

## تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک‌برداری شده غیراشباع در اثر نفوذ آب باران در مسیر احداث کانال‌های آبیاری (مطالعه موردی کانال اصلی خداآفرین)

دانش ستاری<sup>۱\*</sup>، مسعود حاجی‌علیلوی بناب<sup>۲</sup> و اکبر عرب‌پور جوادی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به‌ترتیب: دانشجوی دکتری مهندسی عمران-ژئوتکنیک؛ و استاد گروه مهندسی خاک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
۳- استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه اکستر، اکستر، انگلستان  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱

### چکیده:

ناپایداری شیروانی‌های غیراشباع در اثر بارندگی، یکی از مهم‌ترین رویدادهای طبیعی است که معمولاً به‌هنگام بارندگی یا پس از آن روی می‌دهد. بسیاری از تپه‌های خاکی و دامنه‌های کوه برای احداث زیرساخت‌ها و پروژه‌های بزرگ از جمله احداث کانال‌های آبیاری خاک‌برداری می‌شوند. در این تحقیق تأثیر نفوذ آب باران بر پایداری یکی از بحرانی‌ترین شیروانی‌های غیراشباع ایجاد شده برای احداث کانال اصلی شبکه آبیاری و زهکشی خداآفرین در محدوده دشت مغان بررسی شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده شیروانی، ضمن حفاری و اخذ نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده، با آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی تعیین گردید. برای ارزیابی تأثیر بارندگی در پایداری شیروانی، از مقادیر توزیع ماهانه بارش منطقه مغان استفاده شد. برای به‌دست آوردن پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی، از نرم‌افزار RETC استفاده گردید. پس از تهیه مدل، اثر نفوذ آب باران بر فشار آب منفذی، درجه اشباع خاک، تغییر شکل و تغییرات کرنش برشی در مدت بارندگی تحلیل شد. برای ارزیابی پایداری شیروانی نیز از روش کاهش مقاومت برشی استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد نفوذ آب باران در شیروانی‌های غیراشباع ایجاد شده در خاک‌های ریزدانه با نفوذپذیری کم، در کوتاه‌مدت تأثیر چندانی ندارد ولی با گذشت زمان و طولانی‌تر شدن مدت زمان بارندگی، ناپایداری شروع می‌شود و پس از حدود ۸۰ روز از بارش‌های اعمال شده ضریب اطمینان به کمتر از یک می‌رسد و شیروانی به‌طور کامل گسیخته می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پایداری شیروانی‌های از جنس ریزدانه در برابر بارندگی‌ها، باید برای بارش‌های با مدت زمان طولانی بررسی شود.

### واژه‌های کلیدی

فشار آب منفذی، کاهش مقاومت برشی، منحنی مشخصه رطوبت، RETC - FLAC 2D

### مقدمه

کلاسیک (دو حالت حدی خشک و اشباع) استوار بوده است؛ اما در طبیعت عمدتاً خاک‌ها غیراشباع‌اند. ناپایداری شیروانی‌های غیراشباع می‌تواند به عوامل مختلفی مانند زمین‌شناسی، توپوگرافی، شرایط هیدروژئولوژیکی، مشخصات مصالح و فعالیت‌های

یکی از مسائل مهم در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی است. تا کنون مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته که اغلب آنها بر پایه اصول مکانیک خاک

شیروانی‌ها در خلال بارندگی دارند. همچنین، با مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و نتایج آماری نشان دادند که روش المان محدود برای ارزیابی پایداری شیروانی‌های خاکی غیراشباع نتایج قابل‌قبولی ارائه می‌دهد. رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2011) با استفاده از روش عددی و سه الگوی بارندگی، تأثیر الگوی بارندگی بر پایداری شیروانی‌های غیراشباع را بر دو شیروانی با نفوذپذیری متفاوت بررسی کردند و نشان دادند بارندگی‌های با مدت‌زمان زیاد بر پایداری هر دو شیروانی تأثیر دارد با این‌حال پایداری شیروانی از جنس خاک با نفوذپذیری پایین بیشتر از پایداری شیروانی از جنس خاک با نفوذپذیری بالا، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این پژوهشگران از نرم‌افزار SLOPE/W, SEEP/W برای تحلیل‌های عددی استفاده کردند این نرم‌افزار از روش تعادل حدی مورگنستون-پرایس، اسپنسر، بیشاپ، جانبو و غیره برای تحلیل پایداری شیب استفاده می‌کند. لی و لی (Liu & Liu, 2012) یک شیروانی غیراشباع را با استفاده از روش‌های تعادل حدی و روش عددی المان محدود تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده را مقایسه کردند؛ بر اساس این تحقیقات، نتایج این دو روش قابل‌قبول و تقریباً یکسان است. از سوی دیگر، تأثیر شدت بارندگی‌ها و درجه اشباع اولیه خاک در پایداری شیروانی‌های غیراشباع با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی و نشان داده شد که در بارش‌های رگباری، ناپایداری در شیروانی‌های با درجات اشباع مختلف در مدت‌زمان نسبتاً مشابه رخ داده است. درحالی‌که برای بارش‌های با شدت کم و طولانی‌مدت، تغییرات فشار آب منفذی معنی‌دار است و رطوبت اولیه بیشتر خاک باعث افزایش سریع فشار آب منفذی و در نتیجه کاهش ضریب اطمینان پایداری شیروانی و درنهایت احتمال خرابی زودتر آن

