

Numerical simulation of landslides caused by rainfall of different intensities

Farzin Salmasi^{1*} 

1. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Foothills, plains, alluvial areas, and sloping areas whose soil is geologically susceptible to landslides, can become unstable and dangerous. In Iran, because of their soil type, Mazandaran, Gilan, Lorestan, Golestan and Khuzestan provinces are more vulnerable to landslides than other provinces. But taking into account factors such as earthquakes, extreme weather, and human interference, other parts of the country can also be prone to landslides. In case of rainfall and absorption of water by clay layers, the possibility of landslides increases. If the slope of the land is suitable, the slope will move on the clay layer and the thrust will occur downwards. In many mountains and steep areas, the conditions for slope failure may be available in terms of the slope angle, the type of soil and the presence of clay layers. But in the absence of sufficient soil moisture, this phenomenon is not observed. Landslides occur whenever rainfall happens and water penetrates the clay layer. Cutting down forest trees, destroying vegetation and pastures, along with possible rainfall and soil moisture, can cause landslides on steep slopes. In fact, land use changes contribute to landslides. By examining the statistics over the last three decades in the northern provinces of Iran, it can be seen that landslides were far less likely when there was proper vegetation. The occurrence of heavy rains can cause failure in a large number of soil slopes. During these heavy rainfalls, the underground water level rises and increases the pore water pressure and reduces the stability of the soil. The purpose of this study is to investigate changes in pore water pressure and the factor of safety for slope stability. The flow of water inside the soil is numerically modeled as a two-dimensional, saturated-unsaturated, unsteady flow. The finite element method (FEM) is used to calculate the pore water pressure and the limit equilibrium method is used to determine the factor of safety for slope stability. To simulate the unsteady flow, time duration of 4 days is used with a time step of 0.1 days. The rainfall duration was assumed to be 24 hours. The intensities of different rainfalls are used as the input flux on the soil surface. The soil moisture curve, which shows the relationship between suction-moisture content and suction-hydraulic conductivity, is used. The results show that different rainfall intensities have different effects on soil moisture profile. As the intensity of precipitation increase, the factor of safety of slope stability decreases. This decrease is steeper for the first 24 hours of rainfall and over the three days after the rain stopped, its slope decreased. For example, for a rainfall intensity of 2.04 mm/hour and the duration of one day, resulted in a factor of safety of slope stability equal to 1.853, and at the end of the fourth day, it was 1.743. In other words, the factor of safety decreased by 5.9%.

Review History

Received: Aug 11, 2024

Revised: Nov 30, 2024

Accepted Mar 11, 2025

Keywords

Pore water pressure
soil slope stability
factor of safety
rainfall intensity
unsteady flow
unsaturated flow

* Corresponding Author Email: salmasi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-1627-8598

شبیه‌سازی عددی زمین لغزش در اثر بارش‌های با شدت‌های متفاوت

فرزین سلماسی^{*۱}

۱. دکتری تخصصی گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

هر ساله وقوع باران‌های شدید باعث ایجاد شکست در تعداد زیادی از شیب‌های خاکی می‌شود. در طول این باران‌ها، سطح آب زیرزمینی بالا آمده و باعث افزایش فشار آب منفذی و کاهش پایداری شیب می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی تغییرات فشار آب منفذی و ضریب اطمینان پایداری شیب است. جریان آب درون خاک، به صورت دو بعدی، اشباع-غیراشباع و غیردائمی مدلسازی عددی می‌شود. از روش اجزای محدود برای محاسبه فشار آب منفذی و از روش تعادل حدی برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان غیردائمی، زمان برابر ۴ روز، با گام ۰/۱ روز استفاده می‌شود. مدت بارش ۲۴ ساعت فرض شد. شدت بارش‌های مختلف به صورت شار ورودی روی سطح خاک، معرف یکی از شرایط مرزی استفاده شد. منحنی رطوبتی خاک که نشان دهنده رابطه مکش-محتوی رطوبتی و مکش-هدایت هیدرولیکی است، استفاده شد. نتایج نشان داد که شدت بارش‌های مختلف، آثار متفاوتی روی پروفیل رطوبتی خاک دارند. با افزایش شدت بارش، ضریب اطمینان پایداری شیب کاهش یافت. این کاهش برای ۲۴ ساعت اول بارندگی شیب بیشتری داشت و در سه روز بعدی بعد از قطع بارش، شیب آن کمتر شد. به عنوان نمونه، برای شدت بارش ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز، نتایج نشان داد که در شروع بارش روی سطح خاک، ضریب اطمینان پایداری شیب برابر ۱/۸۵۳ بود که در پایان روز چهارم، به مقدار ۱/۷۴۳ کاهش یافت. به بیان دیگر، ضریب اطمینان پایداری شیب حدود ۵/۹ درصد کاهش یافت.

کلمات کلیدی

فشار آب منفذی

پایداری شیب

ضریب اطمینان

شدت بارش

جریان غیردائمی

جریان غیراشباع

۱- مقدمه

در صورت بروز بارندگی یا جذب رطوبت توسط لایه‌های

رسی، احتمال رخداد رانش زمین بیشتر می‌شود. اگر شیب زمین مناسب باشد، دامنه روی لایه خاک رس حرکت می‌کند و رانش به سمت پایین اتفاق می‌افتد. در بسیاری از کوهستان‌ها و مناطق پرشیب، ممکن است شرایط برای رانش از نظر شیب دامنه، جنس خاک و وجود لایه‌های رسی فراهم باشد. اما در صورت نبود رطوبت کافی، این پدیده مشاهده نمی‌شود. هر زمان که بارندگی اتفاق بیفتد و آب به لایه رسی نفوذ و آن را لغزنده کند، رانش رخ می‌دهد. قطع درختان جنگلی، از بین بردن پوشش گیاهی و مراتع،

مناطق کوهپایه‌ای، جلگه‌ای، آبرفتی و هر منطقه شیب‌داری که جنس خاک آن از نظر زمین‌شناسی، مستعد لغزش زمین باشد، بیشتر در معرض رانش زمین قرار دارند. در ایران از نظر جنس خاک، استان‌های مازندران، گیلان، لرستان، گلستان و خوزستان بیشتر از سایر استان‌ها در معرض رانش زمین هستند. اما با در نظر گرفتن عواملی همچون زلزله و دخالت‌های نادرست انسان در طبیعت، سایر بخش‌های کشور نیز می‌تواند، مستعد زمین‌لغزش باشد.

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - salmasi@tabrizu.ac.ir 0000-0002-1627-8598

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.





