

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی‌های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت‌های حمل- ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش - تغییر شکل

دانش ستاری*، دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه تبریز

مسعود حاجی‌علیلوی بناب، استاد، مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه تبریز

اکبر جوادی، استاد، مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه اکستر انگلستان

Email: d-sattari@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

چکیده

امروزه، حمل‌ونقل یکی از اجزای مهم اقتصاد ملی محسوب می‌گردد. هر ساله بسیاری از تپه‌های خاکی و دامنه کوه‌ها برای احداث زیرساخت‌های حمل‌ونقل خاک‌برداری می‌شوند. پایداری ترانشه‌های ایجاد شده در اثر خاک‌برداری‌ها، در دوره اجرا و بهره‌برداری پروژه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در طبیعت، این ترانشه‌ها عمدتاً غیراشباع بوده و بایستی با استفاده از تئوری خاک‌های غیراشباع بررسی گردند. یکی از دلایل اصلی ناپایداری ترانشه‌ها، بارش باران و نفوذ آب ناشی از آن می‌باشد. در این تحقیق، با استفاده از تئوری خاک‌های غیراشباع و روش عددی تفاضل محدود، روند نفوذ آب باران و تأثیر آن در تغییرات فشار آب منفذی، درجه اشباع، تغییر شکل‌ها و در نهایت پایداری آن در طول مدت زمان بارش‌ها بررسی گردید. برای این منظور، علاوه بر انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی جهت برآورد پارامترهای ژئومکانیک مصالح، از نرم‌افزار RETC برای به دست آوردن پارامترهای منحنی آب-خاک استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ضریب اطمینان با طولانی‌تر شدن بارش‌های با شدت کم در مدت ۵ ماه از ۱/۲۸۳ به ۱/۲۲۱ کاهش پیدا کرده، ولی نرخ کاهش به حدی نیست که باعث ناپایداری کامل شیروانی گردد. ولی برای بارش کوتاه مدت - شدت زیاد، به دلیل عدم فرصت نفوذ و جریان آب در شیروانی، بیشترین تأثیر در دو متر بالایی شیروانی اتفاق افتاده و در این محدوده علاوه بر افزایش وزن، کاهش مکش و مقاومت برشی خاک غیراشباع اتفاق افتاده است. در نتیجه اثر مضاعف این دو عامل، ضریب اطمینان در طول مدت ۴۸ ساعت به مقدار ۰/۹۸۱ کاهش پیدا کرده و منجر به ناپایداری شیروانی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل، ترانشه خاکی، غیراشباع، تفاضل محدود، نفوذ آب، منحنی مشخصه آب و خاک

خاکی و دامنه کوه‌ها برای احداث جاده‌ها خاک‌برداری

۱. مقدمه

می‌شوند. پایداری ترانشه‌های احداث شده در اثر این

خاک‌برداری‌ها، در دوران اجرا و بهره‌برداری، از اهمیت

در کشور ما، مهم‌ترین بخش از حمل‌ونقل مربوط به

حمل‌ونقل جاده‌ای می‌باشد. هر ساله بسیاری از تپه‌های

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل

شیروانی های تحت اثر بارندگی، درجه اشباع و در نتیجه مکش و مقاومت خاک در نقاط مختلف شیروانی و در زمان های مختلف بارش ثابت فرض می شود. در حالی که در واقعیت، این فرض صحیح نیست. با توجه به پیچیدگی رفتار خاک های غیراشباع از یک طرف و تابع زمان بودن اثر بارش از طرف دیگر، محققین به توسعه روش های عددی روی آوردند. انجی و همکاران (۲۰۰۱) تأثیر بارش های ۲۴ ساعته با دوره های بازگشت متفاوت را روی دو نوع خاک مختلف بررسی نمودند. ضعف اصلی این تحقیق، عدم تأثیر تغییرات رطوبت و مکش در تغییر شکل شیروانی در طول مدت زمان بارندگی بوده است. کای و آگای (۲۰۰۴) با استفاده از روش های عددی نشان دادند که پارامترهای هیدرولیکی، شدت و مدت زمان بارش و شرایط مرزی، تأثیر معنی-داری بر تغییرات فشار آب حفره ای و پایداری شیروانی ها دارند. این تحقیق، برای یک شیروانی ساده و بدون در نظر گرفتن تأثیر هم زمان تراوش- تغییر شکل بوده است. علی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر شرایط مرزی ناشی از بارندگی را در پایداری شیروانی ها مطالعه کردند. در این تحقیق، آن ها از روش های عددی برای بررسی تأثیر شدت بارش، مکانیسم گسیختگی، مدت زمان لازم برای ناپایداری و عمق گسیختگی، برای مرزهای کاملاً زهکشی شده، جزئی زهکشی شده^۱ و نفوذناپذیر استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شرایط مرزی از نظر زهکشی می تواند به میزان قابل توجهی روی وقوع و عمق زمین لغزش های ناشی از بارندگی تأثیر داشته باشد. سوتجو و همکاران (۲۰۱۵) پایداری شیروانی ایجاد شده جهت احداث زیرساخت ها و توسعه شهری، برای بررسی تأثیر زاویه شیب و بارگذاری های مختلف در پایداری شیروانی را با استفاده از بسته نرم افزاری GeoSlope بررسی نمودند؛ ولی به ناپایداری شیروانی در اثر بارندگی اشاره ای نداشتند. کونر و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر بارندگی

ویژه ای برخوردار است. در کشور ما، معمولاً با اتکا به توصیه های نشریات فنی عمومی و بدون مطالعات و محاسبات ژئوتکنیک کافی، نسبت به خاک برداری و ایجاد ترانشه جهت احداث راه ها اقدام می شود. در مطالعات محدود انجام یافته نیز، بدون توجه به وضعیت آب های زیرسطحی، معمولاً تحلیل ها بر پایه اصول مکانیک خاک کلاسیک در دو حالت حدی خشک و اشباع انجام می-شود؛ در حالی که در طبیعت، خاک ها و ترانشه های ایجاد شده عمدتاً غیراشباع هستند. ناپایداری ترانشه ها می تواند به عوامل مختلفی مانند زمین شناسی، توپوگرافی، شرایط هیدروژئولوژیک و پارامترهای ژئومکانیک بستگی داشته باشد. اما بر اساس گزارش های فنی سازمان راه داری، یکی از مهم ترین عوامل ناپایداری شیروانی ها، عدم توجه به مسئله آب های سطحی و نفوذ آن ها در ترانشه می باشد. آب در محدوده غیراشباع، به دلیل تبخیر و تشکیل جریان صعودی از یک طرف و جریان رو به پایین آن از طرف دیگر، وضعیت متفاوت فشار آب منفذی را به خاک دیکته می کند (فردلان و همکاران، ۱۹۹۳). به طور کلی، در اثر بارندگی و نفوذ آب باران در خاک غیراشباع، مقاومت برشی تأمین شده توسط مکش خاک کاهش یافته و در نتیجه ناپایداری اتفاق می افتد. تحول اساسی در بررسی پایداری شیروانی ها زمانی آغاز شد که محققین ژئوتکنیک در هنگ کنگ، در آنالیز برگشتی لغزش های سطحی اتفاق افتاده در حین و یا پس از بارندگی، با به کارگیری روش-های تحلیل پایداری متداول، مشکل پیدا کردند و زمانی که فردلان و همکاران (۱۹۹۳) نظریه مقاومت برشی خاک های غیراشباع را ارائه نمودند، محققین به دلایل این زمین لغزش ها پی بردند (مُهدنور و همکاران، ۲۰۱۹). روش های مختلفی برای بررسی پایداری شیروانی های غیراشباع ارائه شده است. یکی از کامل ترین روش های تحلیلی را انجی و همکاران (۲۰۰۷) ارائه داده اند. ضعف عمده روش های تحلیلی این است که در تحلیل پایداری

۱- Partially drained

خاک برداری شده با برم‌های متعدد، با در نظر گرفتن آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش انجام تحقیق

ابتدا تئوری روند نفوذ و حرکت آب باران در خاک غیراشباع معرفی و سپس فرمول‌بندی آن و مقاومت برشی خاک غیراشباع در روش عددی تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC 2D به صورت خلاصه ارائه شده است. در ادامه تحقیق، مشخصات هندسی و پارامترهای مصالح ترانشه با استفاده از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی استخراج شد. سپس، مقادیر متوسط بارش ماهانه و مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت مختلف برای محدوده مورد نظر از روی اطلاعات و آمار ایستگاه-های هواشناسی منطقه برآورد گردیده است. با استفاده از ماژول جریان دوفازی^۱ نرم‌افزار FLAC 2D، مدل عددی شیروانی بر اساس پارامترهای استخراج شده تهیه و آنالیز عددی انجام شده است. در انتهای مقاله، بر اساس نتایج آنالیزها، تغییرات فشار آب منفذی، تغییرات درجه اشباع، تغییر شکل‌های ایجاد شده و تغییرات ضریب اطمینان در زمان‌های مختلف استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. تئوری نفوذ و حرکت آب باران در خاک

