقسیم می‌گردد.

$$\frac{F}{W} = \frac{[MLT^{-2}]}{[MLT^{-2}]} = Dimensionless \quad (5)$$

در رابطه فوق الذکر F نیروی وارد بر دیوار حائل و W نیروی وزن خود دیوار حائل می‌باشد که با استفاده از مصالح بتن مسلح محاسبه می‌گردد و ρ برای بتن مسلح به طور میانگین ۲/۶ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده‌است. در خصوص گشتاور مخرب و گشتاور پایداری دیوار می‌توان اینگونه بیان نمود که گشتاور مخرب در این مدل گشتاور نیروی وارد شده به دیوار از جهت فشار حفره‌ای است و در نقطه مقابل آن گشتاور پایداری دیوار نیز گشتاور مربوط به وزن دیوار حائل می‌باشد که بسته به شکل و جنس دیوار حائل می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. محور گشتاور، پاشنه پایین دست دیوار که گشتاور واژگونی حول آن محور در گردش خواهد بود فرض گردیده است. نیروی وارد بر هر المان ضرب در میانگین فاصله عمودی آن از محور گردش گشتاور برابر با گشتاور واژگونی دیوار حائل خواهد بود و در رابطه با گشتاور پایداری هم بدین صورت است که گشتاور وزنی هر قسمت از دیوار حائل ضرب در فاصله افقی محور نیرو از محور گردش گشتاور با گشتاور پایداری دیوار حائل برابر خواهد بود.

برای بی‌بعد سازی پارامتر گشتاور نیز از نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور پایداری استفاده گردیده است.

$$\frac{Overturn\ torque}{Stability\ torque} = \frac{M}{M} = \frac{[ML^2T^{-2}]}{[ML^2T^{-2}]} = Dimensionless \quad (6)$$

$$F = PA \quad (1)$$

پارامتر فشار را می‌توان از نرم افزار به ازای هر المان به دست آورد. برای محاسبه‌ی مساحت (A) نیز فواصل المان مورد نظر (y_i) با المان مجاور (y_{i-1}) ضرب در عرض مدل که نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض برای یک متر واحد محاسبه می‌کند محاسبه می‌شود و مجموع نیروهای المان‌ها برابر است با نیروی وارد بر دیوار حائل که در رابطه‌ی ۲ نشان داده شده‌است:

$$F_i = \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \times (y_i - y_{i-1}) \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۲، p_i فشار وارده بر المان مورد نظر و p_{i-1} فشار وارده بر المان مجاور می‌باشد. برای تحلیل رابطه نیرو و موقعیت زهکش یا قطر زهکش، مقادیر نیرو و موقعیت بصورت بی‌بعد ارائه شده‌است. به این صورت که برای بی‌بعد سازی موقعیت زهکش، فاصله زهکش از کف تقسیم بر ارتفاع دیوار حائل گردیده است و برای قطر فیلتر زهکش نیز به همین صورت انجام گرفته است.

$$\frac{h}{H} = \frac{[L]}{[L]} = Dimensionless \quad (3)$$

$$\frac{T}{H} = \frac{[L]}{[L]} = Dimensionless \quad (4)$$

که در این روابط H ارتفاع دیوار حائل برابر ۱۰ متر می‌باشد، h فاصله زهکش افقی یا لوله‌ای از کف مدل می‌باشد و شامل مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ متر است و T که قطر فیلتر زهکش در نوع دودکشی می‌باشد که مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر را شامل می‌شود.

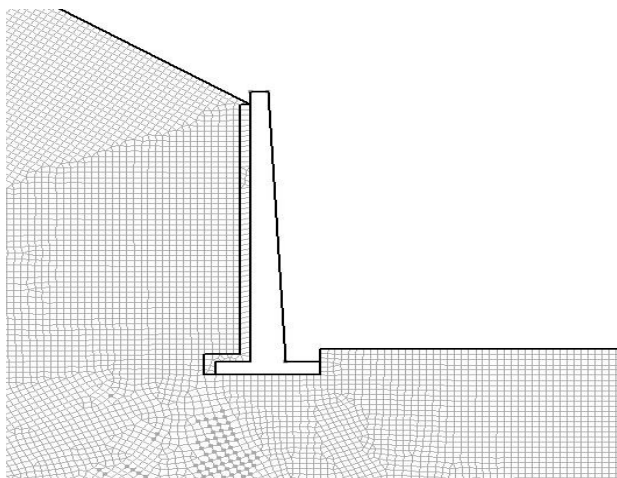
برای وارد نمودن سطح آب‌های زیرزمینی به مطالعه دقیق منطقه‌ای برای هر مدل نیازمند است که پارامترهایی همچون بافت هر لایه خاک، سطح بارش، مدت زمان و میانگین بارش‌های جوی، تبخیر از سطح، شیب منطقه، نوع بستر، فاصله قشر غیرقابل نفوذ از سطح خاک، جریان آب‌های زیرزمینی و تداخل آن‌ها با هم و پارامترهای بیشتری نظیر این موارد که هر کدام به نوبه‌ی خود تاثیر عمده‌ای روی سطح آب‌های زیرزمینی می‌گذارند در نظر گرفته شوند. لذا برای مدل نمودن دقیق‌تر و بررسی روی این موارد، هر مدل شرایط ژئوتکنیکی و تحلیل مختص به خود را خواهد داشت و نمی‌توان تمامی شرایط را به حالت کلی تعمیم داد.

لذا برای حل این مشکل در این مطالعه شرایط اولیه خاک به صورت اشباع در نظر گرفته شد و مدل‌سازی بر اساس بحرانی‌ترین حالت ممکن انجام شد. لذا نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی در مقایسه با نتایج به دست آمده با شرایط واقعی که سطح آب‌های زیرزمینی پایین‌تر از تراز سطح خاک و موقعیت زهکش باشد، می‌تواند به عنوان حالت بحرانی شناخته شود؛ اما تصور اینکه حالت اشباع یا شرایط بحرانی به وقوع بپیوندد امری خارج از تصور نیست. هدف اساسی این تحقیق مقایسه و بهینه‌یابی موقعیت مناسب و قطر فیلتر زهکشی می‌باشد که با اغماض سطح آب‌های زیرزمینی نیز می‌توان از مقایسه و تفسیر نتایج آن استفاده نمود و حتی می‌توان نتایج این مدل‌سازی را به عنوان مرز بحرانی در نظر گرفت که وقوع آن یک خط قرمز برای دیوار حائل و شیب خاکی باشد.