شکل ۲. زمین لغزش در استان مازندران ایران

Fig. 2. Photograph of a landslide near a home in Mazandaran province (Iran)

در تحقیق سلماسی و همکاران [3]، ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست یک سد خاکی با روش تعادل حدی بررسی شد. مقایسه عملکرد هسته مایل و قائم در سد خاکی با شرایط حجم برابر هسته رسی انجام شد. نتایج آن مطالعه نشان داد که دبی نشت در حالت هسته قائم کمتر از حالت هسته مایل می‌باشد، ولی پایداری شیب بالادست در حالت هسته مایل بیشتر از حالت هسته قائم است. در مقایسه روش‌های مختلف برای محاسبه پایداری شیب، روش بیشاپ بیشترین پایداری و روش مقدماتی (یا روش فلینوس) کمترین پایداری را نسبت به روش‌های دیگر نشان داد. این موضوع نشان می‌دهد که روش مقدماتی (یا روش فلینوس) روش محافظه کارانه‌ای است.

سلماسی و همکاران [4]، نوع دایره لغزش و ضریب اطمینان پایداری در شیب‌های محدود به روش تعادل حدی را به روش عددی بررسی کردند. دایره لغزش می‌تواند از پنجه شیب، بالادست و یا پایین دست آن عبور کند. همچنین لغزش می‌تواند به صورت عمیق یا کم عمق اتفاق افتد. آنها برای تعیین نوع دایره لغزش و ضریب اطمینان پایداری، نمودارها و روابط رگرسیونی ارائه دادند. محرمی و همکاران [5] به بررسی عملکرد زهکش‌های افقی در پایداری شیب پوسته بالادست سد خاکی در زمان تخلیه سریع آب مخزن سد پرداختند. نتایج نشان داد که پایداری شیب بالادست در شرایط تخلیه سریع با افزایش تعداد زهکش‌ها افزایش می‌یابد. لاو وکنی [6] کاربرد زهکش‌های افقی در حفظ پایداری شیب‌های رسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش پایداری شیب، به ضریب تحکیم خاک، قطر زهکش‌ها، فاصله بین زهکش‌ها، زاویه و طول زهکش‌ها وابسته است. پایداری شیب

به همراه باران و رطوبت احتمالی، در دامنه‌های شیب‌دار سبب وقوع رانش زمین می‌شود. در واقع تغییر کاربری اراضی به پدیده رانش زمین کمک می‌کند. با بررسی آمار طی سه دهه اخیر در استان‌های شمالی ایران می‌توان متوجه این نکته شد که رانش زمین به مراتب بیشتر از زمانی بوده که پوشش گیاهی مناسب وجود داشته است.

ایران به خاطر وقوع حوادث طبیعی، غیرطبیعی و انسان ساخت، در زمره ۱۰ کشور نخست بلاخیز دنیا قرار دارد. به طوری که از مجموع ۴۰ بلای طبیعی شناخته شده در جهان امکان وقوع ۳۱ نوع آن در ایران وجود دارد. مطالعات قبلی نشان داده که شدت بارش و جنس خاک جزو عوامل اصلی در پایداری خاک هستند. در حالی که شیب خاک و سطح آب زیرزمینی جزو عوامل فرعی محسوب می‌شوند [1]. تغییر اقلیم جهانی نیز باعث شده تا بارش نسبت به گذشته، شدت بیشتری داشته و مدت آن افزایش یابد که این موضوع روی پایداری خاک تاثیرگذار است [2].

در شکل‌های (۱ و ۲)، دو عکس از زمین لغزش در استان مازندران ایران مربوط به خرداد ۱۴۰۳ ارائه شده است. در آن تاریخ، یک بارندگی به مدت ۲۴ ساعت و میانگین ۴۸ میلی‌متر اتفاق افتاد و موجب خسارت‌هایی به اماکن مسکونی و جاده‌ها شد. البته همه ساله، شاهد رانش زمین بر اثر بارندگی شدید و اشباع شدن خاک در سایر نقاط دنیا بوده‌ایم که با مطالعه علمی آن، می‌توان تا حدود زیادی جلوی خسارت‌های احتمالی آن را گرفت. برحسب ارتفاع بارندگی در هنگام وقوع بارندگی‌های شدید، نیروی مکش خاک و به دنبال آن نیروی مقاومت برشی کاهش می‌یابد و همچنین وزن آب باران بر محیط خاک اعمال می‌شود. این عوامل موجب کاهش ضریب اطمینان پایداری و افزایش احتمال شکست شیب می‌شود که می‌تواند خسارت مالی و جانی بسیاری را باعث شود.



شکل ۱. زمین لغزش در استان مازندران ایران

Fig. 1. Photograph of a landslide in Mazandaran province of Iran

زمان) و نیز خاک به صورت اشباع فرض شده است. گرچه این فرضیات، مدل‌سازی محیط متخلخل را ساده‌تر می‌کند، ولی تغییرات زمان در نشت آب و مکش ماتریک خاک را در پایداری خاک در نظر نمی‌گیرد. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی موضوعات زیر است:

- نشت آب در حالت جریان غیرماندگار درون خاک غیر اشباع
- محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیب
- دیاگرام توزیع فشار آب منفذی درون خاک

در این پژوهش، مدل‌سازی عددی با روش اجزای محدود و به صورت دو بعدی انجام می‌گیرد. خاک همگن و همروند (ایزوتروپ) فرض می‌شود. در ابتدای بارندگی، نفوذ آب به داخل خاک خشک اتفاق می‌افتد و به تدریج با گذشت زمان، جبهه رطوبتی خاک به اعماق خاک حرکت می‌کند. بنابراین در حقیقت، جریان به صورت غیراشباع صورت می‌گیرد که در این پژوهش این مسئله مورد توجه است. تغییرات رطوبت خاک با زمان باعث می‌شود که شکل معادلات حاکم بر نفوذ و نشت پیچیده‌تر شود. در این مطالعه، نشت آب به صورت جریان غیرماندگار بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

حرکت دو بعدی آب در خاک بر اساس قانون داریسی بیان می‌شود (معادله ۱).

$$V_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, V_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1)$$

در رابطه (۱) V_x و V_y به ترتیب مؤلفه‌های سرعت آب در جهات x و y هستند. همچنین، k_x و k_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل (خاک) در جهات x و y هستند. در معادله (۱)، فشار آب منفذی با h نشان داده شده است که برای نقاط زیر خط فریاتیکی، با علامت مثبت (بزرگتر از صفر)، برای نقاط بالای سطح فریاتیکی، با علامت منفی (مکش ماتریک خاک) و برای نقاط روی خط فریاتیکی با عدد صفر (فشار استاندارد اتمسفر) مشخص می‌شود.