غیراشباع به صورت جریان غیرماندگار^۲

نفوذ و حرکت آب ناشی از باران در خاک غیراشباع مثل حرکت آب در خاک اشباع توصیف می‌گردد. اما ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت غیراشباع ثابت نبوده و تابعی از درصد رطوبت و مکش خاک است. تعدادی از محققین، با این فرض که فضای اشغال شده توسط هوا، رفتاری شبیه به فاز جامد دارد، خاک غیراشباع را شبیه یک خاک اشباع، اما با درصد رطوبت کاهش یافته در نظر گرفته‌اند. معادلات حاکم بر جریان آب غیرماندگار در

بر پایداری شیروانی خاک برداری شده را با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D بررسی و توصیه نمودند اگر شیب ترانشه ایجاد شده کمتر از ۳۰ درجه باشد پایداری آن در طولانی مدت از نظر تغییر شرایط غیراشباع بی‌خطراست. شو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geostudio، تأثیر مدت زمان بارش‌های شدید بر رفتار شیروانی‌های از جنس خاک رس قرمز را تحلیل کردند و به این نتیجه دست یافتند که با طولانی تر شدن مدت زمان بارش، فشار آب منفذی بیشتر، سطح آب بالاتر، مکش ماتریک کمتر و در نتیجه ناپایداری شیروانی بیشتر می‌شود. همچنین، مشاهده کردند که پس از بارش‌های شدید کوتاه مدت، نشست در سطح شیروانی رخ می‌دهد؛ ولی به ناپایداری کلی نمی‌انجامد. پراساد و همکاران (۲۰۱۶) ناپایداری شیروانی طبیعی ناشی از بارش شدید سه روزه (۲۰-۱۸ اکتبر، ۲۰۰۴) را بررسی نمودند. محققین در این مقاله، از نرم‌افزارهای SLOPE/W و SEEP/W جهت آنالیزهای عددی تراوش و پایداری شیروانی، استفاده نمودند؛ در حالی که این نرم‌افزارها توانایی آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل را ندارند.

با بررسی نتایج تحقیقات انجام شده قبلی مشخص گردید که در سال‌های اخیر، در کنار تحقیقات صحرایی و مدل‌سازی‌های فیزیکی، روش‌های عددی برای حل مسائل پیچیده خاک‌های غیراشباع، از جمله بررسی روند نفوذ آب باران و تأثیر آن بر ناپایداری شیروانی‌های غیراشباع، توسعه داده شده‌اند. همچنین، شیروانی‌های مطالعه شده عمدتاً شیروانی‌های طبیعی بوده و در بررسی‌ها، آنالیز حرکت آب در شیروانی غیراشباع، آنالیز تنش- کرنش و تحلیل پایداری مستقل از هم بوده است. نقاط ضعف آن‌ها عدم در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمانی آنالیزهای تراوش- تغییر شکل در پایداری کلی شیروانی می‌باشد در این تحقیق، علاوه بر در نظر گرفتن شرایط نتایج مطالعات گذشته، پایداری شیروانی ترانشه

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-

تغییر شکل

۴. فرمول‌بندی حرکت آب در خاک غیراشباع به روش تفاضل محدود در ماژول جریان دوفازی^۳

± جریان دوفازی، مکش ماتریک (P_c) با استفاده از رابطه تجربی ون‌گنوختن به صورت زیر بیان می‌شود (FLAC Manual, 2011):

$$P_c(S_w) = P_g - P_w = P_0[S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (۴)$$

در رابطه بالا، P_w فشار آب منفذی، P_g فشار هوای منفذی، S_w درجه اشباع، S_e درجه اشباع مؤثر خاک، a پارامتر شیب منحنی کاپیلاری که برای خاک خوب‌دانه-بندی شده مقدار ۱ و برای بددانه‌بندی شده مقدار صفر می‌باشد. برای یک حجم محدود V ، قوانین تعادل جریان سیال به شکل زیر درمی‌آید:

(۵)

$$\frac{S_w}{K_w} \Delta P_w + \Delta S_w = -\frac{1}{nV} [Q_w \Delta t + S_w \Delta V] + \frac{S_g}{K_g} \Delta P_g + \Delta S_g \quad (۶)$$

در روابط بالا، V حجم گرهی^۴ و Q نرخ جریان سیال گرهی^۵ می‌باشد. با استفاده از رابطه (۴)، تغییر در فشار سیالات منفذی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_g - \Delta P_w = P'_c \Delta S_w \quad (۷)$$

$$\Delta S_w + \Delta S_g = 0 \quad (۸)$$

که P'_c مشتق فشار کاپیلاری (مکش ماتریک) نسبت به درجه اشباع (S_w) می‌باشد. این رابطه برای حذف ΔP_w و ΔP_g از روابط (۵) و (۶) به کار می‌رود. با جایگذاری و مرتب کردن رابطه (۶) به صورت زیر درمی‌آید.

یک المان غیراشباع توسط معادله ریچاردز بیان می‌شود (ریچاردز، ۱۹۳۱). با توجه به طول نسبتاً زیاد شیروانی در مقایسه با دیگر ابعاد آن، آنالیزها دوبعدی بوده و معادله ریچاردز به شکل زیر درمی‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{wx} \frac{\partial H_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{wy} \frac{\partial H_w}{\partial y} \right) + \quad (۱)$$

$$Q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t}$$

که H هد کل ناشی از مکش بعلاوه ارتفاع از سطح مبنا، k_w تابع هدایت هیدرولیکی خاک وابسته به مقادیر مکش و θ_w رطوبت حجمی وابسته به مقادیر مکش است. برای حل دقیق معادله بالا بایستی دو تابع تغییرات رطوبت حجمی^۱ و تغییرات هدایت هیدرولیکی^۲ در مقابل تغییرات مکش به صورت هم‌زمان حل گردد (ون‌گنوختن، ۱۹۸۶):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)^n\}} \right]^{1-1/n} \quad (۲)$$

(۳)

$k =$

$$k_s \frac{[1 - \{\alpha(u_a - u_w)\}^{(n-1)} \cdot [1 + \alpha(u_a - u_w)^n]^{1/n-1}]^2}{\left[(1 + \alpha(u_a - u_w)^n)^{\frac{1-n}{2}} \right]}$$

که u_w فشار آب منفذی، u_a فشار هوای منفذی، θ_s ، θ_r به ترتیب رطوبت حجمی خاک برای حالت‌های باقیمانده و اشباع، α پارامتر نشان‌دهنده مکش ورودی هوا، n پارامتر اندازه منافذ خاک و k_s ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع است. حال، با در نظر گرفتن شرایط مرزی، پارامترهای هیدرومکانیکی خاک و میزان نفوذ آب ناشی از بارندگی می‌توان معادلات بالا را برای به دست آوردن مقادیر مکش، میزان رطوبت حجمی و فشار آب منفذی در هر لحظه از زمان برای شیروانی غیراشباع حل نمود.

۴- Nodal volume

۵- Nodal flow rate

۱- Soil Water Retention Curve (SWRC)

۲- Hydraulic Conductivity Function (HCF)

۳- TPFLOW (Two Phase Flow)

انحلال پُر شده است. با توجه به ویژگی دانه‌های جامد خاک و پر شدن فضای خالی بین آن‌ها توسط آب و هوا، این ماژول مناسب برای مدل‌سازی عددی رفتار خاک‌های غیراشباع می‌باشد. در فرمول‌بندی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ۱- تغییرات در تنش مؤثر باعث ایجاد کرنش‌های حجمی می‌شود، ۲- تغییر شکل حجمی باعث تغییر در فشار سیالات منفذی می‌شود و ۳- از تنش مؤثر بیشاب در تشخیص گسیختگی خاک و به دست آوردن تغییر شکل‌های پلاستیک در مدل‌های رفتاری الاستو-پلاستیک استفاده می‌شود. علاوه بر فرضیات بالا، مدل همبسته خاک‌های غیراشباع بایستی معادله تعادل سیال، معادله تعادل حرکت، معادله سازگاری، قانون نفوذپذیری، قانون مکش خاک و قوانین رفتار مکانیکی را برآورد نماید. با توجه به این که در فرمول‌بندی پایه این نرم‌افزار تغییر در تنش مؤثر باعث تغییر شکل می‌شود، هر یک از مدل‌های رفتاری آنالیز جریان دوفازی (دو سیال) را می‌توان برای مدل‌سازی همبسته تراوش- تغییر شکل استفاده کرد. در این ماژول، پاسخ افزایش تنش مؤثر برای مصالح متخلخل با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود (FLAC Manual, 2011):

$$\Delta\sigma'_{ij} = H(\sigma_{ij}, \Delta\varepsilon_j, k) \quad (13)$$

که در آن $\Delta\sigma'_{ij}$ تغییر در تنش مؤثر و تابع H بیان‌کننده قانون رفتار مکانیکی مصالح است. برای مدل‌های رفتاری دارای پلاستیسیته، از تنش مؤثر بیشاب برای تعیین گسیختگی استفاده می‌شود (دنگلا و همکاران، ۱۹۹۹):

$$\Delta\sigma'_{ij} = \Delta\sigma_{ij} + \overline{\Delta P} \delta_{ij} \quad (14)$$