در رابطه با شدت بارش و همچنین هدایت هیدرولیکی خاک، رابطه بی بعد آن به صورت زیر خواهد بود:

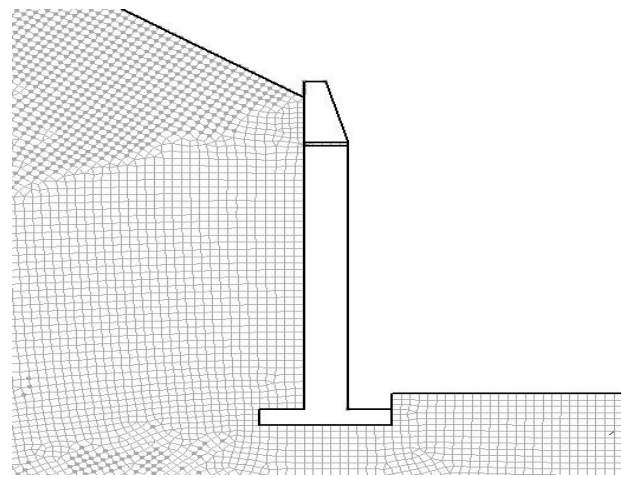
$$\frac{P}{K} = \left[\frac{LT^{-1}}{LT^{-1}} \right] = Dimensionless \quad (7)$$

همچنین قطر لوله‌های زهکش افقی در این مطالعه، ۱۰ سانتی‌متر ثابت فرض شده‌است. در پایان نیز روابط بی‌بعد رگرسیونی برای محاسبه نیروها و گشتاور وارده ارائه شده‌است. در شکل ۲ نمونه‌ای از مدل دیوار حائل با دو نوع زهکش مورد مطالعه نشان داده شده‌است. همان‌طور که اشاره شد برای اعمال تاثیر بارندگی باید از حالت ناپایا استفاده شود. برای استفاده از حالت ناپایا بایستی شرایط فشار خاک اولیه یا همان سطح آب‌های زیرزمینی برای برنامه که از شرایط اولیه اجرای برنامه می‌باشد مشخص شود. برای مشخص نمودن سطح آب‌های زیرزمینی که در هر منطقه و نسبت به بافت‌های خاک منطقه‌ای و میزان میانگین بارش سالانه بارش موقعیت کاملاً متفاوتی دارد، می‌توان از تحلیل حالت پایا کمک گرفت، به صورتی که باران تجمعی مدت طولانی مانند ماه‌ها یا سال‌ها را در طول مدت آن تقسیم نمود و بارشی یکنواخت را ایجاد نمود و مدل را با استفاده از تحلیل پایا و اعمال این بارندگی اجرا نمود و سطح آب‌های زیرزمینی را مشخص کرد که مرز پتانسیل صفر یا مشترک بین خاک اشباع و خاک غیراشباع نشان دهنده‌ی سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد. اما



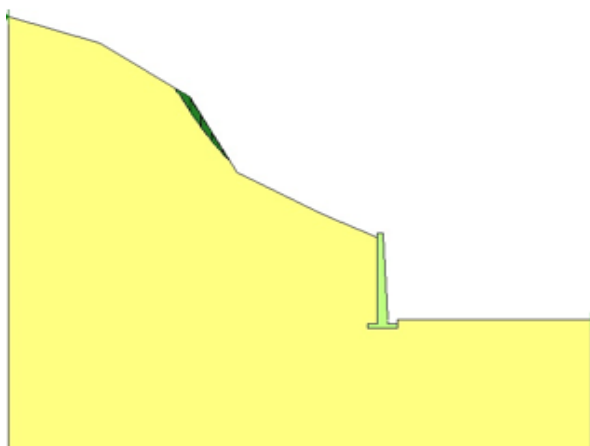
شکل ۲، ب: شکل مدل دیوار حائل با زهکش دودکشی و قطر فیلتر ۳۰ سانتی‌متر و شبکه‌بندی آن

Fig. 2(b). Retaining wall with chimney drainage (T= 30 cm) and visualation of meshing



شکل ۲، الف: شکل مدل دیوار حائل با زهکش افقی در ارتفاع ۸ متر از کف و شبکه‌بندی آن

Fig. 2(a). Retaining wall with horizontal drainage at h=8 m and visualation of meshing

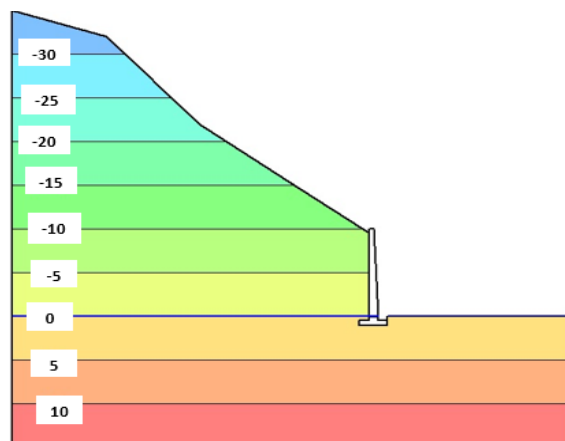


شکل ۴. نمایی از مدل لغزش شیب با زهکش افقی در فاصله صفر متر از کف، قبل از وقوع بارندگی در نرم افزار SLOPE/W

Fig. 4. Schematic view of the slope sliding including horizontal drain in a simulated model at a distance of 0 m from the floor, before precipitation occurring in SLOPE/W

پارامترهای مقاومت خاک را نیز می‌تواند محاسبه نماید. اما در مدل مذکور یک سازه حفاظتی شیب خاکی که همان دیوار حائل می‌باشد موجود است و پایداری این شیب به وسیله این دیوار تامین می‌گردد. نرم افزار قابلیت برداشت نتایج با استفاده از دیوار حائل و بدون استفاده از آن را دارد اما پارامترهایی که بتواند پایداری خود دیوار نسبت به واژگونی یا لغزش به دست آورد در این برنامه موجود نمی‌باشد. پس از این نرم افزار و نتایج آن به منظور مقایسه پایداری شیب قبل و بعد از ایجاد دیوار حائل استفاده می‌شود و برای پایداری خود دیوار از روشی دیگر و با استفاده از فشار حفره‌ای خاک پشت دیوار حائل استفاده می‌گردد. در شکل ۵ لغزش شیب خاکی نشان داده شده‌است که شکل ۶ تاثیر دیوار حائل و زهکش موجود بر لغزش شیب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، پس از بارندگی شیب خاکی به شدت دچار لغزش شده‌است و اگر این شیب در نواحی خاصی همانند اطراف جاده‌ها و ... باشد می‌تواند مخاطراتی را ایجاد کند. قسمت با رنگ سبز در شکل ۵ نشان دهنده گسیختگی خاک است و احتمال ریزش دیواره وجود دارد. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد استفاده از دیوار حائل و زهکش افقی به خوبی مانع از لغزش و ناپایداری دیواره گردیده است. لذا انتخاب نوع زهکش و پارامترهای بهینه آن برای پایداری شیب‌ها می‌تواند امری بسیار مهم باشد.