قانون داریسی برای جریان آب در خاک غیراشباع نیز صادق است و تنها تفاوت آن با جریان اشباع این است که هدایت هیدرولیکی در خاک غیراشباع، عدد ثابتی نیست و بستگی به مقدار

خاکی با افزایش قطر زهکش‌ها و کم کردن فاصله بین زهکش‌ها، افزایش می‌یابد. آنها پیشنهاد کردند که طول زهکش‌ها تا سطح لغزش بحرانی ادامه یابد.

احمدی و همکاران [7]، پایداری شیب جانبی کانال‌های آبیاری را مطالعه کردند. سه حالت کانال پر، کانال خالی (انتهای مرحله ساخت) و بلافاصله پس از قطع آب در تحلیل‌ها استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که لغزش‌های احتمالی از نوع کم عمق، با سطح لغزش عبوری از پاشنه شیب است و بیشترین تغییر شکل‌ها در بخش‌های پایینی شیب در نزدیکی پنجه اتفاق می‌افتد. مقایسه مقدار ضرایب اطمینان پایداری در تمامی خاک‌ها نشانگر تغییر آن نسبت به تغییر حالت کارکرد کانال است. این تغییرات به دلیل تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک و مقدار فشار منفذی است. با توجه به این موضوع، بیشترین ضریب اطمینان مربوط به حالت انتهایی مرحله ساخت و کمترین آن مربوط به حالت نشت معکوس (بلافاصله پس از قطع آب) است و در حالت کارکرد کانال به صورت پر و با بیشترین ظرفیت طراحی، در شرایطی که نیروی هیدرواستاتیک آب وارد بر دیواره شیب به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر لغزش شیب عمل می‌کند، به سبب افزایش فشار منفذی در بدنه شیب، مقدار ضریب اطمینان در برابر لغزش نسبت به انتهایی مرحله ساخت کمتر است. سوبرامانیا و همکاران [8] آثار شیب را بر میزان نشت آب از بدنه کانال مورد بررسی قرار دادند. در زوایای تندتر شیب جانبی، مقدار نشت کمتر از حالتی است که دیواره‌های جانبی تحت شیب ملایم ساخته می‌شود. در حالت نشت معکوس، با افزایش شیب مقدار نشت به داخل کانال افزایش یافته و ناپایداری دیواره‌های جانبی بیشتر می‌شود. شیب پایدار مناسب نه تنها برای کانال‌های خاکی، بلکه برای کانال‌های با پوشش بتنی هم یک پارامتر مهم است.

تعیین شیب دیواره‌ها یکی از مهمترین پارامترهای طراحی معادن روباز است. چنانچه شیب دیواره‌ها کم در نظر گرفته شود، باطله‌برداری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، انتخاب‌ها دیواره پر شیب، باعث کاهش ایمنی و افزایش احتمال ریزش خواهد شد. بنابراین، انتخاب شیب بهینه برای جلوگیری از اضافه باطله‌برداری و کاهش ریسک ریزش دیواره ضروری است. مطالعات زیادی روی پایداری شیب خاک‌ها انجام شده است. در بیشتر آنها، جریان آب درون خاک به حالت دائمی (مستقل از

از روابط تجربی موجود می‌توان استفاده کرد. در این مطالعه، از روش دوم استفاده می‌شود. البته برای استفاده از روابط تجربی، باید برخی از پارامترهای اختصاصی برای هر بافت خاک را به مدل معرفی کرد. این پارامترها شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، رطوبت حجمی اشباع و رطوبت باقیمانده خاک است. بدیهی است خاک‌های مختلف دارای منحنی‌های رطوبتی متفاوتی بوده و در هر سد خاکی غیرهمگن نیز جنس‌های مختلف خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روابط تجربی پرکاربرد برای بیان رابطه مکش-رطوبت استفاده از معادله ون گنوختن (Van Genuchten) است و در این مطالعه از آن استفاده می‌شود. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود [11].

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha \psi^n]^m} \quad (5)$$

که در آن θ_r محتوای آب باقی‌مانده، θ_s محتوای حجمی آب (رطوبت) در حالت اشباع، θ_w محتوای حجمی آب در مکش دلخواه، a ، n ، m ضرایب ثابت معادله هستند که با توجه به بافت خاک تغییر می‌کنند.

در معادله (۵)، ψ عبارت است از مکش ماتریک خاک که دارای بعد L است و در سیستم متریک از متر استفاده می‌شود. بعد α برابر L^{-1} است و وقتی در مکش ماتریک ضرب می‌شود، کمیتی بی‌بعد ایجاد می‌کند. ضرایب n ، m بی‌بعد هستند. معمولاً مقدار $m=1-1/n$ قرار داده می‌شود. بنابراین معادله (۵) به معادله (۶) تبدیل می‌شود [12].

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha \psi^n]^{1-1/n}} \quad (6)$$

هر دو ضریب n و α تابعی از بافت خاک هستند. در نرم‌افزار SEEP/W، دو رهیافت برای تعیین آنها قابل تصور است. در روش اول، داده‌های آزمایشگاهی از مکش ماتریک خاک و رطوبت متناظر آن در دست است و نرم‌افزار در این حالت، منحنی مناسب داده‌ها را برازش می‌دهد و در معادله ردیچاردز بکار می‌برد. در روش دوم، بافت خاک و پارامترهای θ_s ، θ_r ، در نرم‌افزار وارد می‌شود و نرم‌افزار، ضرایب n و α را تخمین می‌زند و منحنی رطوبتی خاک را رسم می‌کند. در این تحقیق، از روش دوم بهره برده شده است (جدول ۱).

در این پژوهش، هندسه و ابعاد شیب، در شکل (۳) ارائه شده

آب موجود در خلل و فرج خاک، دارد. رابطه بین هدایت هیدرولیکی و مقدار آب موجود در خاک (رطوبت حجمی خاک) به نام منحنی رطوبتی خاک (Soil water characteristic curve, SWCC) نامیده می‌شود. با توجه به قانون پیوستگی، دبی نشت از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

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

در رابطه (۲)، Q دبی نشت برحسب مترمکعب بر ثانیه، k هدایت هیدرولیکی خاک برحسب متر بر ثانیه، A سطح مقطع جریان برحسب مترمربع و $\partial h / \partial l$ گرادیان هیدرولیکی می‌باشند. ضمناً l یک طول مشخصه از جریان است که می‌تواند در راستای x ، y یا هر جهت دیگری باشد [9].

معادله حرکت آب در خاک در حالت دوبعدی و غیردائمی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، t زمان و θ محتوای حجمی آب (رطوبت حجمی) می‌باشند.

ضمناً قابل ذکر است که دیمانسیون جمله اول و دوم در معادله (۳)، T^{-1} است. به دلیل این که در یک معادله، دیمانسیون تمامی جملات باید برابر باشند، پس دیمانسیون Q نیز T^{-1} است که نتیجه می‌شود، Q در این معادله، معرف دبی در واحد حجم خاک می‌باشد. همچنین با توجه به جمله چهارم معادله ($\partial \theta / \partial t$)، از آنجا که دیمانسیون این جمله نیز باید T^{-1} باشد، نتیجه می‌شود که پارامتر θ بی‌بعد است.