بشری بستگی داشته باشد. بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ناپایداری شیروانی‌های خاکی، نفوذ آب و تغییر در میزان آب موجود در فضاها خالی بین دانه‌های جامد آن است. یکی از عوامل مهم و طبیعی که باعث نفوذ آب و تغییر در شرایط غیراشباع خاک می‌شود آب ناشی از بارش باران است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که ناپایداری شیروانی‌های طبیعی یا ایجاد شده برای احداث زیرساخت‌ها، عمدتاً به هنگام بارندگی یا بعد از آن روی می‌دهد. در اثر بارندگی و نفوذ آب باران در داخل خاک غیراشباع، چسبندگی ظاهری و مقاومت برشی تأمین‌شده با مکش ماتریک کاهش می‌یابد و در نتیجه ناپایداری شیروانی اتفاق می‌افتد. بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای برای تحقیق می‌توان جمع‌بندی کرد که در سال‌های اخیر در زمینه روند نفوذ و حرکت آب باران در شیروانی‌های غیراشباع و تأثیر آن بر مقاومت برشی و پایداری آنها مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته ولی عمده مطالعات برای بارش‌های با شدت بالا در مدت‌زمان کم بوده است، درحالی‌که ناپایداری بعضی از شیروانی‌ها در بارش‌های با مدت‌زمان زیاد و حتی پس از بارندگی‌ها اتفاق افتاده‌اند. علاوه بر تحقیقات صحرایی و مدل‌سازی‌های فیزیکی، روش‌های عددی برای حل مسائل پیچیده خاک‌های غیراشباع در چهارچوب تئوری‌های علمی مختلف توسعه داده شده است.

فی و کیزو (Fei & Keizo, 2004) با مطالعات گسترده‌شان در خصوص تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی‌های غیراشباع با روش عددی المان محدود، نشان دادند خصوصیات هیدرولیکی، شدت و مدت‌زمان بارش و شرایط مرزی، تأثیر معنی‌داری بر تغییرات فشار آب حفره‌ای و در نتیجه پایداری

کونر و همکاران (Koner & Chakravarty, 2016) تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی خاک‌برداری شده را با استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC 2D مطالعه کردند و نشان دادند ضریب اطمینان برای شیروانی با شیب بالاتر از ۳۰ درجه، برای سه نوع از مصالح خاکی به کمتر از ۱/۵ کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت زاویه شیب شیروانی کمتر از ۳۰ درجه برای پایداری طولانی‌مدت شیروانی غیراشباع از نظر تأثیر بارندگی بی‌خطر است.

با بررسی نتایج تحقیقات قبلی مشخص می‌گردد شیروانی‌های در نظر گرفته شده در مطالعات عمدتاً طبیعی با هندسه ساده بوده‌اند و در تحلیل‌ها نیز تحلیل جریان آب در شیروانی غیراشباع، تحلیل تنش- کرنش و تحلیل پایداری مستقل از هم بوده است. نقطه ضعف مطالعات گذشته، در نظر نگرفتن تأثیر هم‌زمانی این‌ها در پایداری کلی شیروانی است و نرم‌افزارهای استفاده‌شده و کدهای تهیه‌شده توانایی تحلیل همبسته تغییر شکل- نفوذ آب در خاک غیراشباع را ندارند و در تحلیل پایداری، تأثیر تغییر شکل‌های ایجاد شده در اثر حرکت آب را مدل نمی‌کنند. در این مقاله، علاوه بر در نظر گرفتن شرایط نتایج مطالعات گذشته، پایداری شیروانی خاک‌برداری شده، با در نظر گرفتن تحلیل همبسته تراوش- تغییر شکل، بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از مشخصات مواد و مصالح ترانسه‌احداث شده در مسیر کانال اصلی شبکه آبیاری و زهکشی خداآفرین و روش عددی تفاضل محدود و تحلیل همبسته جریان- تغییر شکل در بررسی ناپایداری شیروانی غیراشباع استفاده شده

می‌شود (Mukhlisin & Taha, 2012). ژنگ و همکاران (Zheng *et al.*, 2013) رفتار خاکریز غیراشباع کنار رودخانه را در اثر بالا آمدن سطح آب رودخانه با استفاده از تئوری خاک‌های غیراشباع مدل کردند. برای این کار از روش عددی تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC2D برای مدل‌سازی رفتار خاکریز و نحوه حرکت آب در خاک غیراشباع استفاده کردند. نتایج مطالعات نشان داد بیشترین تغییر شکل خاکریز در اثر بالا آمدن آب رودخانه تقریباً در عمق میانی خاکریز اتفاق افتاده است. علی و همکاران (Ali *et al.*, 2014) تأثیر شرایط مرزی ناشی از بارندگی را در پایداری شیروانی‌ها مطالعه کردند. در این تحقیق، آنها از روش‌های عددی برای بررسی تأثیر شدت بارش، مکانیسم گسیختگی، مدت‌زمان لازم برای ناپایداری و عمق گسیختگی، برای مرزهای کاملاً زهکشی شده، جزئی زهکشی شده<sup>۱</sup> و نفوذناپذیر استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شرایط مرزی از نظر زهکشی می‌تواند به میزان قابل‌توجهی روی وقوع و عمق زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی تأثیر داشته باشد. شوی و همکاران (Xue, *et al.*, 2016) با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geostudio تأثیر مدت‌زمان بارش‌های شدید بر رفتار شیروانی‌های از جنس خاک رس قرمز را تحلیل کردند و به این نتیجه دست یافتند که با طولانی‌تر شدن مدت‌زمان بارش، فشار آب منفذی بیشتر، سطح آب بالاتر، مکش ماتریک کمتر و در نتیجه ناپایداری شیروانی بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده کردند پس از بارش‌های شدید کوتاه‌مدت، نشست در سطح شیروانی رخ می‌دهد ولی به ناپایداری کلی نمی‌انجامد. ضریب اطمینان در طول بارش نیز محاسبه گردید، نتایج از نظر روند افزایش و کاهش مشابه با تغییرات فشار آب منفذی بوده است.