۳-۱- تاثیر بارندگی در افزایش فشار حفره‌ای شیب خاکی پشت دیوار حائل



شکل ۳. نمایی از مدل زهکش افقی در فاصله صفر متر از کف، قبل از وقوع بارندگی در نرم افزار SEEP/W

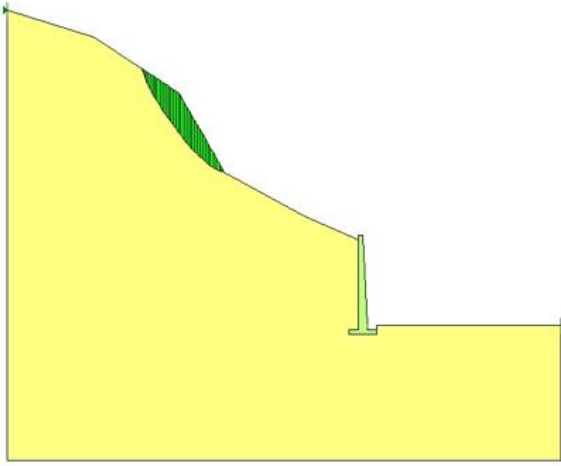
Fig. 3. Schematic view of the simulated model with horizontal drain at a distance of 0 m from the floor, before precipitation occurring in SEEP/W

برای انجام مطالعه، ابتدا مدل سازی‌ها توسط نرم افزار SEEP/W صورت گرفت و هندسه شیب خاکی و زهکش‌ها تکمیل شد. با استفاده از حالت گذر نرم افزار، بارش‌هایی با شدت مشخص بر شیب اعمال گردید. سپس برای بررسی وضعیت شیب از لحاظ پایداری، هندسه تعریف شده در SLOPE/W مورد مدل سازی و بررسی واقع شد. با بررسی وضعیت مدل از لحاظ پایداری با استفاده از دو نوع زهکش مورد اشاره (دودکشی و افقی) و با تغییر پارامترهای موثر آن‌ها، سعی بر معرفی سیستم زهکشی بهینه برای پایدار سازی شیب خاکی در بارش‌های شدید شد. در پایان نیز با استفاده از خاصیت رگرسیونی و نتایج حاصل از مدل سازی‌ها، روابطی برای طراحی زهکش‌های بهینه برای پایداری هر نوع شیب خاکی ارائه شد.

۳- نتایج و بحث

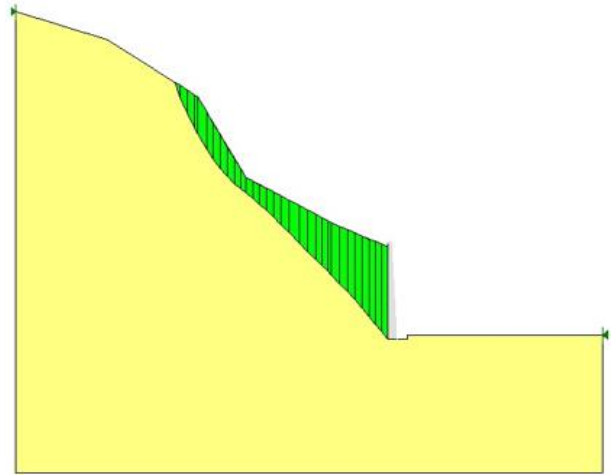
در شکل ۳ نمایی از شرایط دیوار حائل و شیب خاکی در نرم افزار SEEP/W قبل از وقوع بارش و در لحظه‌ی صفر ثانیه نمایش داده می‌شود و شکل ۴ در شرایط مذکور و برای همان مدل در نرم افزار SLOPE/W می‌باشد. در شکل ۴ قبل از اعمال بارندگی، شیب در حالت پایا قرار دارد و با اعمال بارش بر روی این مدل باید دید که شیب پس از بارندگی نیز پایداری خود را حفظ خواهد کرد یا نه؟

در رابطه با نرم افزار SLOPE/W می‌توان گفت که این نرم افزار در اصل برای تحلیل پایداری شیب‌ها و گسیختگی شیب‌های خاکی ابداع شده‌است و ضریب اطمینان پایداری شیب‌های خاکی و



شکل ۶. وضعیت شیب خاکی پس از بارش با استفاده از زهکش افقی

Fig. 6. Soil slope status after precipitation using horizontal drainage



شکل ۵. وضعیت شیب خاکی پس از بارش بدون استفاده از زهکش

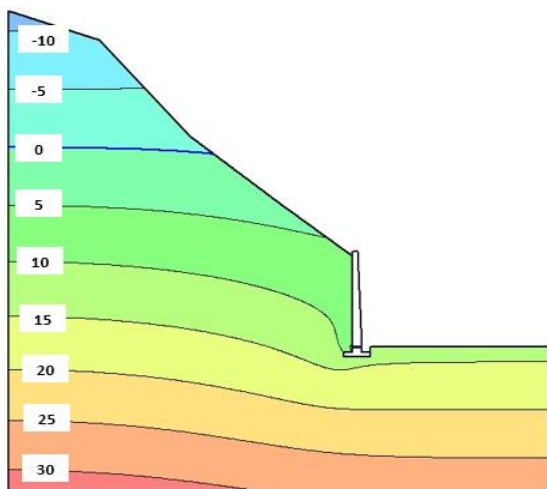
Fig. 5. Soil slope status after precipitation without drainage system

نیروی وارد بر دیوار حائل به $7/09$ کیلونیوتن افزایش می‌یابد. در مدل دوم که همان مشخصات را دارد و پس از بارش 15 میلی‌متر در ساعت نیروی وارد بر دیوار حائل برابر $75/39$ کیلونیوتن می‌باشد که اختلافی بیش از 10 برابر را شامل می‌شود. انتظار می‌رود که در بارش‌های کمتر از این حد نیز اختلاف بدین صورت نزولی باشد و فشار حفره‌ای به مراتب پایین‌تر از این مقادیر باشد.