در حالت حرکت آب در خاک غیراشباع، هدایت هیدرولیکی عدد ثابتی نیست و تابعی از مکش ماتریک خاک است. در این حالت، معادله بالا به صورت معادله دیفرانسیلی غیرخطی تبدیل می‌شود که حل تحلیلی برای آن وجود ندارد و برای حل آن به همراه شرایط مرزی و اولیه، نیاز به استفاده از روش‌های عددی است. این معادله به نام معادله ریچاردز نیز معروف است که در زیر شکل دو بعدی آن ارائه می‌شود [10].

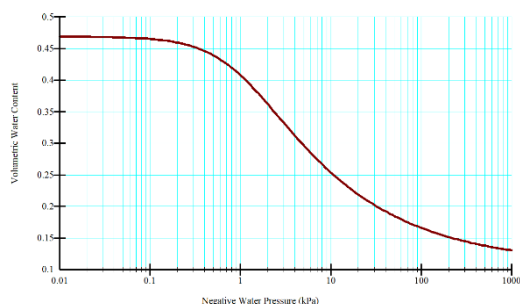
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \left(\frac{\partial h}{\partial y} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

در معادله بالا، عبارت $k(h)$ رابطه مکش- هدایت هیدرولیکی را بیان می‌کند که یا از آزمایش روی نمونه خاک بدست می‌آید و یا

جدول ۱. ضرایب ثابت برای تعریف منحنی رطوبتی خاک اشباع-غیراشباع

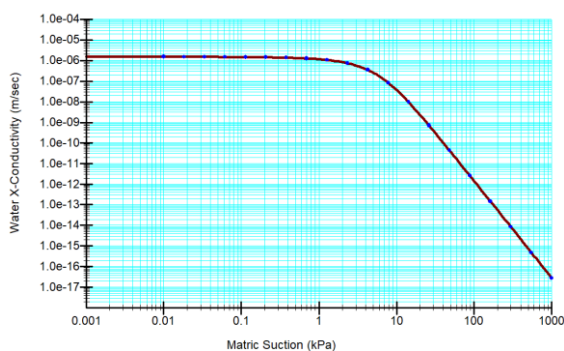
Table 1 Constants for defining the saturated-unsaturated soil moisture curve

α	n	Saturated water content	Residual water content
1.0601	1.3954	0.498	0.106



شکل ۴. تغییرات محتوی رطوبتی در مقابل مکش خاک

Fig. 4. Changes in moisture content versus soil matrix suction



شکل ۵. تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک در مقابل مکش خاک

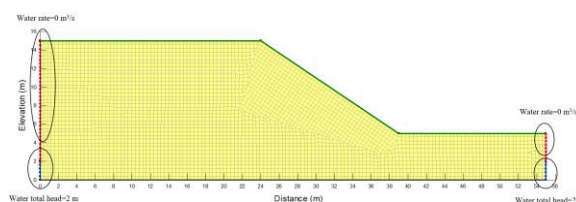
Fig. 5. Variation in soil hydraulic conductivity versus soil suction

بعد از اجرای مدل به صورت جریان ماندگار، فشارهای آب منفذی اولیه در خاک توسط روش اجزای محدود محاسبه می‌شوند و مدل برای اجرای جریان غیرماندگار آماده می‌شود. در حالت جریان غیرماندگار، حالت ماندگار به صورت مدل والدین (Parents) به مدل غیرماندگار معرفی می‌شود. شرایط مرزی قبلی تعریف شده در حالت ماندگار، مانند سطح آب زیرزمینی، حذف و زمان کل شبیه‌سازی ۴ روز با گام زمانی ۰/۱ روز (کلا ۴۰ بازه زمانی) تعریف شد. مدت بارش در تمام شبیه‌سازی‌ها برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و شدت بارش با توجه به دوره بازگشت، مطابق جدول (۲) به مدل اعمال شد. برای تعیین شدت بارش با توجه به دوره بازگشت، از آمار ایستگاه سینوپتیک بابلسر در دوره زمانی ۲۰۱۹-۱۹۹۴ استفاده شد. شدیدترین رگبار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۹۰ دقیقه و ۲، ۴، ۶، ۹، ۱۲، ۱۹ و ۲۴ ساعت هر سال

است. شیب خاکی مفروض، دارای ۱۰ متر ارتفاع و ۵۶ متر طول کل است. خاک به صورت همگن (تک لایه) و همسانگرد فرض شد. برای حل عددی به روش المان‌های محدود، باید محدوده مورد مطالعه شبکه‌بندی شود. شبکه‌بندی محدود خاک در شکل (۳) نشان داده شده است. بررسی شبکه‌بندی مستقل از ابعاد انجام شد و معلوم شد که اندازه شبکه برابر ۰/۲ متر جواب مناسب را می‌دهد. در این حالت، تعداد کل شبکه‌ها برابر ۱۴۸۰۰ و تعداد گره برابر ۱۵۱۰۰ بدست آمد. ابتدا مدل به صورت جریان دائمی حل شد. شرایط مرزی در جریان دائمی به صورت شکل (۱) روی هندسه مدل اعمال شد. برای این که مدل به صورت جریان دائمی حل شود، باید هد آب در منطقه‌ای معلوم، تعیین شود. همان طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، بار آبی کل در مز سمت راست و چپ مدل برابر ۲ متر در نظر گرفته شد که مشخص کننده تراز آب زیرزمینی فرضی در ابتدای شبیه‌سازی است و همان طور که اشاره شد، اگر چنین هد آبی داده نشود، مدل قادر به شروع حل نخواهد بود. همچنین در بالای مرز آب زیرزمینی، شرط مرزی خروج آب صفر به مدل داده شد ($Q=0$). در سایر نقاطی که شرط مرزی تعریف نشده، مدل به طور پیش‌فرض، تبادل آبی صفر را در نظر می‌گیرد ($Q=0$).

حرکت آب در خاک به صورت اشباع-غیراشباع مدل‌سازی می‌شود. برای نیل به این هدف، مشخصات یک نوع خاک با بافت لوم سیلتی به صورت جدول (۱) در نظر گرفته شد. در جدول (۱)، عوامل α و n مانند معادله ۵ تعریف می‌شوند.