که در آن:

$$\overline{\Delta P} = S_w \cdot \Delta P_w + S_g \cdot \Delta P_g \quad (15)$$

در آنالیز همبسته هیدرومکانیکی غیرماندگار (متغیر وابسته به زمان)، تغییر شکل حجمی باعث ایجاد فشار سیال منفذی و تغییر در درجه اشباع می‌شود. این اثر همبسته اضافی با متغیرهای اضافه مورد توجه این تحقیق

(۹)

$$\frac{S_g}{K_g} \Delta P_w + \left(\frac{S_g P'_c}{K_g} - 1 \right) \Delta S_w = -\frac{1}{nV} [Q_g \Delta t + S_g \Delta V]$$

با حل روابط بالا، ΔP_w و ΔS_w به صورت زیر درمی‌آیند:

$$\Delta P_w = \frac{-\frac{\Delta t}{nVD} \left[Q_w \left(1 - \frac{S_g P'_c}{K_g} \right) + Q_g \right] - \beta \frac{\Delta V}{nVD} \left[S_w \left(1 - \frac{S_g P'_c}{K_g} \right) + S_g \right] \Delta S_w}{\left[\frac{1}{K_w} - \frac{\Delta t}{nVD} \left[Q_w \frac{S_g P'_c}{K_g} - Q_g \frac{S_w}{K_w} \right] - \beta \frac{\Delta V}{nVD} S_w S_g \right]} \quad (10)$$

$$\Delta S_w = \frac{-\frac{\Delta t}{nVD} \left[Q_w \frac{S_g P'_c}{K_g} - Q_g \frac{S_w}{K_w} \right] - \beta \frac{\Delta V}{nVD} S_w S_g \left[\frac{1}{K_g} - \frac{1}{K_w} \right]}{\left[\frac{1}{K_w} - \frac{\Delta t}{nVD} \left[Q_w \frac{S_g P'_c}{K_g} - Q_g \frac{S_w}{K_w} \right] - \beta \frac{\Delta V}{nVD} S_w S_g \right]} \quad (11)$$

که در آن، D به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_g}{K_g} - \frac{S_w}{K_w} \cdot \frac{S_g P'_c}{K_g} \quad (12)$$

که β ضریب ثابتی است که برای حالت همبسته مقدار ۱ و برای آنالیز تراوش مقدارش صفر است.

در روش تفاضل محدود صریح، مقادیر فشار آب منفذی و درجه اشباع در زمان $t + \Delta t$ از روی مقادیر آن‌ها در زمان t با اضافه کردن افزایش جزئی ΔS_w و ΔP_w از روابط (۱۰) و (۱۱) به مقادیر آن‌ها در زمان t به دست می‌آید.

۵. فرمول‌بندی آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل^۱

در خاک‌های غیراشباع هرگونه تغییر در درجه اشباع می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های حجمی گردد. در جهت مدل‌سازی واقعی تأثیر بارش در پایداری شیروانی ترانشه‌ها، تحلیل‌های تراوش و تغییر شکل (تنش-کرنش) به صورت همبسته انجام شده است. برای آنالیزهای همبسته تراوش- تغییر شکل از ماژول TPFLOW نرم-افزار 2D FLAC استفاده شده است. در این ماژول، فرض بر این است که دانه‌های جامد قابل فشرده شدن نیست و فضای خالی بین دانه‌های جامد توسط دو سیال غیرقابل

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل

آب و هوای منفذی (فشار کاپیلاری)، همان مکش ماتریک بوده، در نتیجه چسبندگی ناشی از غیراشباع از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_c = S_w P_c \tan \phi \quad (21)$$

که P_c مکش ماتریک است و با استفاده از رابطه (۴) تعیین می گردد.

قرار گرفته است. سهم گره های این متغیرها پس از توزیع کرنش های حجمی هر زون به گره ها محاسبه شده و برای گام بعدی آنالیزها با مقادیر جدید ادامه می یابد. میزان افزایش کرنش حجمی مصالح متخلخل و گرادیان سرعت از معادله سازگاری زیر برآورد می گردد:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (16)$$

۶. مقاومت برشی خاک غیراشباع در ارزیابی پایداری شیروانی

۷. مشخصات هندسی و پارامترهای ژئومکانیک

ترانشه مورد مطالعه

جاده اردبیل - خلخال یکی از مهم ترین جاده های ارتباطی استان اردبیل، در محل سه راهی فیروزآباد از جاده اردبیل - سرچم منشعب و با طول ۲۷ کیلومتر به خلخال متصل می شود. با توجه به توپوگرافی منطقه، مسیر دارای ترانشه های متعددی بوده و پایداری آن ها به دلیل ارتباط شهرستان با مرکز استان اهمیت ویژه ای دارد. در بهار سال ۱۳۹۶، در کیلومتر ۱۲+۵۰۰ این جاده، پس از بارندگی ها در خرداد ماه ۱۳۹۶ نا پایداری در شیروانی بالادستی ترانشه اتفاق افتاد. لذا، در این تحقیق، این ترانشه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در شکل ۱، مسیر جاده و مقطع ترانشه و ابعاد هندسی و زون بندی شیروانی مورد مطالعه نشان داده شده است. در این ترانشه، شیب شیروانی ها نسبت به افق ۳۰ درجه بوده و در ارتفاع ۶ متری دارای یک برم به عرض ۳ متر می باشد. ارتفاع کل ترانشه ایجاد شده در بحرانی ترین مقطع به ۲۳ متر می رسد.

در نرم افزار FLAC 2D، از تنش مؤثر اصلاح شده بیشاب (بیشاب، ۱۹۵۹) برای بیان مقاومت برشی خاک غیراشباع استفاده شده است. در این رویه، مقاومت برشی خاک بر اساس پارامترهای مقاومت برشی و متغیر تنش مؤثر به صورت زیر تعیین می شود:

$$\tau = C' + \sigma'(\phi') \quad (17)$$

رابطه بالا در مازول TPFLOW به صورت بیان شده است:

$$\tau^{\max} = \sigma^b \cdot \tan \phi + C \quad (18)$$

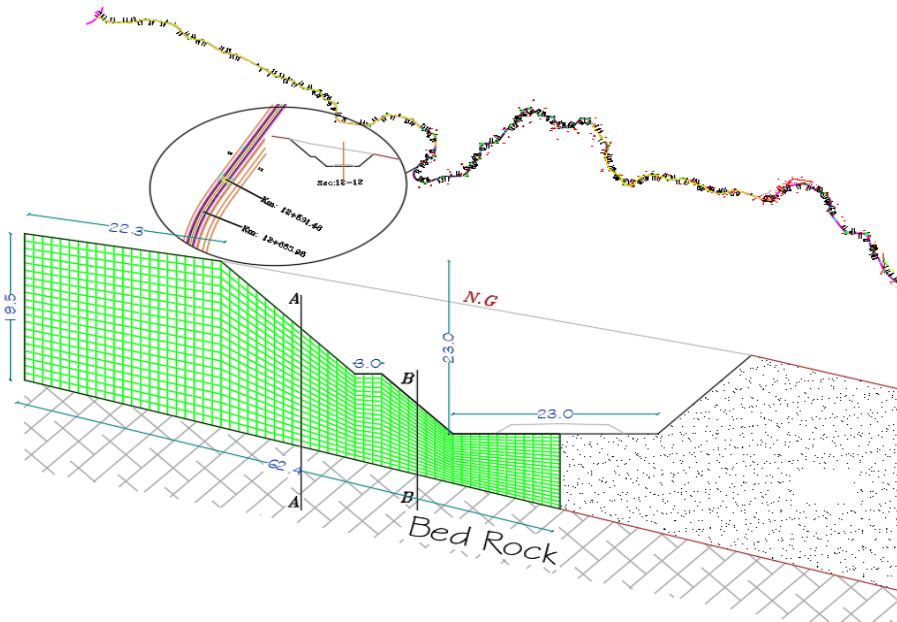
که در آن τ^{\max} مقاومت برشی مصالح و σ^b تنش مؤثر بیشاب است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma' = \sigma - (S_w \cdot P_w + S_a \cdot P_a) \quad (19)$$