در رابطه با گشتاور واژگونی این دو مدل می‌توان به مقدار $18/60$ کیلونیوتن متر برای بارش 5 میلی‌متر بر ساعت که نسبت گشتاور پایداری به گشتاور واژگونی برابر خواهد بود با $19/27$ اشاره داشت که از لحاظ پایداری کاملاً پایدار می‌باشد ولی در مدلی که بارش 15

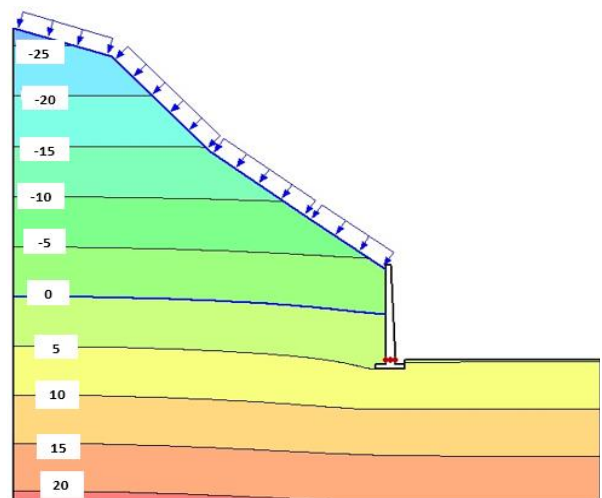
عمده‌ترین عاملی که می‌تواند در افزایش فشار حفره‌ای شیب خاکی پشت دیوار حائل و به گشتاور واژگونی آن که تابعی از فشار حفره‌ای می‌باشد تاثیر گذارد عامل بارش و به خصوص بارش‌های فصلی یا ناگهانی می‌باشد که در این موضوع عملکرد زهکش نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کند. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌هایی از تاثیر شدت بارش‌های متفاوت در فشار حفره‌ای و خطوط هم‌فشار شیب خاکی نشان داده شده‌است.

این دو مدل مربوط به شیب خاکی با جنس رس می‌باشد که فاصله زهکش افقی از کف صفر متر می‌باشد. در مدل اول، شدت بارش برابر با 5 میلی‌متر در ساعت بوده و پس از دو روز بارندگی پیاپی مقدار



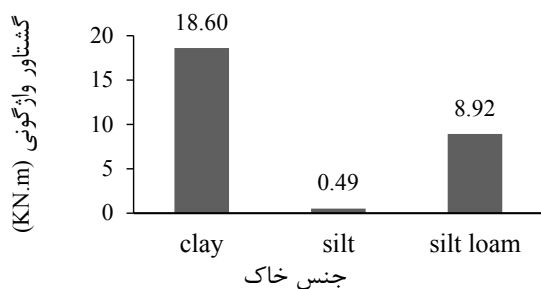
شکل ۸. خطوط هم‌فشار پس از اعمال بارش 15 میلی‌متر در ساعت

Fig. 8. Water pressure head contours after 15 mm/h rainfall intensity



شکل ۷. خطوط هم‌فشار پس از اعمال بارش 5 میلی‌متر در ساعت

Fig. 7. Water pressure head contours after 5 mm/h rainfall intensity

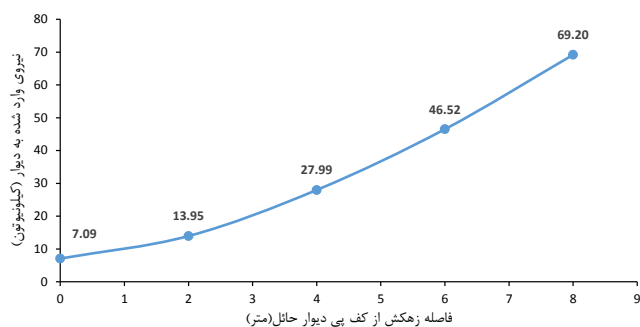


شکل ۹. ب: گشتاور واژگونی برای بارش ۵ میلی‌متر در ساعت و زهکش بدون فاصله در کف

Fig. 9 (b). The overturn torque due to 5 mm/h precipitation intensity for retaining wall with horizontal drain at h=0 m

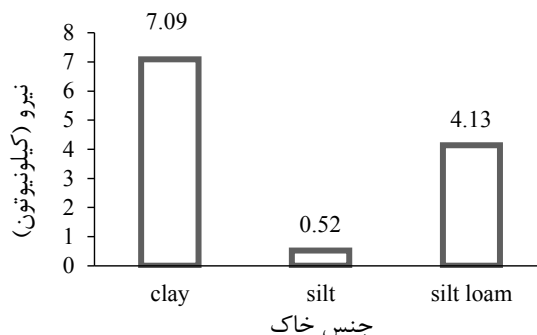
می‌گردد. نکته‌ی قابل توجه این است که در این مدل فقط از یک زهکش استفاده گردیده و لذا در واقعیت می‌توان بیشتر از یک زهکش در دیوار حائل قرار داد و طبیعتاً نتیجه‌ی بهتر از این نتایج که مربوط به یک زهکش هستند را خواهد داشت. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی تغییرات نیروی وارد بر دیوار حائل در موقعیت‌های مختلف زهکش افقی روی دیوار حائل می‌باشد که با اعمال بارش ۵ میلی‌متر در ساعت و جنس خاک رس در شیب خاکی پشت دیوار حائل می‌باشد.

پس می‌توان به این نتیجه رسید که احداث زهکش در موقعیت‌های پایین‌تر عملکردی بهتر از احداث زهکش در موقعیت‌های بالاتر دیوار را دارد که دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که اگر چنانچه زهکش در رقوم بالاتری قرار گیرد، فقط میزان آب جمع شده تا آن رقوم تخلیه می‌گردد. به عبارتی در سطوح پایین‌تر از موقعیت قرارگیری زهکش، آب جمع شده و فشار آب حفره‌ای ناشی از آن می‌تواند پایداری شیب خاکی را به خطر بیندازد. اما نباید فراموش کرد که اگر بررسی با استفاده از چند زهکش در این مدل مدنظر باشد قضیه



شکل ۱۰. تاثیر موقعیت زهکش افقی در نیروی وارد شده به دیوار به ازای بارش ۵ میلی‌متر در ساعت

Fig. 10. The effect of drainage position on the entered force due to 5 mm/h precipitation intensity



شکل ۹. الف: تاثیر نوع مصالح خاکی بر نیروی وارد شده

Fig. 9 (a). The effect of soil materials on the entered force

میلی‌متر در ساعت رخ می‌دهد گشتاور واژگونی بسیار بزرگ ۴۱۴/۷۳ کیلو نیوتن متر اتفاق می‌افتد که نسبت گشتاور پایداری به گشتاور واژگونی برابر خواهد بود با ۰/۸۶ که از نظر پایداری ناپایدار می‌باشد و واژگونی یا لغزش و یا شکستگی دیوار را حتماً در پی خواهد داشت. پس با افزایش میزان بارش، به علت افزایش نیرو و گشتاور وارده، دیوار حائل ناپایدار خواهد شد.

۲-۲- تاثیر جنس خاک شیب خاکی پشت دیوار حائل بر میزان فشار حفره‌ای و گشتاور واژگونی

برای پی بردن به اهمیت و تاثیر جنس خاک بر پایداری شیب‌ها توسط دیوار حائل، از همان مدل قبلی یعنی زهکش در کف دیوار به همراه شدت بارندگی ۵ میلی‌متر در ساعت استفاده شد که نتایج آن به صورت نیرو و گشتاور وارد شده در شکل ۹-الف و ۹-ب نشان داده شده‌است.