رابطه محتوی رطوبتی و مکش خاک با معادله ون گنوختن تقریب زده شد (شکل ۴). همان طور که پیشتر اشاره شد، در خاک غیراشباع، هدایت هیدرولیکی عدد ثابتی نیست و به همین دلیل حل معادلات دیفرانسیلی غیرخطی حاکم بر جریان، به صورت تحلیلی ممکن نیست. در شکل (۵)، تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک در مقابل مکش ماتریک خاک ارائه شده است.



شکل ۳. هندسه مدل، شبکه بندی و شرایط مرزی

Fig. 3. Model geometry, grid and boundary conditions

جدول ۲. شدت و ارتفاع بارش در دوره‌های بازگشت مختلف

Table 2. Intensity and precipitation rates for different return periods

Return period (years)	2	5	10	25	50	100
24 hours rainfall	2.0	2.7	3.3	4.0	4.7	5.33
duration (mm/day)	4	8	3	9		
Rainfall height (mm)	48.	66.	79.	98.	112	127.
	96	72	92	16	.8	92

جدول ۳. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک

Table 3. Geotechnical characteristics of the soil

Return period (years)	γ (kN/m ³)	C (kPa)	Φ (degrees)
24 hours rainfall duration	17.66	7.85	25

نظر گرفته می‌شوند و بر دقت کار می‌افزایند. نرم‌افزار SLOPE/W سطح گسیختگی را به صورت دایره‌ای در نظر می‌گیرد. مطالعاتی که کولمن در سال ۱۸۷۵ انجام داده بود، سطح گسیختگی را به صورت صفحه‌ای تعریف کرد که بیشتر برای شیب‌هایی متشکل از خاک‌های درشت‌دانه (قلوه سنگ و شن) و زاویه شیب نزدیک به عمود صادق است [3]. بعد از کولمن، مطالعات بیشتری در نقاط مختلف دنیا انجام شد و سرانجام کمیته ژئوتکنیک سوئد اعلام کرد که در طبیعت، سطح گسیختگی بیشتر به شکل قطعی از یک دایره اتفاق می‌افتد و از آن پس تاکنون، سطح گسیختگی به صورت دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود و در طرح‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روش تعادل حدی، ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی (F) برابر با نسبت مقاومت برشی خاک به تنش برشی لازم برای قرار دادن شیب در وضعیت تعادل حدی (آستانه لغزش) است و طبق رابطه (۷) نوشته می‌شود.

$$F = \frac{C}{C_m} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_m} = \frac{C + \sigma \times \tan \phi}{C_m + \sigma \times \tan \phi_m} \quad (7)$$

در رابطه (۶)، 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 می‌باشند. همچنین σ بیانگر تنش نرمال روی خاک است. باید دقت کرد که در نرم افزار SLOPE/W در پنجره Materials/Suction & Advanced گزینه Calculate from the material volume water content function را فعال کرد تا پایداری شیب بر اساس منحنی رطوبتی خاک در حالت غیراشباع بررسی شود.

۳- نتایج و بحث

بعد از اجرای مدل در حالت جریان دائمی، تغییرات بار آبی درون خاک به صورت شکل (۶) است. عدد صفر روی کنتورهای شکل (۶)، مربوط به تراز آب زیرزمینی است که برابر ۲ متر در آغاز کار فرض شد. هدف این است که معوم شود بعد از وقوع بارندگی با شدت و مدت مشخص، تغییرات سطح آب زیرزمینی، فشارهای آب منفذی و پایداری شیب چگونه تغییر خواهد کرد. در شکل (۶)، اعداد منفی بیانگر مکش منفی یا ماتریک خاک است و در این حالت هنوز بارش روی سطوح خاک اعمال نشده است.

از روی تمام رگبارهای رخ داده در آن سال استخراج شد. سپس با استفاده از نرم افزار EasyFit و با آزمون نکویی برازش کولموگروف-اسمیرنوف برای هر یک از ۲۶ سری داده‌ها، مقادیر شدت بارندگی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به دست آمد (جدول ۲).

بعد از شبیه‌سازی عددی جریان در حالت غیرماندگار و بدست آمدن فشار آب منفذی در هر نقطه از خاک و در زمان‌های مختلف، اقدام به محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیب شد. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک در جدول (۳) ارائه شده است. ستون‌های ۱ تا ۳، مربوط به وزن مخصوص خاک (γ)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک (Φ) می‌باشد.

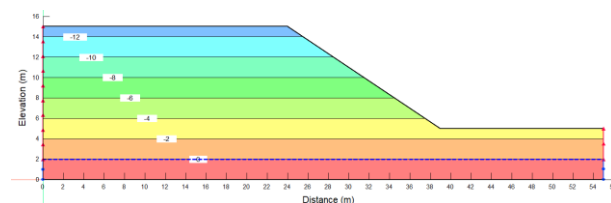
در این مطالعه، برای بررسی پایداری شیب خاکی از روش تعادل حدی (LEM) استفاده شده است. در روش روش تعادل حدی، دایره‌های لغزش مختلفی با شعاع و مرکز مختلف فرض شده، و محدوده لغزش خاک روی این قطاع دایره، به نوارهای عمودی و موازی تقسیم می‌شود. سپس نیروهای وارد بر هر یک از این نوارها جداگانه بررسی می‌شود. در این روش، از پلیگون نیروها و مبانی استاتیک بهره برده می‌شود و از روش اجزای محدود برای به دست آوردن ضریب اطمینان استفاده نمی‌شود. پژوهشگران مختلفی روی روش تعادل حدی مطالعه کرده‌اند و روش‌هایی برای افزایش دقت، پیشنهاد شده است. در این مطالعه، از روش مورگنسترن-پرایس استفاده شد. در این روش، تعادل لنگرها و نیروها به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود که امتیاز این روش محسوب می‌شود. در حالی که در روش جانبو، فقط تعادل نیروها و در روش بیشاب، تعادل لنگرها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در روش مورگنسترن-پرایس تمام نیروهای درگیر در تعادل، به ویژه نیروهای جانبی قطعات مجاور در

شکل (۷) مربوط به شبیه‌سازی عددی برای حالت جریان غیردائمی بعد از گذشت ۱۲ ساعت پس از وقوع بارش با شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت است. تغییراتی در کنتورهای هد آب نسبت به حالت ماندگار ایجاد شده ولی هنوز با توجه به شدت و مدت کم بارش، سطح آب زیرزمینی تغییری نکرده است. به بیان دیگر، هنوز آب نفوذ کرده، به سطح آب زیرزمینی نرسیده است.

شکل (۸) مربوط به شبیه‌سازی عددی برای حالت جریان غیردائمی بعد از گذشت ۴ روز پس از وقوع بارش با شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت و زمان تداوم ۲۴ ساعت (یک روز) است. بردارهای جریان که نشان دهنده نفوذ آب باران به درون خاک هستند، روی شکل آورده شده‌اند. تغییرات بار آبی در خاک نسبت به زمان‌های قبل مشهود است. برای اختصار، از آوردن سایر شکل‌ها در زمان‌های دیگر خودداری می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، کل ۴ روز زمان شبیه‌سازی شده، به ۴۰ دوره زمانی (گام $0/1$ روزه) تقسیم شد.