که در آن S_w درجه اشباع آب و $S_a = 1 - S_w$ درجه اشباع هوا و P_a و P_w به ترتیب فشار آب و هوای منفذی است. با جایگذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۱۸):

$$\tau^{\max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - \quad (20)$$

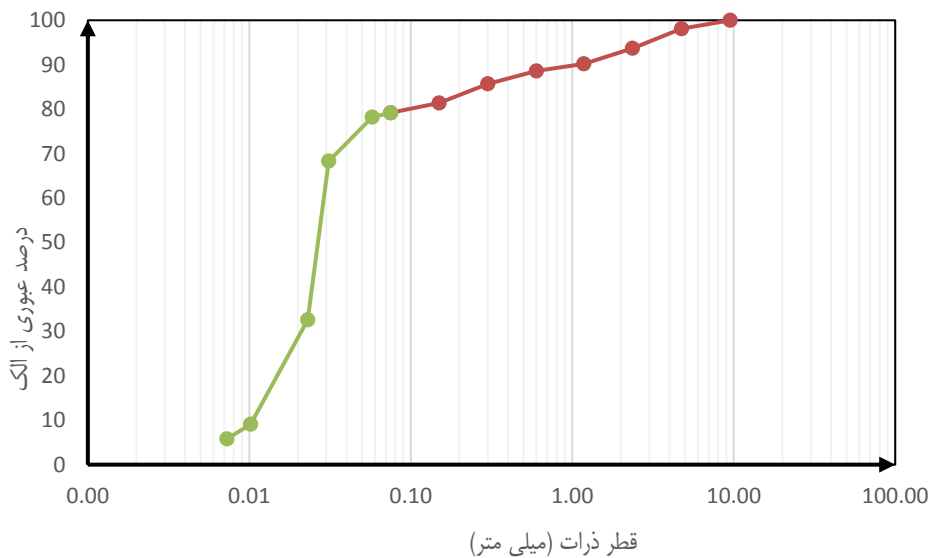
$P_w) \tan \phi + C$
در رابطه بالا $S_w (P_a - P_w) \tan \phi$ چسبندگی اضافی در اثر غیراشباع است. از طرف دیگر چون اختلاف فشار



شکل ۱. مسیر جاده، مقطع ترانشه، ابعاد و مش بندی شیروانی مورد مطالعه

آزمایش‌ها، جنس مصالح ترانشه تا سنگ بستر نسبتاً یکسان و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، سیلت با خمیری کم (ML) طبقه‌بندی شده است. شکل ۲، منحنی دانه‌بندی مصالح شیروانی را نشان می‌دهد.

برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی مصالح خاکی ترانشه از جمله وزن مخصوص، دانه‌بندی، رطوبت اولیه، دانسیته نسبی، نفوذپذیری و خواص خمیری، از نتایج نمونه‌های اخذ شده در حین خاک‌برداری استفاده شده است. بر اساس نتایج



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح شیروانی

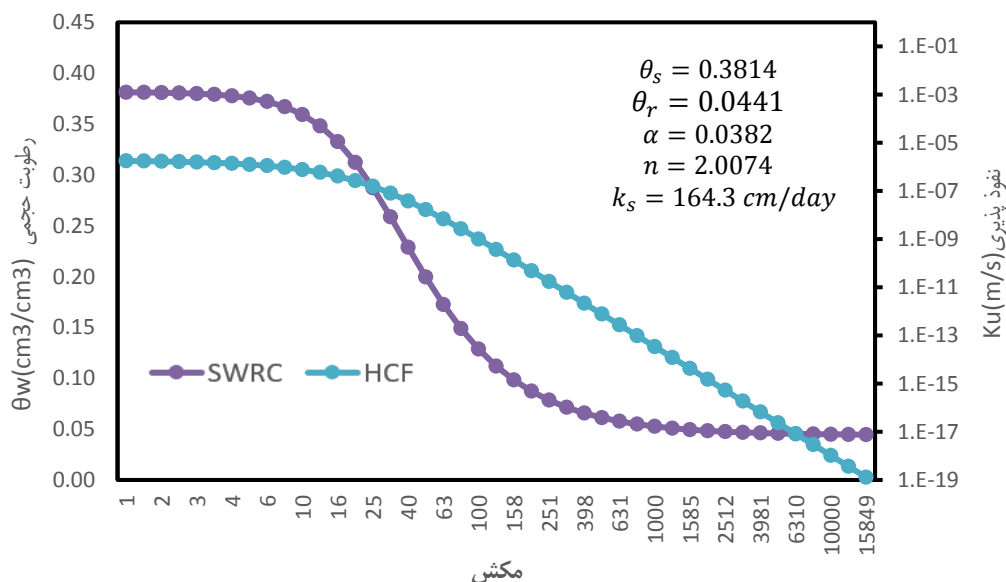
قرار دارد و به دلیل نفوذناپذیری آن، آب‌های زیرسطحی در روی سطح سنگ بستر و در سطحی پایین‌تر از خط پروژه در جریان بوده است. بنابراین، شیروانی ایجاد شده

بر اساس نتایج حفاری‌های انجام شده در محدوده طرح، ضخامت خاک روباره به‌طور متوسط ۲۰ متر بوده و در آن عمق، سنگ بستر با شیب متناسب با سطح زمین

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل

در ترانشه غیراشباع بوده و ارزیابی دقیق پایداری آن مستلزم بررسی آن از منظر تئوری خاک های غیراشباع می باشد. همچنین، جهت تعیین پارامترهای مورد نیاز برای منحنی مشخصه آب- خاک و تابع هدایت هیدرولیکی

غیراشباع خاک از نرم افزار RETC که با استفاده از شبکه هوش مصنوعی و بر اساس منحنی دانه بندی خاک، پارامترهای بالا را به روش ونگونختن ارائه می کند، استفاده شده است. شکل ۳، دو منحنی SWRC و HCF را برای مصالح خاکی شیروانی (ML) نشان می دهد.



شکل ۳. منحنی مشخصه آب - خاک (SWRC) و منحنی تابع تغییرات هدایت هیدرولیکی (HCF)

بر اساس نتایج آزمایش های صحرائی و آزمایشگاهی انجام شده و منحنی های استخراج شده HCF SWRC، پارامترهای هیدرومکانیکی مصالح شیروانی استفاده شده برای آنالیزها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای مکانیکی و هیدرومکانیکی استفاده شده در آنالیزها

α	n	θ_r	θ_s	ϕ	K_s	C	E	γ_{sat}
-	-	-	-	deg	m/s	Pa	Pa	KN/m ³
۰/۰۳۸۲	۲/۰۰۷۴	۰/۰۴۴۱	۰/۳۸۱۴	۲۸/۵۰	۱/۹* ^{-۱۰}	۷۵۰۰	۲/۱* ^{۱۰}	۱۹/۲۰

مورد تحقیق استخراج و در جدول ۲ نشان داده می شود. برای بررسی تأثیر بارش طولانی مدت- شدت کم، از مقادیر بارش متوسط ماهانه به مدت ۵ ماه استفاده شده است.

۷-۱. تعیین شدت بارش های محدوده مورد

مطالعه

با استفاده از اطلاعات نزدیک ترین ایستگاه های هواشناسی منطقه، مقادیر متوسط بارش ماهانه محدوده

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای مکانیکی و هیدرومکانیکی استفاده شده در آنالیزها

α	n	θ_r	θ_s	ϕ	K_s	C	E	γ_{sat}
-	-	-	-	deg	m/s	Pa	Pa	KN/m ³
۰/۰۳۸۲	۲/۰۰۷۴	۰/۰۴۴۱	۰/۳۸۱۴	۲۸/۵۰	۱/۹* ^{-۱۰}	۷۵۰۰	۲/۱* ^{۱۰}	۱۹/۲۰

۷-۱. تعیین شدت بارش‌های محدوده مورد

مطالعه

با استفاده از اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، مقادیر متوسط بارش ماهانه محدوده

مورد تحقیق استخراج و در جدول ۲ نشان داده می‌شود. برای بررسی تأثیر بارش طولانی‌مدت - شدت کم، از مقادیر بارش متوسط ماهانه به مدت ۵ ماه استفاده شده است.