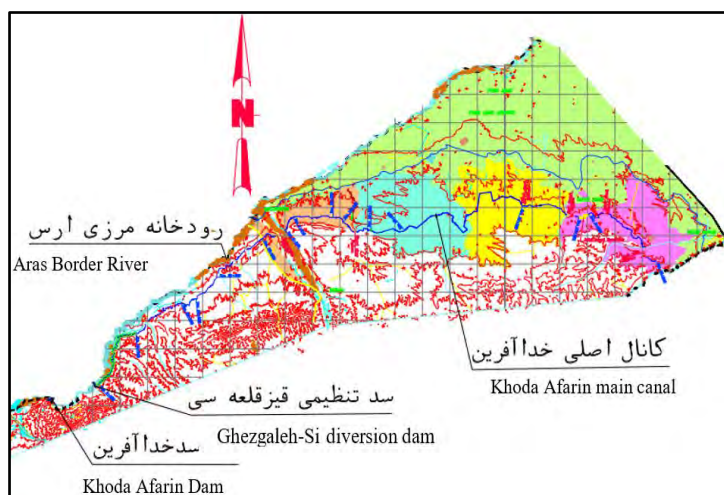
مرزی ارس احداث شده است. شکل ۱ شمای کلی اجزای طرح سد و شبکه آبیاری و زهکشی، توپوگرافی و مسیر کانال اصلی خداآفرین را نشان می‌دهد.

با توجه به توپوگرافی محدوده طرح، برای اجرای کانال اصلی و تأسیسات وابسته به آن نیاز به خاک‌برداری و ایجاد ترانشه‌های خاکی است. پایداری شیروانی‌های خاکی ایجاد شده در اثر خاک‌برداری، به‌منظور اجرای کانال و بهره‌برداری اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به نتایج حفاری‌ها در مسیر کانال اصلی، سطح آب زیرزمینی خیلی پایین‌تر از خط پروژه است، در نتیجه شیروانی‌های خاکی ایجاد شده غیراشباع هستند و بررسی پایداری آنها مستلزم آن است که از منظر تئوری خاک‌های غیراشباع بررسی شوند.

است. در اینجا مشخصات شبکه آبیاری و زهکشی خداآفرین و متدولوژی به کار گرفته‌شده در این تحقیق به‌طور خلاصه توضیح داده می‌شود.

### مشخصات طرح سد و شبکه آبیاری و زهکشی خداآفرین

طرح سد و شبکه آبیاری و زهکشی خداآفرین یکی از بزرگ‌ترین طرح‌های توسعه منابع آبی در شمال غربی کشور است که در محدوده جغرافیایی دو استان آذربایجان شرقی و اردبیل احداث می‌شود. مساحت اراضی کشاورزی این طرح ۷۴۰۰۰ هکتار و طول کانال اصلی آن ۱۴۴ کیلومتر است که از محل سد تنظیمی قیزقلعه‌سی شروع می‌شود و تا منطقه بیله‌سوار ادامه می‌یابد. منبع تأمین آب شبکه مذکور از سد خداآفرین است که روی رودخانه

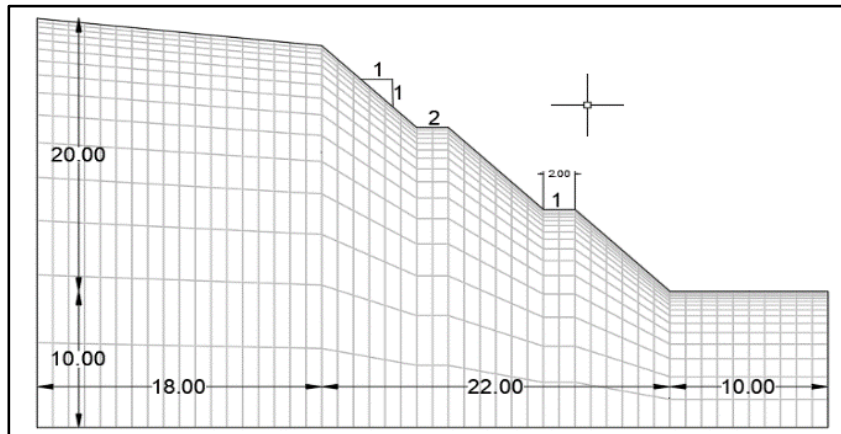


شکل ۱- توپوگرافی، موقعیت طرح سد و شبکه آبیاری و زهکشی و مسیر کانال اصلی خداآفرین

Fig. 1-General scheme of components of Khoda Afarin project, topography, and main canal

است و در هر ۶ متر ارتفاع دارای یک برم به عرض ۲ متر است. ارتفاع کل ترانشه ایجاد شده در بحرانی‌ترین مقطع به بیش از ۲۰ متر می‌رسد. شکل ۲ مشخص‌بندی شیروانی خاک‌برداری شده و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.