از آن جایی که نفوذپذیری و یا هدایت هیدرولیکی خاک سیلت از دو نوع دیگر بیشتر می‌باشد، ظرفیت تخلیه آب مازاد بیشتری را در بازه‌ی زمانی ثابت دارد و در بارش‌های شدیدتر و طولانی‌تر فشار حفره‌ای کمتری نسبت به سایر تیپ‌های خاک دارد و به همین منوال در خاک‌های درشت‌دانه‌تر نیز همین امر به صورت نزولی است و فشار حفره‌ای به مراتب کمتری را به وجود می‌آورد. این مطلب نیز در نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی نیز کاملاً مشهود می‌باشد.

۳-۳- تاثیر موقعیت‌های مختلف زهکش افقی یا لوله‌ای

در این قسمت نمونه‌ای از تاثیر موقعیت زهکش افقی در میزان کاهش فشار حفره‌ای و تاثیر آن روی پایداری دیوار حائل بررسی

شود که معیار خوبی برای سنجش صحت معادلات می‌باشد. خطای جذر میانگین مربعات یا RMSE پارامتری است که تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر تولید شده توسط مدل را مورد آزمون قرار می‌دهد. RMSE ابزار خوبی برای مقایسه‌ی خطاهای مقادیر پیش بینی شده نسبت به مقادیر واقعی در جامعه آماری می‌باشد. میزان کارایی رابطه نیز با معیاری به نام EF مشخص می‌گردد. که هم‌ی این معیارها جوابی متفاوت از ضریب تبیین رگرسیون (R^2) دارند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (10)$$

در روابط بالا O مقادیر مشاهده شده یا نتایج نرم‌افزار و P نتایج به دست آمده توسط مدل عددی یا رگرسیونی می‌باشد. O میانگین مشاهدات واقعی می‌باشد و P نیز میانگین داده‌های خروجی مدل عددی یا رگرسیونی می‌باشد. مقادیر بهینه پارامترهای اشاره شده در روابط بالا به ترتیب ۰، ۱ و ۱ می‌باشد. روابط غیر خطی ارائه شده برای هر سه نوع خاک در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

در این میان با توجه به معادلات رگرسیونی به دست آمده از خاک‌های رس و سیلت لوم نتیجه می‌شود که این دو معادله بسیار شبیه هم بوده و تنها در رقم‌های هزارم ضرایب با هم تفاوت دارند. از

متفاوت خواهد بود و تاثیر فاصله زهکش‌ها از هم نیز وارد موضوع می‌گردد و تداخل عملکرد آنها می‌تواند موضوعی برای بحث باشد.

۳-۴- تاثیر قطر فیلتر زهکش در نوع زهکشی دودکشی روی نیروی وارد شده و گشتاور واژگونی

در تحلیل این نوع از زهکش‌ها به نکته‌ی قابل توجهی می‌توان اشاره کرد، این که در بحرانی‌ترین شرایط ممکن در این مدل‌سازی که در خاک رس و بارش ۱۵ میلی‌متر در ساعت و قطر فیلتر زهکشی ۱۰ سانتی‌متر در پشت دیوار حائل، فشار حفره‌ای منفی به وجود می‌آید. به این منظور که این نوع زهکش‌ها به قدری کارایی دارند که تحت بحرانی‌ترین شرایط ممکن قابلیت تخلیه آب مازاد را دارند و اجازه‌ی وجود فشار حفره‌ای در پشت دیوار را نمی‌دهند. لذا شیب خاکی از نظر پایداری همیشه پایدار باقی می‌ماند.

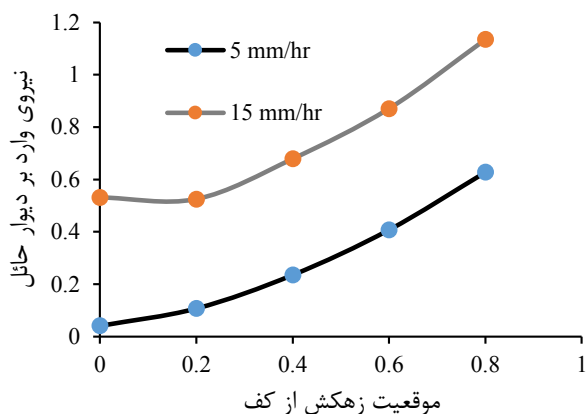
۳-۵- نتایج کلی به دست آمده نیروی وارد بر دیوار حائل و بی‌بعدسازی آنها و مراحل رگرسیون‌گیری

با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها برای پارامترها با مقادیر و موقعیت‌های مختلف و بی‌بعد کردن نتایج، با استفاده از خاصیت رگرسیونی، روابط رگرسیونی بی‌بعدی برای محاسبه نیروی وارد به دیوار حائل ارائه شد. برای این منظور از دو فرم رگرسیون چندگانه خطی و فرم غیرخطی آن استفاده گردیده است. از آنجایی که نتایج بی‌بعدسازی شده‌اند انتظار می‌رود نتایج هر سه تیپ خاک مشابه همدیگر باشند و میزان تشابه این نتایج رگرسیونی نشان از دقت بالای مدل‌سازی و در برگیری جوانب مدل‌سازی با در نظر گرفتن این پارامترها می‌باشد. قبل از توضیح مدل باید معیاری دیگر نیز معرفی

جدول ۳. روابط رگرسیونی غیر خطی برای محاسبه نیروی وارد بر دیوار در هر سه نوع خاک

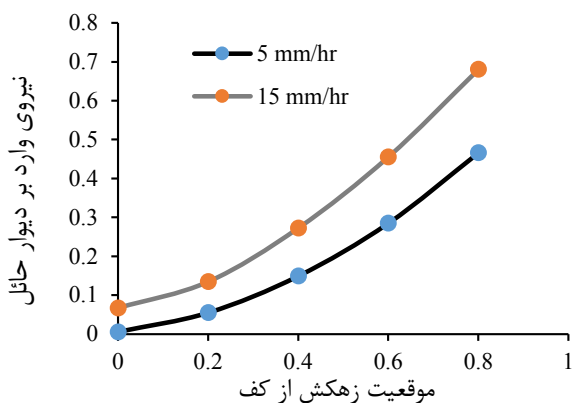
Table 1. Nonlinear regression equations for entered force calculation for studied soils