جدول ۲. خلاصه اطلاعات اقلیمی محدوده - متوسط بارش ماهانه برحسب میلی‌متر

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
۱۹/۵	۲۸/۹	۲۸/۳	۳۳/۲	۳۱/۵	۴۴/۹	۵۱/۷	۵۱/۴	۲۵/۳	۴/۹	۱/۹	۳/۵	۳۲۵

همچنین، برای بررسی تأثیر بارش کوتاه‌مدت - شدت زیاد، از روی اطلاعات آماری موجود در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های منطقه و تحلیل‌های آماری انجام

شده روی آن‌ها، حداکثر مقادیر بارش ۲۴ ساعته با دوره - های بازگشت مختلف (برحسب میلی‌متر) محاسبه و استخراج گردید. جدول ۳، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در محدوده مورد تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در محدوده مورد تحقیق

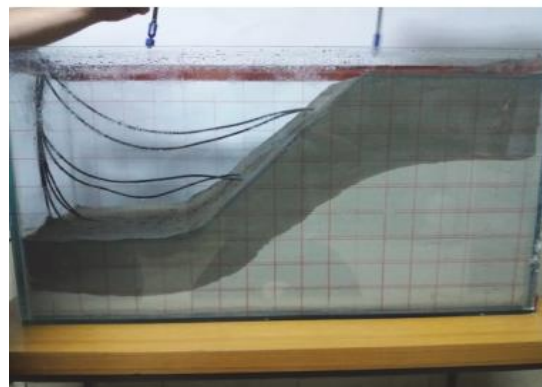
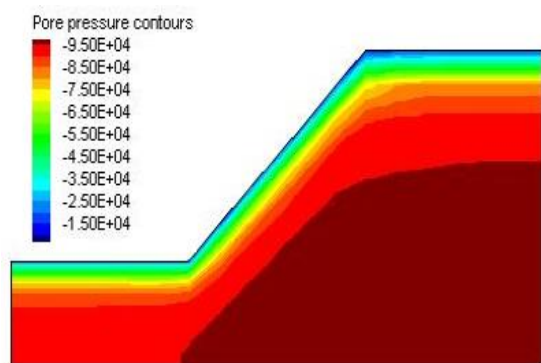
دوره بازگشت	۲	۳	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
میزان بارش (mm)	۲۹,۸۱	۳۲,۹۷	۳۵,۸۹	۳۸,۸۹	۴۱,۸۰	۴۳,۵۵	۴۵,۰۱	۴۶,۲۶

۷-۲. صحت‌سنجی کدهای تهیه شده در مدل -

سازی عددی

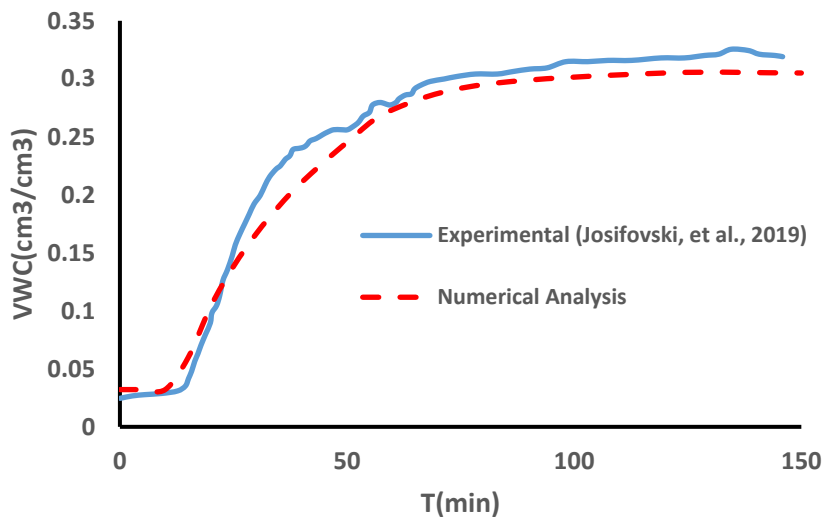
جهت صحت‌سنجی کدهای تهیه شده، از نتایج مدل فیزیکی برای بررسی پایداری شیروانی خاکی از جنس ماسه سیلت‌دار در مقابل بارندگی، استفاده شده است (یوسیفووسکی و همکاران، ۲۰۱۹). شکل (۴-الف) مدل فیزیکی شیروانی ساخته‌شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقاله، مدل عددی

شیروانی مذکور با استفاده از نرم‌افزار تهیه و آنالیزهای لازم انجام شد شکل (۴-ب). مقایسه نتایج مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی با نتایج به‌دست آمده از آنالیز عددی در نقطه شماره (III) در شکل ۵ نشان داده می‌شود. اختلاف نتایج به‌دست آمده حدود ۴/۶ درصد بوده و صحت عملکرد مدل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الف) مدل فیزیکی شیروانی تحت تأثیر بارش باران (یوسیفووسکی و همکاران، ۲۰۱۹) و ب) نتایج مدل عددی

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل



شکل ۵. مقایسه نتایج آنالیز عددی تهیه شده با نتایج اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی

پایداری انجام گردید. در نهایت، جهت بررسی تأثیر بارش کوتاه‌مدت- شدت زیاد، حداکثر مقادیر بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۵۰ ساله به مقدار ۴۳/۵ میلی‌متر در دو مرحله، ابتدا به مدت ۲۴ ساعت و سپس تا ۴۸ ساعت، به شیروانی اعمال و آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل روی آن انجام گردید. در هر مرحله، نتایج آنالیزها جهت بررسی و ارزیابی پایداری شیروانی استخراج گردید. جدول ۴، خلاصه اطلاعات آنالیزهای انجام شده را ارائه می‌دهد.

۳-۷. آنالیزهای انجام شده

مدل عددی شیروانی ترانشه مورد مطالعه بر اساس مشخصات هندسی و پارامترهای مصالح تهیه گردید. جهت برآورد شرایط اولیه ترانشه، ابتدا شیروانی برای حالت بدون اعمال بارش و با درجه اشباع اولیه خاک آنالیز گشت و تحلیل پایداری روی آن انجام شد. جهت بررسی تأثیر بارش‌های طولانی‌مدت- شدت کم، بارش‌های متوسط ماهانه به مدت پنج ماه و به میزان ۱۶۱/۳ میلی‌متر به مدل اعمال و آنالیز نشت غیرماندگار و تحلیل

جدول ۴. خلاصه اطلاعات آنالیزهای انجام شده در تحقیق

مرحله اول: اعمال شرایط اولیه	مرحله سوم: بررسی تأثیر بارش کوتاه‌مدت- شدت زیاد
<ul style="list-style-type: none"> تهیه کد مدل عددی شیروانی و اعمال مشخصات و پارامترهای مصالح تحلیل پایداری و استخراج ضریب اطمینان پایداری قبل از اعمال بارش 	<ul style="list-style-type: none"> فراخوانی اطلاعات ذخیره شده حالت قبل آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل (۲۴ساعت- ۴۳/۵ میلی‌متر) استخراج و ذخیره اطلاعات آنالیز همبسته
<p>مرحله دوم: بررسی تأثیر بارش طولانی‌مدت- شدت کم</p>	<ul style="list-style-type: none"> تحلیل پایداری و استخراج ضریب اطمینان بعد از ۲۴ ساعت
<ul style="list-style-type: none"> فراخوانی اطلاعات ذخیره شده شرایط اولیه آنالیز تراوش غیرماندگار (۵ ماه- ۱۶۱/۳ میلی‌متر) آنالیز تنش- کرنش و استخراج نتایج آنالیز ذخیره اطلاعات برای آنالیزهای همبسته ارزیابی پایداری و استخراج ضریب اطمینان 	<ul style="list-style-type: none"> آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل (۴۸ ساعت - ۸۷ میلی‌متر) استخراج و ذخیره اطلاعات آنالیز همبسته تحلیل پایداری و استخراج ضریب اطمینان بعد از ۴۸ ساعت

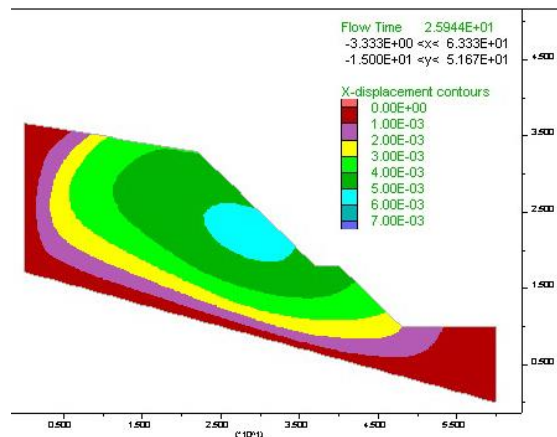
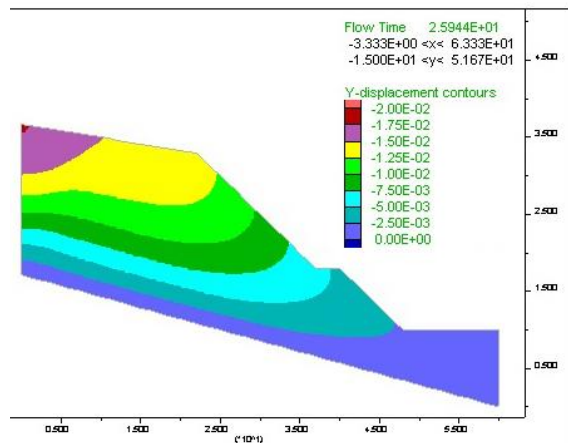
تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل

۸. نتایج و بحث

۸-۱. بررسی شرایط اولیه شیروانی - بدون اعمال بارش

جهت برآورد شرایط اولیه ترانشه، ابتدا شیروانی برای حالت بدون اعمال بارش و با درجه اشباع اولیه خاک آنالیز و سپس تحلیل پایداری روی آن انجام گردید.