یکی از بحرانی‌ترین شیروانی‌های ایجاد شده در مسیر کانال اصلی، شیروانی ایجاد شده در ترانشه محل اجرای کندوپوش گلمالی است که در سال ۱۳۹۵ خاک‌برداری شده است. با توجه به مقطع عرضی کانال در محدوده مورد مطالعه، شیب شیروانی‌ها نسبت به افق ۴۵ درجه



شکل ۲- مقطع شیروانی خاک برداری شده و مش بندی آن در نرم افزار

Fig. 2-The geometry of slope for simulations

تئوری حرکت آب باران در خاک غیراشباع به صورت جریان گذرا  
 جریان آب در خاک غیراشباع مثل جریان آب در خاک اشباع با قانون دارسی توصیف می شود ولی ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت غیراشباع تابعی از درصد رطوبت و مکش خاک است. معادله های حاکم بر جریان آب متغیر (گذرا) در یک المان غیراشباع با معادله ریچاردز (Richards, 1931) به صورت رابطه ۱ بیان می شود.

که در آن،  
 $h$  = هد فشار یا هد مکش؛  $H$  = هد کل ناشی از مکش به علاوه ارتفاع از سطح مبنا؛  $k(h)$  = تابع هدایت هیدرولیکی خاک در جهت های مختلف وابسته به مقادیر مکش و  $\theta(h)$  = رطوبت حجمی وابسته مقادیر مکش. برای حل دقیق رابطه بالا باید دو تابع تغییرات رطوبت حجمی<sup>۱</sup> و تغییرات هدایت هیدرولیکی<sup>۲</sup> در مقابل تغییرات مکش حل شود (Van Genuchten, 1986).

که در آنها،  
 $u_w$  = فشار آب منفذی؛  $u_a$  = فشار هوای منفذی؛  $\theta_s, \theta_r$  = رطوبت حجمی خاک به ترتیب در حالت های باقیمانده و اشباع؛  $\alpha$  = پارامتر نشان دهنده مکش ورودی هوا؛  $n$  = پارامتر اندازه حفره های خاک؛  $k_s$  = ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^{1-1/n} \quad (2)$$

$$\nabla k(h) \cdot \nabla H = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \quad (1)$$

$$k = k_s \frac{[1 - \{\alpha(u_a - u_w)\}^{(n-1)} \cdot [1 + \alpha(u_a - u_w)\}^n]^{1/n-1}}{[(1 + \alpha(u_a - u_w)\}^n)^{\frac{1}{2} \cdot \frac{n}{2}}]} \quad (3)$$

متدولوژی تحلیل پایداری شیروانی غیراشباع در اثر نفوذ آب ناشی از بارندگی  
 روش تفاضل محدود<sup>۳</sup> یکی از متداول ترین روش های عددی است. FLAC 2D یکی از کاربردی ترین نرم افزارهای ژئوتکنیکی، بر پایه روش تفاضل محدود است و با استفاده از امکانات کدنویسی به زبان برنامه نویسی در نرم افزار (FISH) می توان مسائل

۱- Soil Water Retention Curve (SWRC)  
 ۲- Hydraulic Conductivity Function (HCF)  
 ۳- Finite Difference Method (FDM)

پایداری شیروانی با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی ارزیابی شد. روش کاهش مقاومت برشی برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ ارائه و استفاده شد (Zienkiewicz, et al., 1975) با توسعه روش تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC 2D، این روش به صورت اصلاح‌شده<sup>۱</sup> (MSSR) برای تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی به کار گرفته می‌شود (Soren et al., 2014) در این روش، پارامترهای مقاومتی خاک آن قدر کاهش می‌یابد تا شیروانی در آستانه ناپایداری قرار گیرد از این رو ضریب اطمینان به شکل نسبت بین پارامترهای مقاومت اولیه و پارامترهای مقاومت نهایی بر اساس رابطه<sup>۴</sup> محاسبه می‌شود.

$$C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} C, \quad \phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan\phi\right) \quad (4)$$

ماژول برای مدل‌سازی عددی رفتار خاک‌های غیراشباع مناسب است. در فرمول‌بندی، فرضیه‌های 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. (۳) از تنش مؤثر پیشاب در تشخیص گسیختگی خاک و به دست آوردن تغییر شکل‌های پلاستیک در مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک استفاده می‌شود. علاوه بر فرضیه‌های بالا، مدل همبسته خاک‌های غیراشباع باید معادله تعادل سیال، معادله تعادل حرکت، معادله سازگاری، قانون نفوذپذیری، قانون مکش خاک و قوانین رفتار مکانیکی را برآورد کند (Anon, 2011). در فرمول‌بندی پایه این نرم‌افزار تغییر در تنش مؤثر باعث تغییر شکل می‌شود. هر یک از مدل‌های رفتاری ساخته شده برای محاسبات جریان دوفازی