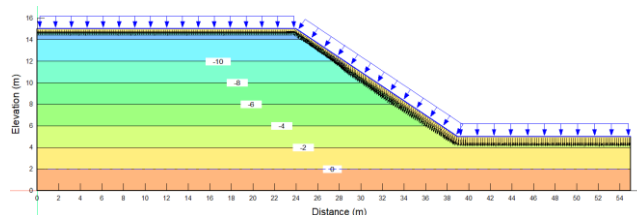
شکل (۹) تغییرات هد فشاری آب منفذی برای نقطه‌ای به مختصات (31, 9) را نشان می‌دهد. این، یک نقطه اختیاری است که تقریباً در وسط شیب خاکریز قرار دارد. بدیهی است که هر نقطه دلخواه دیگری را نیز می‌توان در نظر گرفت. هد فشاری آب از منفی ۷ متر تا نزدیکی صفر (فشار اتمسفری) در طول ۴ روز تغییر کرده است و نشان می‌دهد که با گذشت زمان، به تدریج که آب بارش درون خاک نفوذ می‌کند، هد فشاری به فشار اتمسفری نزدیک می‌شود و خاک از حالت خشک به تقریباً حالت اشباع نزدیک می‌شود. رسم چنین نمودارهایی برای هر نقطه از خاک، تغییرات رطوبت به ازای زمان را نشان می‌دهد که می‌تواند برای کارهای کشاورزی، آبخیزداری و عمرانی کاربرد داشته باشد.

در دو شکل (۱۰ و ۱۱)، گوه لغزش خاک برای بارش با شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز و به ترتیب در زمان ۱۲ ساعت و ۴ روز بعد از مدت شبیه‌سازی ارائه شده است. ضریب اطمینان در برابر لغزش، در زمان ۱۲ ساعت بعد از بارندگی برابر عدد $1/838$ و در زمان ۴ روز بعد از بارندگی برابر عدد $1/743$ محاسبه شده است و مرکز دایره لغزش با دایره قرمز رنگ مشخص است. واضح است که ضریب اطمینان در برابر لغزش باید بیشتر از ۱/۵ یک باشد و در طراحی سدهای خاکی معمولاً باید بیشتر از ۱/۵ باشد.



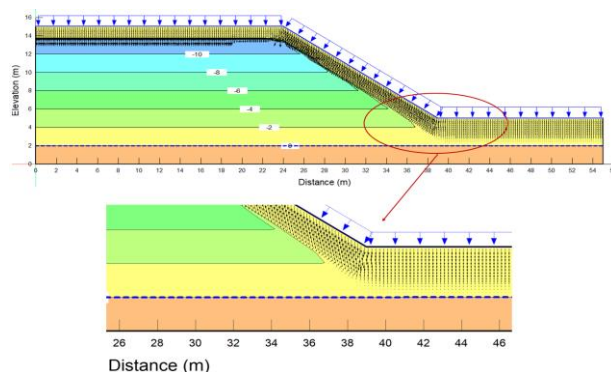
شکل ۶. کنتورهای هد آب درون خاک بعد از اجرای مدل در حالت جریان دائمی و خاک غیراشباع

Fig. 6. Contours of water head inside the soil after running the model in steady state flow and unsaturated soil



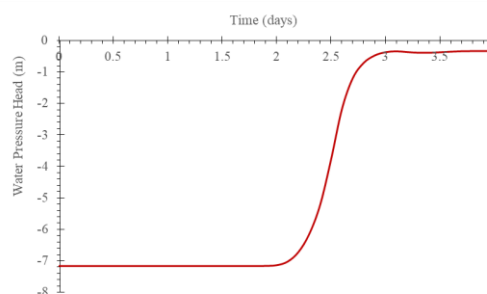
شکل ۷. کنتورهای بار آبی برای حالت جریان غیردائمی بعد از گذشت ۲۴ ساعت پس از وقوع بارش با شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز

Fig. 7. Contours of water head for unsteady flow after 24 hours after the onset of rainfall with an intensity of 2.04 mm/h and duration of one day



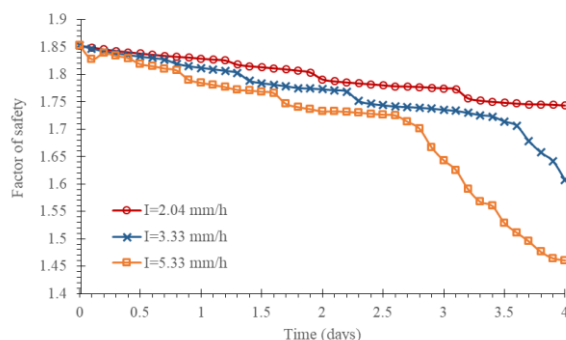
شکل ۸. کنتورهای بار آبی برای حالت جریان غیردائمی بعد از گذشت ۴ روز پس از وقوع بارش با شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز

Fig. 8. Contours of water head for unsteady flow after 4 days after the onset of rainfall with an intensity of 2.04 mm/h and for one day duration



شکل ۹. تغییرات هد فشاری آب منفذی برای نقطه‌ای به مختصات (31, 9) طول ۴ روز بارش (شدت $2/04$ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز)

Fig. 9. Variation in pore-water pressure for a point at the coordinates (31, 9) after 4 days (rainfall intensity of 2.04 mm/hour with a duration of one day)

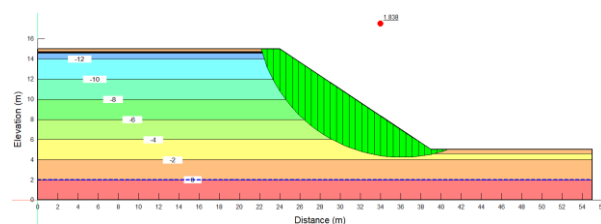


شکل ۱۴. تغییرات ضریب اطمینان لغزش در مقابل زمان، به ازای سه شدت بارش مختلف با تداوم ۲۴ ساعته

Fig. 14. Changes in FOS versus time, for three different rainfall intensities with 24-hour duration