جنس خاک	رابطه	R^2	R	RMSE	EF
رس	$\frac{F}{M} = -0.273 + 0.756 \frac{h}{H} + 0.37 \frac{P}{K}$	۰/۹۶۶	۰/۹۸	۰/۰۶	۰/۹۶
سیلت	$\frac{F}{M} = -0.143 + 0.675 \frac{h}{H} + 0.236 \frac{P}{K}$	۰/۹۴۴	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۹۴
سیلت لوم	$\frac{F}{M} = -0.251 + 0.756 \frac{h}{H} + 0.352 \frac{P}{K}$	۰/۹۶۷	۰/۹۸	۰/۰۵	۰/۹۶



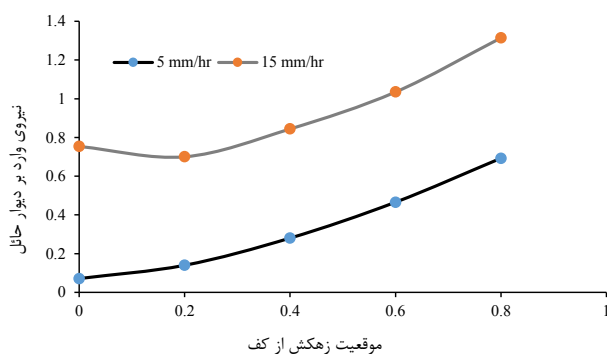
شکل ۱۱. الف: نمودار نیروی وارد بر دیوار حائل با خاک سیلت

Fig. 11 (a). Variation of forces on the retaining wall (silty soil)



شکل ۱۱. ب: نمودار نیروی وارد بر دیوار حائل با خاک سیلت لوم

Fig. 11 (b). Variation of forces on the retaining wall (silty loam soil)



شکل ۱۱. پ: نمودار نیروی وارد بر دیوار حائل با خاک رس

Fig. 11 (c). Variation of forces on the retaining wall (clayey soil)

نظر خطای برآورد معادله‌ای که از مدل‌سازی با خاک سیلت به دست آمده مقداری کمتر از سایر معادلات را داشته اما از نظر کارایی رابطه، معادله سوم که مربوط به خاک سیلت لوم می‌باشد مقداری بیشتر را به دست آورده است. از آنجایی که هدایت هیدرولیکی نیز در این معادلات با بارش بی‌بعد شده است، این معادلات با هم تقریباً برابر بوده و در هر نوع خاک می‌توان از آن استفاده نمود و نتایج قابل قبولی را انتظار داشت.

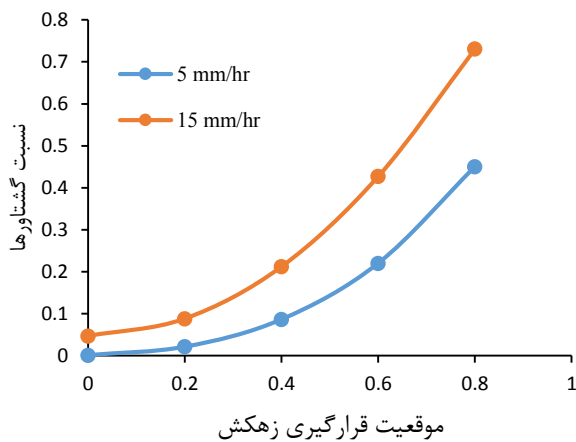
لازم به ذکر است در حصول این روابط ابتدا نتایج به صورت زیر بی‌بعد شدند: پارامتر h/H نسبت ارتفاع موقعیت قرارگیری زهکش افقی نسبت به ارتفاع کل دیوار، P/K نسبت شدت بارش به نسبت هدایت هیدرولیکی و خود نیروها نیز نسبتی هستند از نیروی افقی وارد به دیوار از جهت فشار حفره‌ای و نیروی وزن خود دیوار که بسته به شکل دیوار تقریباً حدود ۱۰۰ کیلو نیوتن (با فرض جرم مخصوص ۲٫۶ تن بر متر مکعب برای بتن مصالح که میانگین ۲/۵ تا ۲/۷ است) می‌باشد. نمودارهای مربوط به نیروی وارد بر دیوار حائل از نقطه نظر بصری می‌تواند درک بهتری از موضوع را بدهد، که به صورت اشکال ۱۱-الف، ۱۱-ب و ۱۱-پ برای هر سه نوع خاک ارائه شده‌اند. در نمونه خاک‌های رس و سیلت لوم نکته قابل توجهی که وجود دارد این است که در بارش‌های ۱۵ میلی‌متر در ساعت موقعیت زهکش در ارتفاع ۲ متری از کف نتیجه‌ی بهتری را در کاهش فشار آب حفره‌ای در منطقه پشت دیوار را دارا بوده ولی در بارش‌های ۵ میلی‌متر در ساعت نتیجه این‌گونه نبوده و بهترین نتیجه را موقعیت زهکش در فاصله صفر متری از کف دارا می‌باشد.

نکته‌ی قابل توجه دیگر که از دقت به نمودارها می‌تواند به آن رسید این است که در خاک سیلت اختلاف فشار حفره‌ای نسبت به بارش‌های متفاوت کمتر از دو نوع دیگر خاک می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های درشت‌دانه‌تر تفاوت نیروی وارد بر دیوار حائل بر اثر باران‌های شدید و باران‌های ملایم‌تر بسیار کم‌تر از خاک‌های ریزدانه‌تر است. البته تصور می‌رود این عمل در بازه زمان هم مورد بحث زیادی باشد چون خاک‌های ریز زمان بیشتری را نیاز دارند تا اشباع شوند و فشار حفره‌ای مثبتی ایجاد نمایند و در عین حال زمان بیشتری هم نیاز دارند تا آب مازاد آن‌ها تخلیه شود.

جدول ۴. روابط رگرسیون خطی بدست آمده از تحلیل نتایج بی بعد نسبت گشتاورها
Table 4. Linear regression equations derived from torques rates analysis

جنس خاک	رابطه	R ²	R	RMSE	EF
رس	$\frac{M}{\dot{M}} = -0.419 + 0.696 \frac{h}{H} + 0.556 \frac{P}{K}$	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۱۱	۰/۹۵
سیلت	$\frac{M}{\dot{M}} = -0.197 + 0.701 \frac{h}{H} + 0.264 \frac{P}{K}$	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۸۷
سیلت لوم	$\frac{M}{\dot{M}} = -0.381 + 0.746 \frac{h}{H} + 0.513 \frac{P}{K}$	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۰۸	۰/۹۵