پیچیده ژئوتکنیکی را مدل‌سازی کرد. چهارچوب کلی مطالعه به این شکل است که در ابتدا مشخصات هندسی، پارامترها و مشخصات مصالح شیروانی با استفاده از آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی استخراج شد و پس از آن میزان بارش‌های بحرانی برای محدوده مورد نظر از روی آمار ایستگاه‌های هواشناسی موجود به دست آمده آمد. سپس، نفوذ آب ناشی از بارندگی در شیروانی با استفاده از جریان دوفازی نرم‌افزار به صورت گذرا مدل‌سازی، تحلیل و بر اساس نتایج آن، تغییرات فشار آب منفذی، تغییرات درجه اشباع خاک و تغییر شکل‌ها، در زمان‌های مختلف محاسبه شد و با فراخوانی مقادیر تنش و فشار آب حفره‌ای در زمان‌هایی مشخص

#### فرمول‌بندی تحلیل همبسته تراوش- تغییر شکل در خاک‌های غیراشباع

در خاک‌های غیراشباع، هرگونه تغییر شکل حجمی باعث ایجاد فشار آب منفذی اضافی و تغییر در درجه اشباع خاک می‌شود. از طرف دیگر، هرگونه تغییر در درجه اشباع می‌تواند به تغییر شکل‌های حجمی بینجامد. برای مدل‌سازی واقعی تأثیر بارش در پایداری شیروانی، تحلیل‌های تراوش و تغییر شکل (تنش- کرنش) به طور هم‌زمان بوده است. برای تحلیل‌های همبسته تراوش-تغییر شکل<sup>۲</sup>، از ماژول جریان دوفازی<sup>۳</sup> (TPFLOW) نرم‌افزار FLAC 2D استفاده شده است. در این ماژول، فرض بر این است که دانه‌های جامد قابل فشرده شدن نیستند و فضای خالی بین دانه‌های جامد با دو سیال غیرقابل انحلال پر شده است. با توجه به ویژگی دانه‌های جامد خاک و پر شدن فضای خالی بین آنها با آب و هوا، این

1- Modified Shear Strength Reduction

3- TPFLOW (Two Phase Flow)

2- Transient Fluid-Mechanical Coupled Calculations

می‌شود. این اثر همبسته اضافی با متغیرهای اضافه مورد توجه این تحقیق قرار گرفته است. سهم گرهی این متغیرها پس از توزیع کرنش‌های حجمی هر زون به گره‌ها محاسبه می‌شود و برای گام بعدی با مقادیر جدید تحلیل‌ها ادامه می‌یابد. میزان افزایش کرنش حجمی مصالح متخلخل و گرادیان سرعت از رابطه سازگاری ۸ برآورد می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

### صحت‌سنجی کدهای تهیه‌شده در مدل‌سازی عددی

برای صحت‌سنجی کدهای تهیه‌شده، از نتایج مدل فیزیکی ساخته‌شده برای بررسی پایداری شیروانی خاکی از جنس ماسه سیلت‌دار در مقابل بارندگی استفاده‌شده است ( Josifovski et al., 2019). شکل ۳ مدل فیزیکی شیروانی ساخته‌شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات ارائه‌شده در مقاله، مدل عددی شیروانی بالا با استفاده از نرم‌افزار تهیه و تحلیل‌های لازم اجرا شد (شکل ۴). مقایسه نتایج مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی، در نقطه شماره (III) در شکل ۵ نشان داده می‌شود. نتایج به‌دست آمده صحت عملکرد مدل عددی را نشان می‌دهد.

(دو سیال) را می‌توان برای مدل‌سازی همبسته تراوش-تغییر شکل استفاده کرد. در این مازول پاسخ افزایش تنش مؤثر برای مصالح متخلخل با استفاده از رابطه ۵ بیان می‌شود (Anon, 2011).

$$\Delta \sigma'_{ij} = H(\sigma_{ij}, \Delta \epsilon_j, k) \quad (5)$$

که در آن،

$\Delta \sigma'_{ij}$  = تغییر در تنش مؤثر؛ و تابع  $H$  بیان‌کننده قانون رفتار مکانیکی مصالح است. برای جریان دوفازی، تغییرات در تنش مؤثر از رابطه ۶ به‌دست آمده است (Dangla, 1999).