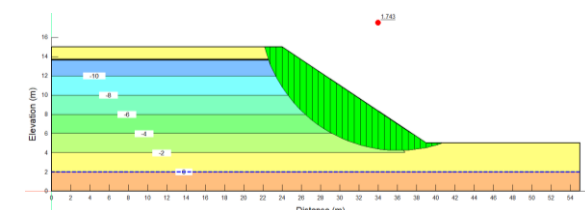
در شکل (۱۲) ضریب اطمینان پایداری شیب در طول ۴ روز با شدت بارش ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز ارائه شده است. در طول ۴ روز، همواره ضریب اطمینان روند کاهشی دارد که نشان می‌دهد با افزایش رطوبت خاک طی ۲۴ ساعت بارندگی، از مقدار پایداری شیب کاسته می‌شود. البته کاهش پایداری خاک، در ۳ روز آخر، کمتر از روز اول است و دلیل آن، قطع شدن بارندگی در سه روز آخر است. در شروع بارش روی سطح خاک، ضریب اطمینان پایداری شیب برابر ۱/۸۵۳ بود که در پایان روز چهارم، به مقدار ۱/۷۴۳ کاهش یافت. به بیان دیگر، ضریب اطمینان پایداری شیب حدود ۵/۹ درصد کاهش یافت. در شکل (۱۳)، نفوذ آب باران درون خاک در روز چهارم (بارش با شدت ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز) و در شکل (۱۴)، تغییرات ضریب اطمینان لغزش در مقابل زمان، به ازای سه شدت بارش مختلف با تداوم ۲۴ ساعته ارائه شده است.

اگر یک مقطع عمودی در $x=12$ m در نظر گرفته شود و هد فشاری آب در خاک در نقاط آن رسم شود، در آن صورت شکل (۱۵) بدست می‌آید. شکل (۱۵) مربوط به بارش با شدت ۵/۳۳ میلی‌متر در ساعت، تداوم ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش) است. سطح خاک در ارتفاع ۱۵ متری از سنگ بستر قرار دارد. مشاهده می‌شود که تا عمق ۲ متری از سطح خاک، فشار آب منفذی صفر است. یعنی تا عمق ۲ متری، خاک به حالت اشباع رسیده است. سپس از عمق ۱۳ تا ۲ متری از سنگ بستر، فشار آب منفذی منفی است که حاکی از غیراشباع بودن این منطقه است. بعد از آن، از عمق ۲ تا صفر متری از سنگ بستر، مجدداً فشار آب منفذی بزرگتر از صفر می‌شود که مربوط به تراز آب زیرزمینی و



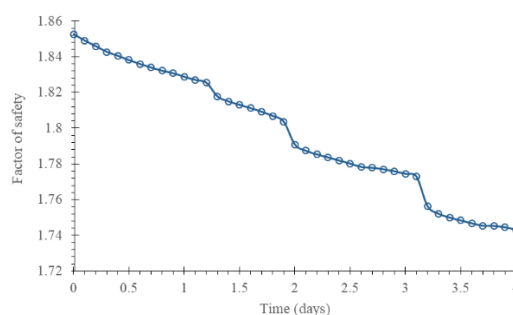
شکل ۱۰. ضریب اطمینان در برابر لغزش برای بارش با شدت ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز و ۱۲ ساعت بعد از شروع بارندگی

Fig. 10. Factor of safety against sliding for rainfall with an intensity of 2.04 mm/hour with a duration of one day, and 12 hours after the start of rainfall



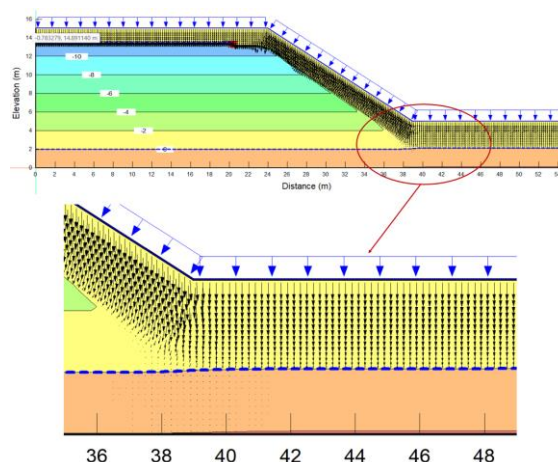
شکل ۱۱. ضریب اطمینان در برابر لغزش برای بارش با شدت ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت با تداوم یک روز و ۴ روز بعد از شروع بارندگی

Fig. 11. Factor of safety against sliding for rainfall with an intensity of 2.04 mm/hour with a duration of one day and 4 days after the start of rainfall



شکل ۱۲. تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیب در طول ۴ روز با شدت بارش ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز

Fig. 12. Changes in minimum FOS during 4 days with rainfall intensity of 2.04 mm/hour and duration of one day



شکل ۱۳. نفوذ آب باران درون خاک در روز چهارم (بارش با شدت ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز)

Fig. 13. Rainfall infiltration into the soil on the fourth day (rainfall with an intensity of 2.04 mm/hour and duration of one day)

شکل (۱۶) کانتورهای فشار آب منفذی درون خاک برای بارش با شدت ۵/۳۳ میلی‌متر در ساعت، تداوم ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش) را نشان می‌دهد. مناطق اشباع و غیراشباع روی شکل مشخص شده‌اند تا وضعیت رطوبتی خاک روشن شود. شکل (۱۷) وضعیت دایره لغزش خاک برای شرایط گفته شده قبلی را نشان می‌دهد.