با توجه به نتایج بررسی نمودارها این نکته نیز در مورد نسبت گشتاورهای واژگونی به مقاوم نیز مورد بحث است که در بارش‌های ۱۵ میلی‌متر در ساعت در جنس خاک‌های رس و سیلت موقعیت ۲ متر از کف برای زهکش افقی نتیجه‌ی بهتری را نسبت به موقعیت صفر متر از کف را دارد. این مورد نیز قابل ذکر است که اختلاف نسبت گشتاورها در خاک‌های درشت‌دانه‌تر کم‌تر از خاک‌های ریزدانه‌تر می‌باشد. لذا اجرای دیوار حائل در موقعیت‌هایی که خاک پشت آن درشت دانه می‌باشد هم از لحاظ ظرفیت تخلیه آب مازاد در زمان معین و هم از لحاظ فشار حفره‌ای کم‌ترین مقدار را دارد و کار نسبتاً آسانی می‌باشد. البته با در نظر گرفتن زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۱۲، الف: نمودار نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور مقاوم در دیوار حائل با خاک سیلتی

Fig. 12 (a). Variation of the ratio of overturn torque over resistance torque for the retaining wall with silty soil

۳-۶- نتایج کلی به دست آمده نسبت گشتاور وارد بر دیوار حائل و بی‌بعدسازی آنها و مراحل رگرسیون‌گیری

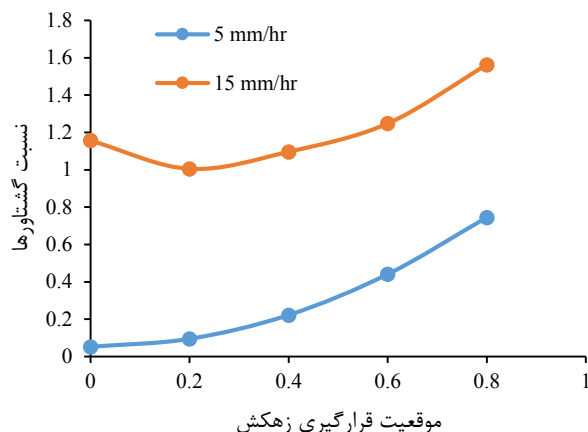
مراحل طی شده در رابطه با مدل‌سازی نیروی وارد شده بر دیوار حائل در مورد نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور موافق نیز در این قسمت طی خواهد شد. لذا قبل از همه، داده‌های مربوط به نتایج بی‌بعد شدند و سپس تلاش شد معادلات خطی و غیر خطی ایجاد شده و با هم مقایسه شوند که معادلات بهتر و دقیق‌تر که در این موضوع، معادلات خطی هستند در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

در جدول ۴ نیز روابط بسیار مشابه هم‌دیگر می‌باشند و انتظار نتایج مشابهی نیز می‌توان از آن‌ها داشت. این معادلات از نظر مقادیر ضرایب به معادلات رگرسیون خطی نیروی وارد بر دیوار حائل نیز شباهت بسیاری دارند که در عمل گشتاور ارتباطی مستقیم با نیرو دارد و پارامترهای موثر در گشتاور، نیروی وارد بر دیوار و نیروی وزن خود دیوار بوده که در فاصله‌ی آن‌ها از محور گردش گشتاور برابر با گشتاور محاسبه شده می‌باشد. از نظر دقت روابط همان طور که قابل مشاهده است رابطه‌ی رگرسیونی که خاک سیلت لوم ارائه می‌دهد از لحاظ ضریب تبیین و کارایی رابطه، مقداری بالاتر از سایر معادلات دارد و RMSE نسبتاً پایین‌تری دارد که نشان از دقت بیشتر معادله در تولید مقادیر پیش‌بینی شده را دارد. در این مورد نیز نمودارهای بی بعد تولید شد که شکل ۱۲ نمودارهای مربوط به گشتاور وارد بر دیوار حائل را نشان می‌دهد.

به حداقل فشار ممکن خواهد رسید. اما اجرای این نوع زهکش پرهزینه و کاری دشوار است. در زهکشی دیوار حائل با استفاده از زهکش‌های افقی یا لوله‌ای نیز خاک‌های درشت دانه نیروی وارد بر دیوار کمتری نسبت به خاک‌های ریزدانه‌تر را دارند که از لحاظ پایداری، پایداری بیشتری دارند و گشتاور مخرب نسبت به گشتاور پایداری آن، میزان کمتری را دارا می‌باشد. روابط خطی رگرسیونی ارائه شده نیز از لحاظ دقت کارایی بالایی در برآورد نیروی وارد بر دیوار و گشتاور واژگونی آن را دارا می‌باشند و خصوصیت‌های خوب این معادلات این می‌باشد که وابسته به زمان نیست، هر نوع خاکی می‌تواند در این روابط صدق کند و نتایج قابل قبولی را ارائه نماید. استفاده از روابط کاری آسان می‌باشد و می‌توان با صرف هزینه‌ی کمتر و سرعت بالاتری به طراحی دیوار حائل پرداخت. در رابطه با دیوارهای حائلی که در حالت غیر اشباع قرار دارند حتی در صورت عدم وجود زهکش نیز از لحاظ پایداری بنا به نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم افزار SLOPE/W پایدار می‌باشند. ولی در صورت اشباع شدن محیط متخلخل پشت دیوار حائل شرایط عوض می‌شود و نیاز به عمل زهکشی مبرم می‌شود و پایداری دیوار حائل بستگی به زهکشی کارآمد دیوار خواهد داشت. توصیه‌ی مهم دیگر اینکه برای اجرای دیوار حائل و زهکشی آن حتماً بیش از یک زهکش در طول واحد به کار برده شود، چون در خاک‌های ریزدانه و در بارش‌های شدیدتر پایداری دیواره همواره با مخاطره همراه است، و امکان شکستن و یا لغزش در پی‌های ضعیف‌تر وجود خواهد داشت.

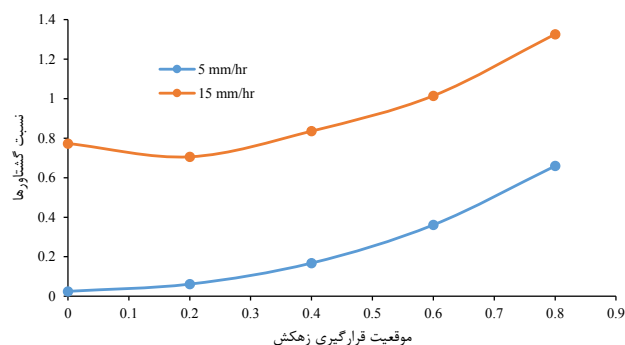
مراجع

- [1] A. Sadrnejad, Foundation Engineering, second edition, Shahid Rajayi press, (2008) (in Persian).
- [2] S.P.Y. Cheung, M. C. Wong, L. H. Y. Yeung, Application of Rainstorm Nowcast to Real-time Warning of Landslide Hazards in Hong Kong, Local report, (2010) 1-21.
- [3] TE. Stanton, California experience in stabilizing earth slopes through the installation of horizontal drains by the Hydrauger method, Proceedings, 2nd International conference on soil mechanics and foundation engineering, Rotterdam, the Netherlands, (3) (1948) 256-260.
- [4] Tw. Smith, G. Stafford, 1957, Horizontal drain on California Highways, J Soil Mech and Found Div, 83(3)