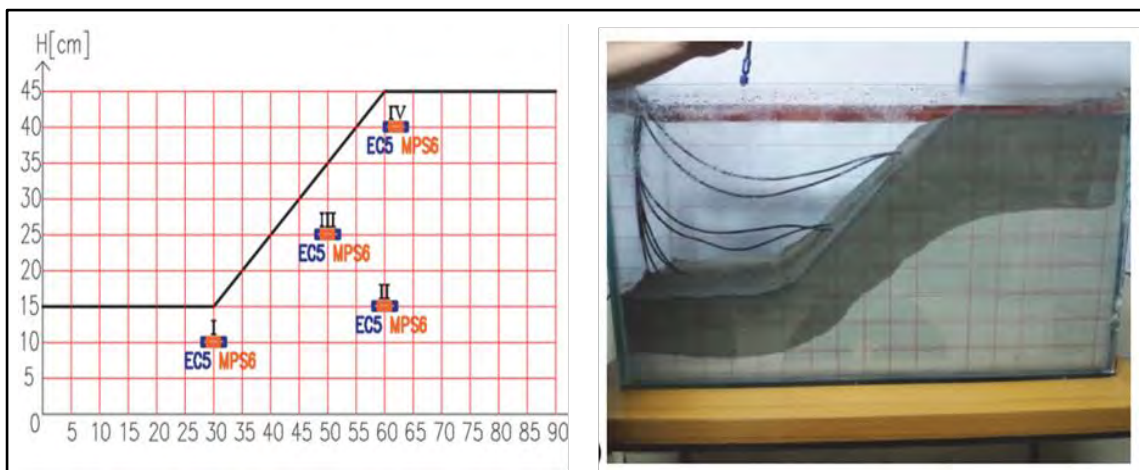
$$\Delta \sigma'_{ij} = \Delta \sigma_{ij} + \overline{\Delta P} \delta_{ij} \quad (6)$$

که در آن،

$$\overline{\Delta P} = S_w \cdot \Delta P_w + S_g \cdot \Delta P_g \quad (7)$$

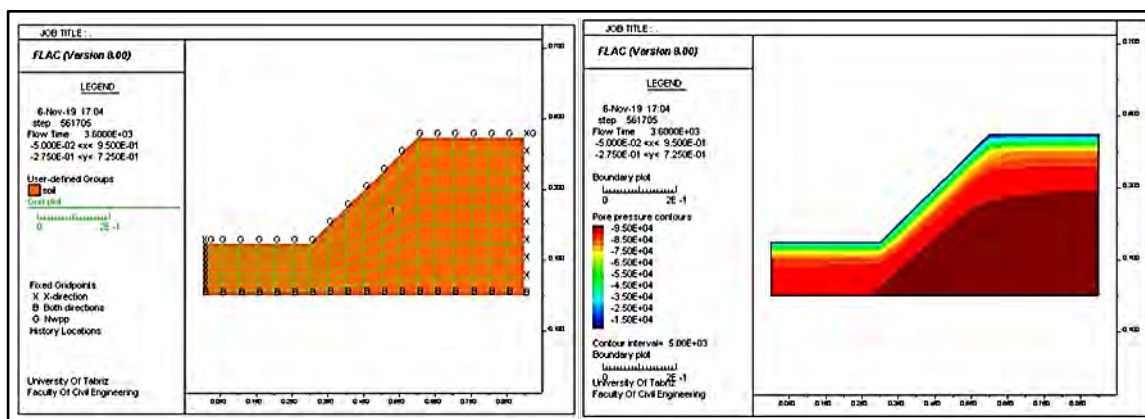
همان‌طور که از رابطه بالا قابل‌درک است، اگر تنش کل ثابت باشد، تغییر شکل فقط در صورت تغییر در فشار سیال منفذی رخ می‌دهد. برای مدل‌های رفتاری دارای پلاستیسیته، تنش مؤثر پیشاب،  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \overline{P} \delta_{ij}$ ، برای تعیین گسیختگی استفاده می‌شود که در آن  $\overline{P} = S_w \cdot P_w + S_g \cdot P_g$ .

در محاسبات همبسته هیدرومکانیکی گذرا (متغیر وابسته به زمان)، تغییر شکل حجمی باعث ایجاد فشار سیال منفذی و تغییر در درجه اشباع



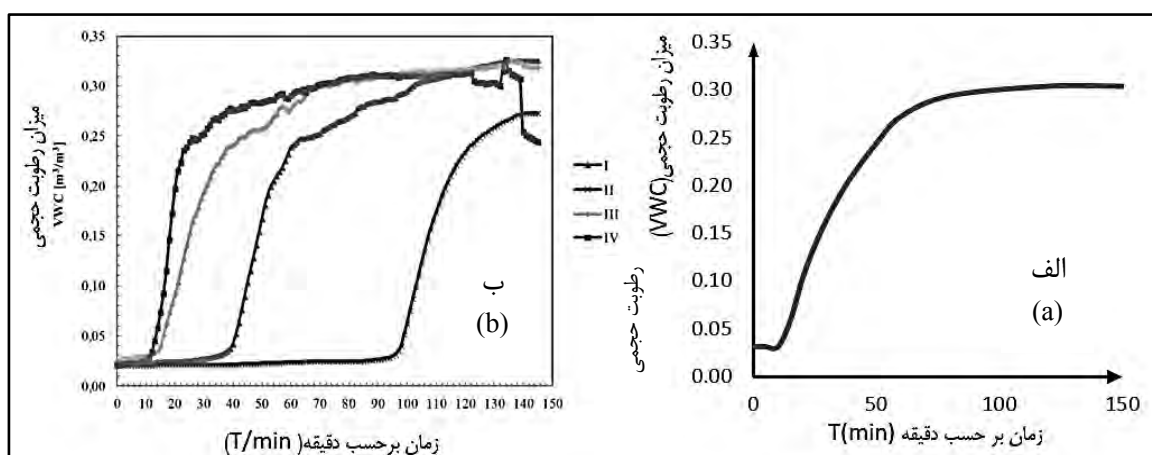
شکل ۳- مدل فیزیکی آزمایشگاهی شیروانی خاکی تحت تأثیر بارش باران (Josifovski et al., 2019)