ضریب اطمینان در حالت اول و بدون اعمال هرگونه بارش ۱/۲۲۷ بوده و شیروانی کاملاً پایدار بوده است. حداکثر جابجایی افقی در یک سوم ارتفاع شیروانی و به میزان ۳ میلی متر و حداکثر مقدار جابجایی قائم ۵ سانتی متر بوده و شیروانی کاملاً پایدار بوده است. شکل ۶، کانتورهای تغییرشکل افقی و قائم شیروانی برای حالت بدون اعمال هرگونه بارش را نشان می دهد.



شکل ۶. کانتورهای جابجایی ها: الف) افقی (سمت راست) و ب) قائم شیروانی (سمت چپ) قبل از اعمال بارشها

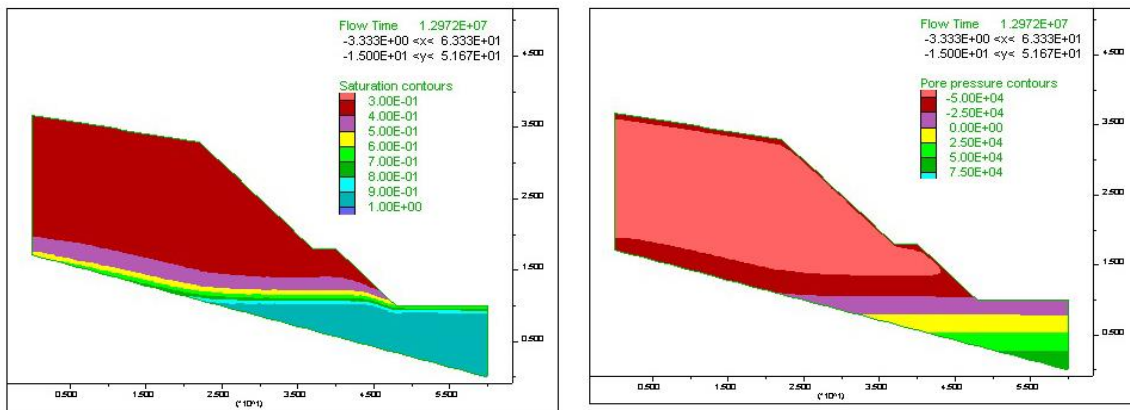
۸-۲. بررسی تأثیر بارش طولانی مدت - شدت کم

جهت بررسی تأثیر بارش طولانی مدت - شدت کم، ابتدا اطلاعات ذخیره شده آنالیز شرایط اولیه فراخوانی شده و سپس بارش های متوسط ماهانه به مدت ۵ ماه به شیروانی اعمال گردید. پس از اعمال بارش ۵ ماهه و انجام آنالیز نشت غیرماندگار، نتایج آنالیزها استخراج گردید. شکل ۷، کانتورهای درجه اشباع و فشار آب منفذی را نشان می دهد. همچنان که انتظار می رفت، درجه اشباع خاک در بدنه اصلی شیروانی در حد درجه اشباع پایدار خاک بوده و به دلیل کم بودن شدت بارش نسبت به نفوذپذیری مصالح شیروانی، آب باران در بدنه شیروانی نفوذ و در

نهایت در سطح سنگ بستر به طرف پایین حرکت می کند. از طرف دیگر، با توجه به ترانشه ایجاد شده در شیب نامحدود منطقه، در محل ایجاد ترانشه، ضخامت مصالح خاکی کمتر شده و مسیر حرکت آب به سمت کف ترانشه تسهیل می شود و آب نفوذی، علاوه بر حرکت به سمت پایین دست در روی سنگ بستر، به کف ترانشه نیز حرکت و آن قسمت از شیروانی را به حالت اشباع درمی آورد و در صورتی که در سطحی پایین تر از سطح روسازی زهکش های طولی احداث نگردد می تواند به بدنه جاده صدمه زده و بهره برداری از آن را با خطر مواجه نماید.

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-

تغییر شکل

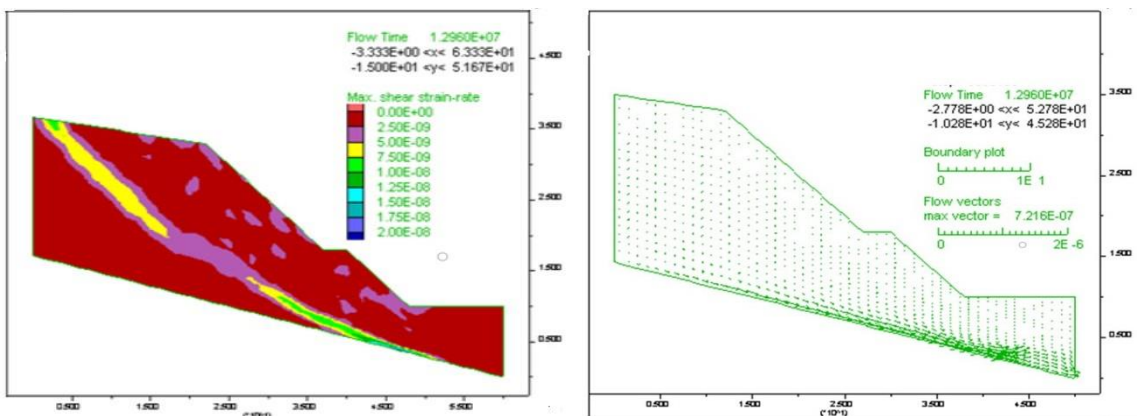


شکل ۷. کانتور تغییرات: الف) فشار آب منفذی و ب) درجه اشباع شیروانی در اثر اعمال بارندگی های با شدت متوسط

درازدت

محدوده ترانشه و جاده احداث شده، مشابه ناپایداری شیروانی های نامحدود، به صورت لغزش کلی از روی سنگ بستر گردند. شکل (۸-ب) کانتور تغییرات کرنش برشی در انتهای بارش طولانی مدت- شدت کم را نشان می دهد.

شکل (۸-الف) جریان آب ناشی از بارش طولانی- مدت- شدت کم را در داخل شیروانی نشان می دهد. جهت بررسی پایداری شیروانی برای بارش های طولانی مدت، تغییرات کرنش های برشی در انتهای بارش طولانی مدت استخراج و بررسی گردید. نتایج نشان داد که بارش های طولانی مدت می توانند باعث ناپایداری کلی



شکل ۸. الف) نفوذ آب باران در داخل شیروانی و جریان روی سنگ بستر (سمت راست) و ب) کانتور تغییرات کرنش برشی

در اثر بارش طولانی (سمت چپ)

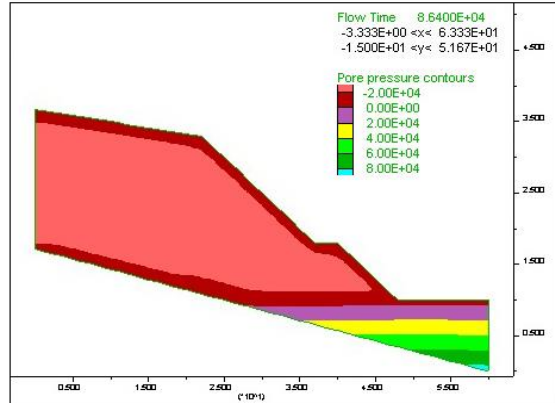
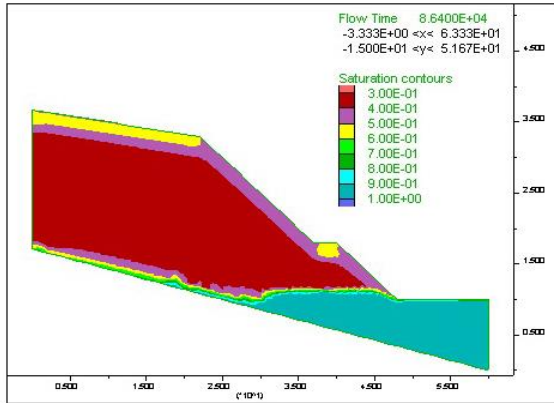
شدت زیاد، از شدت بارش های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۵۰ ساله استفاده شده است. پس از اعمال بارش ۲۴ ساعته به میزان ۴۳/۵ میلی متر، به دلیل شدت نسبتاً زیاد بارش، فرصت کافی برای رسیدن آب نفوذی به سطح سنگ بستر وجود نداشته و تغییرات درجه اشباع