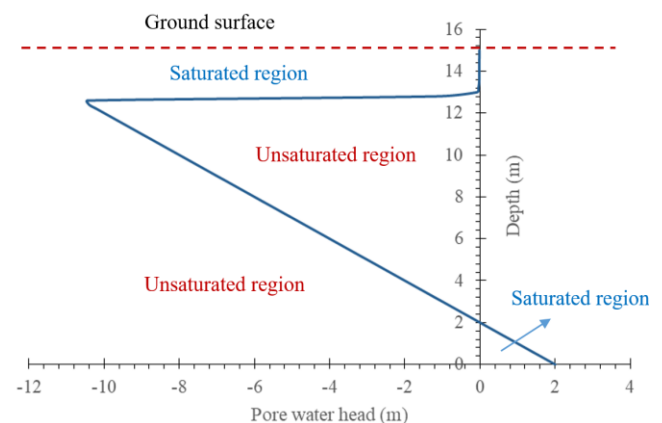
۴- نتیجه‌گیری

وقوع بارش روی خاک‌های شیبدار، ضریب اطمینان پایداری اینگونه شیب‌ها را به خطر می‌اندازد. به ویژه مواقعی که شدت بارش زیاد و مدت آن طولانی باشد. در این تحقیق، از اطلاعات شدت بارش‌های مختلف شهرستان بابلر با تداوم ۲۴ ساعته برای بررسی پایداری شیب‌های خاکی استفاده شد. در زمان‌های ابتدایی بارش، خاک غیراشباع است ولی به تدریج با طولانی‌تر شدن مدت بارش، سطح ایستابی ایجاد می‌شود که حاکی از اشباع شدن عمقی خاک است. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و خاک اشباع-غیراشباع به روش اجزای محدود انجام شد. در این تحقیق، منحنی رطوبتی خاک یعنی رابطه مکش-رطوبت خاک و رابطه مکش-هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان ورودی، به مدل داده شده است. پس از محاسبه فشار آب حفره‌ای داخل خاک به روش اجزای محدود، 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. اثر شدت بارش‌های مختلف، روی فشار آب منفذی و پایداری شیب بررسی شد که می‌تواند در طرح‌های کشاورزی، آبخیزداری، معدن و عمرانی مورد توجه قرار گیرد. طبق نتایج بدست آمده، کاهش ضریب اطمینان پایداری شیب برای ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش) شیب آن بیشتری داشت و در سه روز بعدی بعد از قطع بارش، شیب آن کمتر شد. برای شدت بارش ۲/۰۴ میلی‌متر بر ساعت و تداوم یک روز، ضریب اطمینان پایداری شیب برابر ۱/۸۵۳ بود که در پایان روز چهارم، به مقدار ۱/۷۴۳ کاهش یافت. به بیان دیگر، ضریب اطمینان پایداری شیب حدود ۵/۹ درصد کاهش یافت.

قدردانی نویسندگان

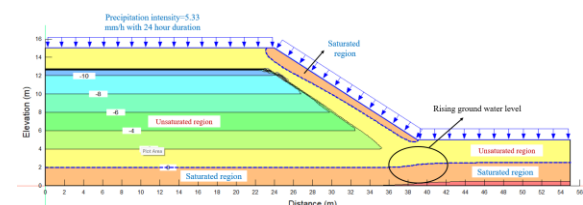
نویسنده از حمایت معنوی دانشگاه تبریز، گروه مهندسی آب،

زیر آن است. شکل (۱۵) نشان می‌دهد که وقوع بارش موجب اشباع شدن قسمتی از عمق خاک می‌شود (فشار آب منفذی برابر صفر)، ولی لایه‌های عمقی خاک، به حالت غیراشباع باقی می‌ماند. در حد فاصل خاک با سطح آب زیرزمینی (تراز آب زیرزمینی)، فشار آب منفذی مجدداً برابر صفر می‌شود و زیر آن، فشار آب منفذی، مثبت است که همان فشار هیدرواستاتیک است.



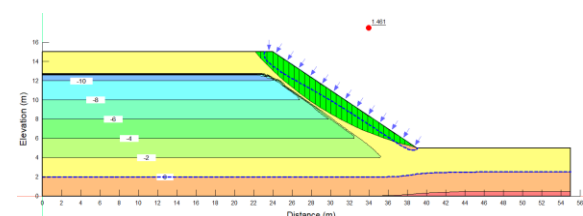
شکل ۱۵. توزیع فشار آب منفذی درون خاک در مقطع عمودی $x=12$ m برای بارش با شدت ۵/۳۳ میلی‌متر در ساعت، تداوم ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش)

Fig. 15. Distribution of pore-water pressure inside the soil in a vertical section at $x=12$ m for rainfall with an intensity of 5.33 mm/hour, duration of 24 hours and for the fourth day (three days after the cessation of rainfall)



شکل ۱۶. کانتورهای فشار آب منفذی درون خاک برای بارش با شدت ۵/۳۳ میلی‌متر در ساعت، تداوم ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش)

Fig. 16. Contours of pore-water pressure in the soil for rainfall with an intensity of 5.33 mm/hour, 24-hour duration and the fourth day (three days after the cessation of rainfall)



شکل ۱۷. موقعیت دایره لغزش خاک برای بارش با شدت ۵/۳۳ میلی‌متر در ساعت، تداوم ۲۴ ساعت و روز چهارم (سه روز بعد از قطع بارش)

Fig. 17. The position of the soil slip circle for rainfall with an intensity of 5.33 mm per hour, duration of 24 hours and for the fourth day (three days after the cessation of rainfall)

دانشکده کشاورزی تشکر می‌کند.

است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع مالی

در این تحقیق، از شبیه‌سازی عددی استفاده شد و لذا از منابع مالی دانشگاه تبریز کمک گرفته نشد.

سهم نویسندگان

چون این مقاله فقط یک نویسنده دارد، لذا سهم او ۱۰۰ درصد

References

1. Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B. & Leong, E.C. 2007. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *J Geotech Geoenviron Eng*, 133, pp. 1532–1543.
2. Dhanai, P., Singh, V.P. & Soni, P. 2022. Rainfall Triggered Slope Instability Analysis with Changing Climate. *Indian Geotech J*, 52(2), pp. 477–492.
3. Salmasi, F., Hosseinzadeh Dalir, A. & Norouzi Sarkarabad, R. 2019. Investigation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rainfall conditions by numerical simulation. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(3), pp. 153- 156. (In Persian with English abstract)
4. Salmasi, F., Pradhan, B. & Nourani, B. 2019. Prediction of the sliding type and critical factor of safety in homogeneous finite slopes. *Applied Water Science*, 9, pp. 1-11.
5. Moharrami, A., Hassanzadeh, Y., Salmasi, F., Moradi, G. & Moharrami, G. 2014. 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), pp. 1957–1964.
6. Lau, K.C. & Kenney, T.C. 1984. Horizontal drains to stabilize clay slopes. *Canadian Geotechnical*, 21(2), pp. 241-249.
7. Ahmadi, H., Verdinejad, V.R. & Hemati, M. 2013. Determination of stable side slopes in irrigation canals. *Journal of Water and Soil*, 27(3), pp. 603-612. (In Persian with English abstract)
8. Subramaniya, K., Madhav, R.M. & Govinda, C.M. 1973. Studies on Seepage from canals with partial lining. *Journal of Hydraulic Division*, 99(12), pp. 2333-2351.
9. Taheri Aghdam, A., Salmasi, F., Abraham, J. & Arvanaghi, H. 2021. Effect of drain pipes on uplift force and exit hydraulic gradient and the design of gravity dams using the finite element method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 5(3), pp. 12-29.
10. Sartipi, N., Salmasi, F., Abraham, J. & Hosseinzadeh Dalir, A. 2021. Investigation of the effect of depth and distance between cutoff walls on uplift force for gravity dams. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, pp. 1361–1378.
11. Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892-898.
12. Nourani, B., Salmasi, F. & Abraham, J. 2025. Investigating Seepage and Stability of Unsaturated Embankment Dams Under Transient Conditions. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12, pp. 17-20.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Salmasi, F., 2025. Numerical simulation of landslides caused by rainfall of different intensities. *Modares Civil Engineering journal*, 25(5), pp.49-59.

DOI: 10.22034/25.5.5