Fig. 3- Physical model of slope under the rainfall (Josifovski et al., 2019)



شکل ۴- مدل عددی شیروانی و نتایج آن در نرم‌افزار FLAC2D

Fig. 4- Numerical model and water saturation distribution contours



شکل ۵- مقایسه الف) نتایج به‌دست آمده از آنالیز عددی و ب) نتایج اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی در نقطه (III)

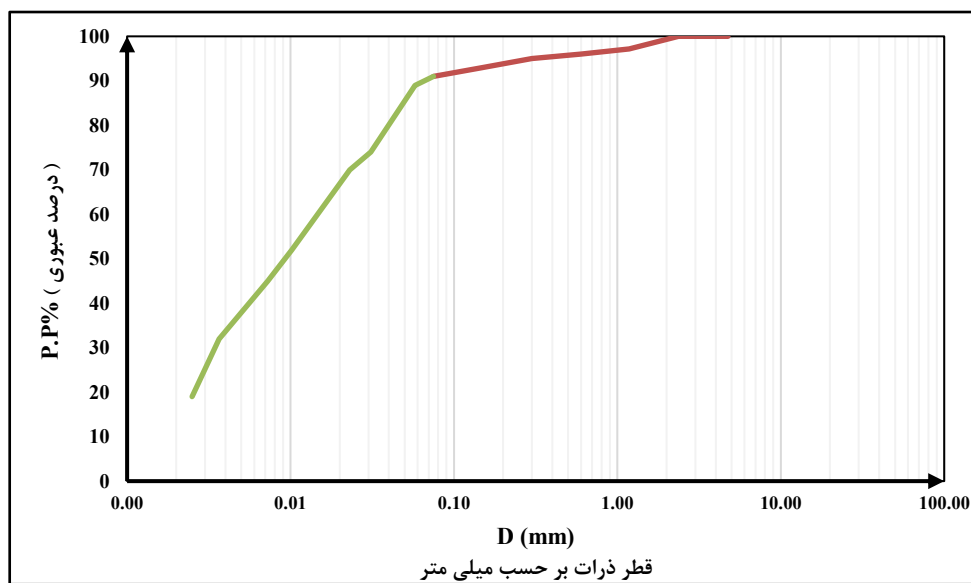
Fig. 5-a) The numerical model analysis result vs and b) the physical model in point (III)



اخذ شده از گمانه‌های ماشینی و چاهک‌های دستی استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، بافت خاک تا عمق مورد مطالعه نسبتاً یکسان و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، رس با خاصیت خمیری پایین (CL) طبقه‌بندی می‌شود. شکل ۶ منحنی دانه‌بندی مصالح خاکی شیروانی را نشان می‌دهد.

### پارامترها و مشخصات شیروانی خاکی و بارندگی استفاده‌شده در تحلیل‌ها

برای به‌دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی مصالح خاکی شیروانی از جمله وزن مخصوص، دانه‌بندی، رطوبت اولیه، چگالی (دانسیته) نسبی، نفوذپذیری و خواص خمیری از نتایج نمونه‌های

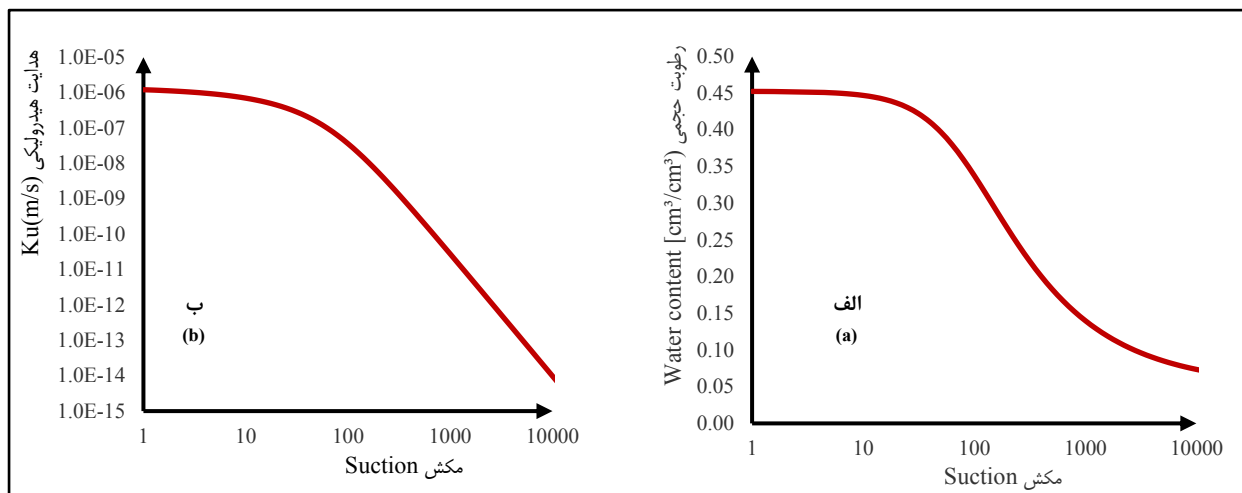


شکل ۶- منحنی دانه‌بندی مصالح شیروانی

Fig. 6- Grain-size distribution of slope material

مصنوعی، پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع را به روش ون- گنوختن ارائه می‌دهد. شکل ۷ منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی مصالح شیروانی را نشان می‌دهد.