۳-۸. بررسی تأثیر بارندگی های کوتاه مدت-

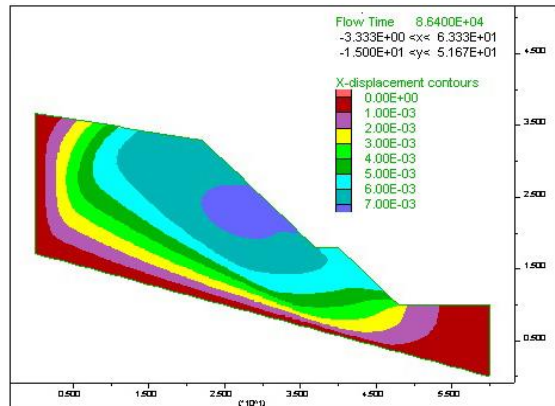
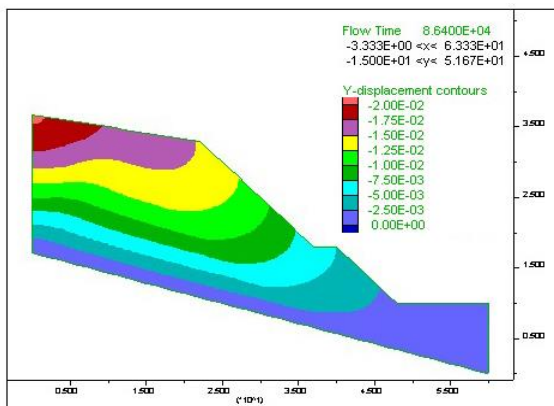
شدت زیاد

با توجه به نتایج بارش های طولانی مدت، درجه اشباع و فشار آب منفذی در کف ترانشه بیشتر می شود. ولی شرایط غیراشباع بدنه شیروانی همچنان پایدار است. در این بخش، جهت بررسی تأثیر بارش های کوتاه مدت-

در انتهای بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۶ و ۹، مشخص است که تغییرات در درجه اشباع و فشار آب منفذی در سطح شیروانی در عمق کم خواهد بود.



شکل ۹. کانتور تغییرات: الف) درجه اشباع (سمت راست) و ب) فشار آب منفذی در اثر اعمال بارش ۲۴ ساعته (سمت چپ) در اثر افزایش فشار آب منفذی به خاطر بارش شدید، مکش و در نتیجه مقاومت برشی خاک کمتر می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش درجه اشباع، وزن شیروانی نیز بیشتر شده و در نتیجه تأثیر هم‌زمان این دو عامل، علاوه بر احتمال وقوع زمین‌لغزش کلی حالت قبل، احتمال



شکل ۱۰. کانتور جابجایی‌ها: الف) افقی (سمت راست) و ب) قائم شیروانی در اثر بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۵۰ ساله (سمت چپ)

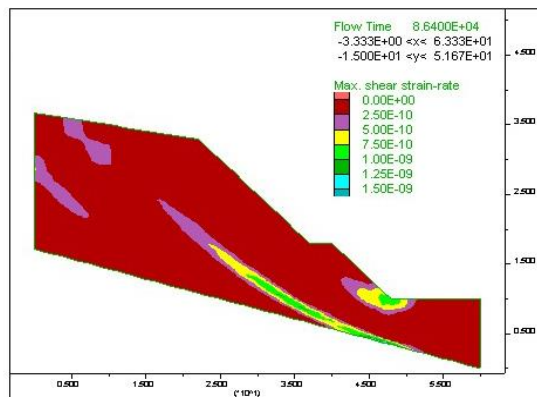
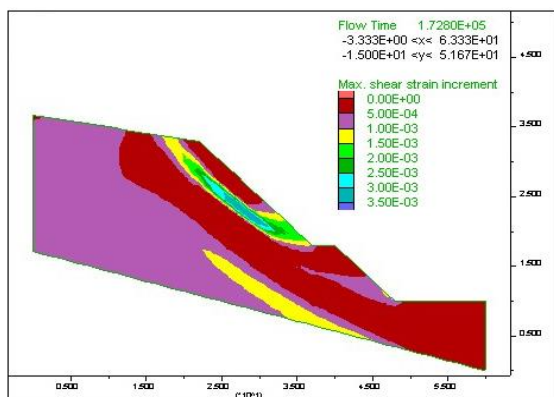
لغزش را می‌توان با جستجوی موقعیت بیشترین مقادیر تغییرات کرنش برشی به دست آورد. در این تحقیق، علاوه بر بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده، نحوه ایجاد تغییر شکل‌های برشی بررسی گردید. بر اساس نتایج تغییرات کرنش برشی، در صورت تداوم بارش‌های با شدت زیاد به مدت ۲۴ ساعت، علاوه بر ناپایداری کلی،

بیشترین مقادیر تغییر شکل‌ها به صورت قائم در تاج شیروانی به میزان ۴ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. ولی تغییر شکل‌های ایجاد شده کوچک بوده و منجر به ناپایداری کلی شیروانی نشده است. در آنالیز پایداری شیروانی، بیشترین مقادیر تغییرات کرنش برشی در سطح گسیختگی برشی ظاهر می‌شود. بنابراین، سطح

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش- تغییر شکل

تراوش- تغییر شکل انجام گردید. بر اساس نتایج تغییرات برشی در شکل (۱۱-ب)، زمین لغزش سطحی با عمق متوسط ۲ متری از پنجه برم اول شروع شده و در تاج شیروانی کامل می‌گردد.

یک لغزش سطحی دیگر با عمق کمتر از پنجه برم اول شیروانی شروع می‌گردد و می‌تواند منجر به ناپایداری شیروانی گردد (شکل ۱۱-الف). در ادامه، برای بررسی تأثیر بارش با شدت زیاد، بارش با شدت ۴۳/۵ میلی‌متر برای ۲۴ ساعت دیگر نیز اعمال و آنالیز همبسته



شکل ۱۱. کانتور تغییرات کرنش برشی در شیروانی: الف) بعد از ۲۴ ساعت بارش (سمت راست) و ب) بعد از ۴۸ ساعت بارش (سمت چپ)

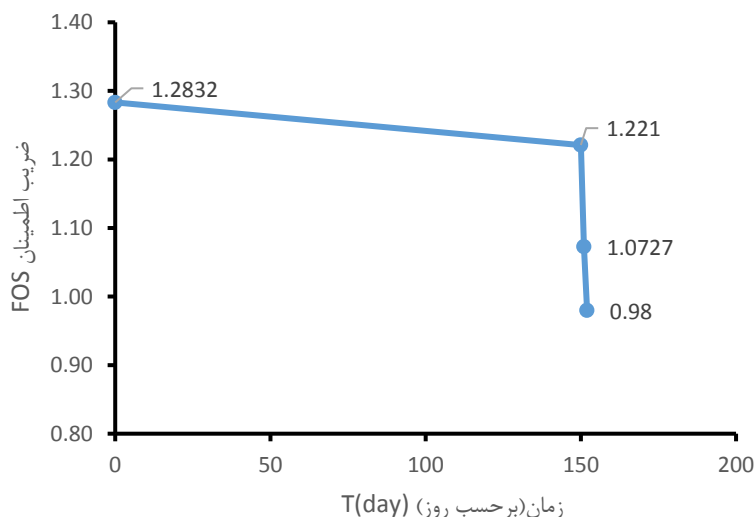
بارش‌های ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته با شدت نسبتاً زیاد، آب باران فرصت نفوذ کامل در شیروانی را پیدا نکرده و حداکثر تا عمق ۲ متری را خیس می‌کند و علاوه بر افزایش وزن شیروانی، باعث کاهش مکش و مقاومت برشی خاک غیراشباع در این محدوده می‌گردد. در نتیجه اثر مضاعف این دو عامل، ضریب اطمینان در طول مدت ۴۸ ساعت به مقدار ۰/۹۸۱، یعنی کمتر از واحد کاهش پیدا کرده و منجر به ناپایداری شیروانی می‌گردد. هرچند شدت بارش ۲۴ ساعته بوده و احتمال وقوع بارندگی به مدت ۴۸ ساعت و با شدت ۲۴ ساعته خیلی کم است، ولی می‌توان به این ترتیب آن را توجیه کرد که با توجه به سردسیر بودن منطقه، انباشت برف در زمستان و ذوب شدن آن در بهار، به همراه بارش باران، می‌تواند منجر به نفوذ بیشتر آب در شیروانی شده و منجر به ناپایداری گردد.