شکل ۱۲ب: نمودار نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور مقاوم در دیوار حائل با خاک رسی

Fig. 12 (b). Variation of the ratio of overturn torque over resistance torque for the retaining wall with clayey soil



شکل ۱۲ج: نمودار نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور مقاوم در دیوار حائل با خاک سیلت لومی

Fig. 12 (c). Variation of the ratio of overturn torque over resistance torque for the retaining wall with silty loam soil

خاک که در خاک‌های درشت‌دانه نسبت به خاک‌های ریزدانه بیشتر می‌باشد این امر بدیهی می‌باشد که این خاک‌ها از نظر پایداری بهتر از خاک‌های ریز دانه می‌باشند و فشاری مضاعف را وارد بر دیوار حائل نمی‌سازند.

این نکته شایان ذکر است که برای هر دو موضوع، نیروی وارده و گشتاورها هم روابط خطی و هم غیر خطی استخراج شد که هر کدام دارای جواب دقیق و بهتری بر اساس شاخص‌های ذکر شده بود در متن تحقیق ارائه شد.

۴- نتیجه گیری

استفاده از زهکشی دودکشی با وجود فیلتر با مصالح مناسب، بهترین عملکرد را در دیوار حائل خواهد داشت و عملاً فشار حفره‌ای

- and GH. Moharrami, Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions, *Arab J Geosci*, 7(2) (2013) 1957–1964.
- [16] H. Rahardjo, K.J. Hritzuk, E. Leong and R. Rezaur, Effectiveness of horizontal drains for slope stability, *Engineering Geology*, 69 (2) (2002) 295-308.
- [17] M. Pathmanathan, Numerical Simulation of Horizontal Drains for subsurface slope stabilization, A thesis of Master of Science engineering, Washington State University, (2009).
- [18] S. Shivakumar, C. Solankia and G. Dodagoudarb, Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method, *Elsiver*, 4 (2015) 876 – 883.
- [19] B. V. S. Viswanadham, H. R. Razeghi, J. Mamaghani, C. H. S. G. Manikumar, Centrifuge model study on geogrid reinforced soil walls with marginal backfills with and without chimney sand drain, *Geotextiles and Geomembranes* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.06.005>.
- [20] A. Boeckmann, J. E. Loher, Design maintainable drains for earth retaining structures, Final Report and Design Guide, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia, 2017.
- [21] Geo-Slope International Ltd, Calgary, (2007).
- [22] H. Ghasemzadeh, Seepage in saturated and unsaturated soils, Nasireddin Toosi University press, (2010) (in Persian).
- [23] H. Khalili Shayan, E. Amiri Tokaldany, 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) (2015) 25-37.
- [24] USBR. Embankment dams, 2014. Chapter 8, seepage, phase 4. U. S. Department of interior bureau of reclamation.
- [25] A. Javaheri, Static and Dynamic Analysis of embankment Dams Using GEOSTUDIO, Second Edition, Elme Omran Press, (2009) (in Persian).
- (1957) 1-26.
- [5] PY. Tong, R. Maher, Horizontal drain as a slope stabilization measure, *J. Engrg Soc. of Hong Kong*, (5) (1975) 15-27.
- [6] J. Hutchinson, Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement. Theme 3, General Report. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16 (1977) 131-155.
- [7] S. Lamb, 1980. Embankment stabilization by use of horizontal drains. *Transp. Res. Record, Transportation Research Board*, (749) (1980) 6-10.
- [8] D. Mallawaratchie, M. Thuraiamy, J. Jayamanne, A. Attanayake, Stage-I remedial measures for stabilizing landslide at Beragala Haliela Road, Senneset K (ed.), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Norway, Trondheim* (3) (1996).
- [9] P. Santi, C. Elifritis, J. Liljegren, Design and installation of horizontal wick drains for landslide stabilization, *Transportation research board record*, (2001) 58-66.
- [10] TM. Tsao, M. Wang, M. Chen, Y. Takeuchi, S. Matsuura, H. Ochiai, A case study of the pore water pressure fluctuation on the slip surface using horizontal borehole works on drainage well, *Engineering Geology*, (78) (2005) 105-118.
- [11] S. W-C, K. pang, A note on seepage from retaining wall weep holes, *J Engineering geology*, (26) (1993) 19-24.
- [12] Yu. Fishman, 2009. Stability of concrete retaining structures and their interface with rock foundations. *J Rock Mechanics & mining sciences*. 46 (2009) 957-966.
- [13] P. Kloukinas, Investigation of seismic response of cantilever retaining walls, Limit analysis vs shaking Table. test, *J Soil dynamics and Earthquake Engineering*, (77) (2015) 432-445.
- [14] J. Blake, J. Renaud, M. Anderson, S. Hencher, Prediction of rainfall-induced transient water pressure head behind a retaining wall using a high-resolution finite element model, *Computers and Geotechnics*, (2003) 431- 442.
- [15] A. Moharrami, Y. Hassanzadeh, F. Salmasi, GH. Moradi

- Penetech Press Publishers, London, (1991).
- [31] G. Meyerhof Penetration tests and bearing capacity of cohesion less soils. J Soils Mechanics and Foundation Division ASCE, 82(SM1) (1956).
- [32] R. Peck, W. Hanson, T. Thornburn, Foundation Engineering Handbook. Wiley, London, (1974).
- [33] R. Obrzud, A. Truty, The hardening soil model, a practical guidebook Z soil. PC 100701 report, revised 31.01, (2012).
- [34] H. Hasani, J. Mamizadeh, H. Karimi, Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam DAM-Iran), World Applied Sciences Journal 21 (9) (2013) 1398-1402.
- [26] Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, (2007).
- [27] NAVFAC Design Manual 7.2, Foundations and Earth Structures, SN 0525-LP-300-7071, Revalidated by change, September, (1986).
- [28] Geotechdata. Info, Soil void ratio, <http://geotechdata.info/parameter/permeability.html>, (2013).
- [29] W. Koloski, D. Schwarz and W. Tubbs, Geotechnical Properties of Geologic Materials, Engineering Geology in Washington, Volume 1, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78, (1989).
- [30] M. Carter, S. Bentley, Correlations of soil properties.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Nouri, F. Salmasi, Performance of Horizontal and Chimney Drainage in Stability of Retaining Wall of Earthen Slopes, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4)(2021): 1307-1322.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16868.6379](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16868.6379)