۴-۸. تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی در

مدت زمان بارش باران

در انتهای هر مرحله، ضریب اطمینان با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی (SSR) استخراج گردید. شکل ۱۳، تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی در طول بارندگی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل‌های پایداری، ضریب اطمینان با گذشت مدت زمان کاهش می‌یابد. به طوری که در ابتدای آنالیزها ضریب اطمینان ۱/۲۸۳ بوده و پس از پنج ماه به مقدار ۱/۲۲۱ کاهش پیدا کرده است. ولی به دلیل شدت نسبتاً کم بارش‌ها نسبت به نفوذپذیری مصالح ترانشه، آب باران در شیروانی نفوذ و در روی سنگ بستر در جهت رو به پایین حرکت می‌کند. ولی نرخ کاهش ضریب اطمینان به حدی نیست که باعث ناپایداری کامل شیروانی گردد. در ادامه، با اعمال

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل



شکل ۱۲. تغییرات ضریب اطمینان در طول مدت بارندگی

۹. نتیجه گیری

- تعیین پارامترهای مورد نیاز آنالیزهای غیراشباع، از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می توان با استفاده از آزمایش های محلی و آزمایشگاهی و نرم افزارهای تخصصی به دست آورد.
- برای بارش های طولانی مدت- شدت کم، به دلیل شدت کم بارش ها نسبت به نفوذپذیری مصالح خاکی شیروانی، آب باران در شیروانی نفوذ کرده و با گذشت زمان، بارش ها به سنگ بستر رسیده و در سطح نزدیک آن جاری می شوند.
- با طولانی تر شدن مدت زمان بارش، فشار آب منفذی بیشتر، مکش خاک و مقاومت برشی کمتر و در نتیجه شیروانی ناپایدار می شود. هرچه شدت بارش ها بیشتر باشد، ناپایداری سریع تر اتفاق خواهد افتاد.
- در شیروانی هایی که سنگ بستر (لایه نفوذناپذیر) در عمق نسبتاً کمی نسبت به ابعاد ترانشه قرار گرفته باشد، برای بارش های طولانی مدت می تواند باعث ناپایداری کلی ترانشه از سطح بالای لایه نفوذناپذیر باشد.
- برای بارش های شدید، تغییرات فشار آب منفذی و درجه اشباع با افزایش مدت زمان به صورت غیرخطی بوده و این افزایش در سطح شیروانی سریع تر بوده، ولی با افزایش عمق کمتر می باشد.
- بیشترین مقادیر فشار آب منفذی و درجه اشباع خاک در نزدیکی سطح شیروانی قرار دارد و با افزایش شدت و زمان بارندگی افزایش می یابد تا به اشباع کامل برسد. در اثر بارش های ۲۴ ساعته، جبهه خیس شده کمتر از ۲ متر بوده و دلیل اصلی این موضوع می تواند زمان کم بارش و عدم فرصت کافی جهت حرکت آب باران در شیروانی باشد.
- برای شیروانی از جنس مصالح با نفوذپذیری نسبتاً کم، علاوه بر بارش های با شدت نسبتاً کم و طولانی مدت، بارش های با شدت زیاد- کوتاه مدت می توانند تأثیر بیشتری در ناپایداری آن ها داشته باشند.
- با افزایش درجه اشباع و فشار آب منفذی، مکش ماتریک کاهش یافته و به تدریج حذف می شود. در شرایط بارندگی شدید، با مدت زمان بیشتر، اثر

تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی های خاکی غیراشباع در مسیر زیرساخت های حمل-ونقل با استفاده از آنالیز همبسته تراوش-تغییر شکل

متقابل این دو عامل باعث کاهش مقاومت برشی ۱۰.۱. **قدردانی**

خاک و ناپایداری شیروانی می گردد.
از شرکت سهامی آب منطقه ای اردبیل بخاطر همکاری و ارایه اطلاعات و گزارش های فنی موردنیاز این پژوهش سپاسگزاریم.

۱۱.۱. مراجع

- Ali, A., Huang, J., Lyamin, A. V., Sloan, S. W. and Cassidy, M. J. 2014. "Boundary effects of rain-induced landslide". *Comput. Geotech.*, 61: 341-354.
- Bishop, A. W. 1959. "The principle of effective stress". *Teknisk Ukeblad*, 106(39): 859-863.
- Cai, F. and Ugai, K. 2004. "Numerical analysis of rainfall effects on slope stability". *ASCE, Int. J. Geomech.*, 4(2): 69-78.
- Cheuk, C. Y., Ng, C. W. W. and Sun, H. W. (2005). "Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects". *Comput. Geotech.*, 32: 290-303.
- Cho, S. E. and Lee, S. R. 2001. "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration". *Comput. Geotech.*, 28: 185-208.
- Dangla, P. *Approches Energetique et Numerique des Milieux Poreux Non Satures. Memoire d'habilitation a diriger des recherches. Ecole Nationale des Ponts et al Chaussees. Ecole Normale Superieure de Cachan. Universite de Marne-la-Valee (1999).*
- FLAC Manual. 2011. "Fluid-mechanical interaction". Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. 1993. "Soil mechanics for unsaturated soils". John Wiley & Sons, Inc., N. Y.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. 1978. "Shear strength of unsaturated soils". *Can. Geotech. J.*, 15(3): 313-321.
- Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B. and Curran, J. 2005. "A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation". *Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.*
- Huang, F. K., Wang, G. S. and Tsai, Y. L. 2013. "Rainfall reliability evaluation for stability of municipal solid waste landfills on slope". *Comput. Intel. Civ. Hyd. Eng.*, Paper ID: 653282, 10 p.
- Koner, R. and Chakravarty, D. 2016. "Numerical analysis of rainfall effects in external overburden dump". *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 26: 825-831.
- Li, Y., Xu, W., Wang, S., Wang, H. and Dai, Y. 2019. "Slope stability analysis with reference to rainfall infiltration in the Yongping copper mine, China". *Curr. Sci.*, 116(4): 536-543.
- Mdnor, M. J., Muda, M. A., Abdul Rahman, A. S. 2019. "Rainfall induced slope failure detection using infiltration type, slope stability method applying nonlinear failure envelope". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 513, 012013, pp. 1-10.
- Mukhlisin, M. and Taha, M. R. 2012. "Numerical model of antecedent rainfall effect on slope stability at a hillslope of weathered granitic soil formation". *J. Geol. Soc. India*, 79(5): 525-531.
- Ng, C. W. W. and Menzies, B. 2007. "Advanced unsaturated soil mechanics and Engineering". CRC Press, Taylor & Francis, London, 687 p.
- Ng, C. W. W., Tung, Y. K., Wang, B. and Liu, J. K. 2001. "3D analysis of effect of rainfall patterns on pore water pressures in unsaturated slopes". *Can. Geotech. J.* 38(5): 1049-1062.
- Nikolaevskij, V. N. 1990. "Mechanics of porous and fractured media". *Series in Theoretical and Applied Mechanics*, R. K. T. Hsieh (Ed.), World Scientific.
- Prasad, A., Netra, P. B., Ranjan, K. D. and Ryuichi, Y. 2016. "Seepage and slope stability modelling of rainfall-induced slope failures in topographic hollows". *Geomat., Nat. Hazards Risk*, 7(2): 721-746.
- Rahimi, A., Rahardjo, H. and Leong, E. 2011. "Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 137(5): 483-491.
- Richards, L. A. 1931. "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *J. Appl. Phys.*, 1: 318-333.

- Soren, K., Budi, G. and Sen, P. 2014. "Stability analysis of open pit slope by finite difference method". *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 3(5): 326-334.
- Sutejoa, Y. and Gofara, N. 2015. "Effect of area development on the stability of cut slopes". *Proc. Eng.*, 125: 331-337.
- Van Genuchten, M. T. 1986. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. and Yates, S. R. 1991. "The retc code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils". U. S. Environmental Protection Agency, EPA/600/2-91/065, Washington, D. C.
- Xue, K., Ajmera, B., Tiwari, B. and Hu, Y. 2016. "Effect of long duration rainstorm on stability of red-clay slopes." *Geoenviron. Disas.*, 3(12): 1-13.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W. 1975. "Associated and non-associated viscoelasticity in soil mechanics". *Geotech.*, 25: 671-689.