به‌منظور استخراج پارامترهای موردنیاز برای منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی مصالح خاکی شیروانی، از نرم‌افزار RETC استفاده‌شده است. این نرم‌افزار بر اساس منحنی دانه‌بندی مصالح و به‌کارگیری هوش



شکل ۷- الف) منحنی مشخصه رطوبتی و ب) منحنی هدایت هیدرولیکی  
 Fig. 7- a) SWCC and b) HCF of Slope Material

بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و نمودارهای شکل ۷ مقادیر پارامترهای استفاده از نرم‌افزار RETC و استخراج پارامترهای ون-گنوختن (Van Genuchten, 1991) از ارائه می‌شود.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای خاک غیراشباع شیروانی مورد تحقیق

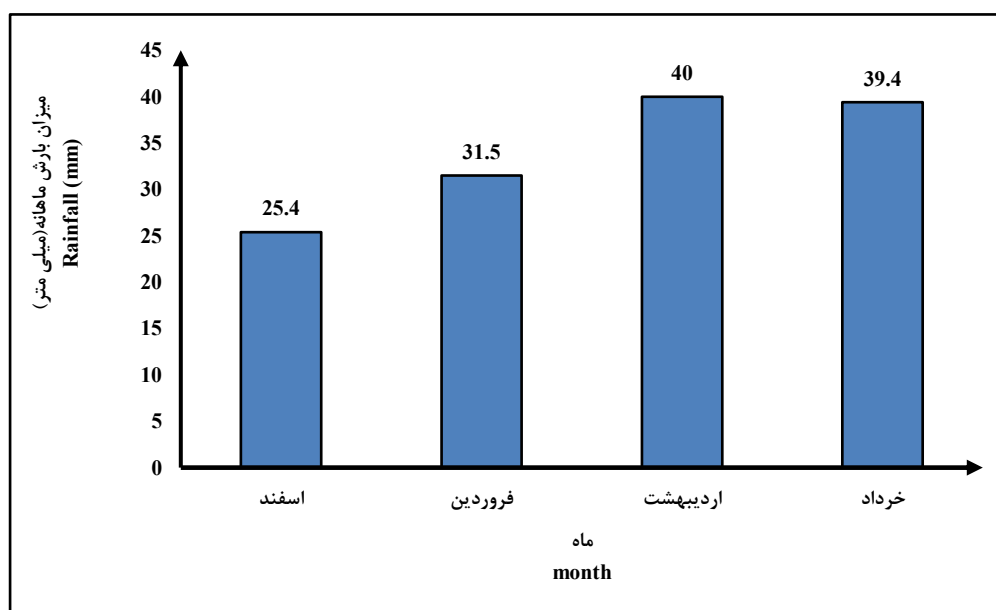
Table 1-Parameters of slope material for numerical analysis

مقدار value	واحد Unit	پارامتر parameter
19.10	کیلو نیوتن بر مترمکعب KN/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص $\gamma_{sat}$
100	مگا پاسکال Mpa	مدول برشی G
8340	پاسکال Pa	چسبندگی زهکشی شده C
1.42e-6	متر بر ثانیه m/s	ضریب هدایت هیدرولیکی $k_s$
27.4	درجه degree	زاویه اصطکاک داخلی خاک $\phi$
0.453	-	رطوبت حجمی اشباع $\theta_s$
0.05	-	رطوبت حجمی باقیمانده $\theta_r$
1.282	-	پارامتر ون- گنوختن $\alpha$
1.585	-	پارامتر ون- گنوختن n

بر اساس اطلاعات موجود در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه، برای محدوده موردنظر بارش متوسط سالانه و نمودار بارش محتمل با دوره بازگشت ۵۰ ساله تهیه گردید. با توجه به اینکه

اعمال شده است. پس از آن، بحرانی‌ترین محدوده زمانی برای اجرای کار از نظر بارندگی، برای چهار ماه بحرانی سال انتخاب شد که در شکل ۸ میزان بارش چهار ماه بحرانی سال برحسب میلی‌متر بر ماه، نشان داده می‌شود.

خاک برداری محدوده کندوپوش شش ماه و برنامه زمان بندی اجرای سازه کالورت پس از خاک برداری کامل در محل کندوپوش، چهار ماه در نظر گرفته شده بود، برای رسیدن به شرایط اولیه از نظر رطوبتی و درجه اشباع، شدت بارش متوسط سالانه (۲۸۸ میلی‌متر) به مدت شش ماه به شیروانی



شکل ۸- مقادیر بارش ماهانه بر حسب میلی‌متر برای چهار ماه بحرانی سال

Fig. 8- Monthly precipitation values for critical 4 months

فشار آب منفذی، جابه‌جایی، کرنش برشی استخراج و بررسی گردید. در انتهای هر ماه و پس از استخراج نتایج تراوش- تغییر شکل، تحلیل پایداری شیروانی اجرا و در جمع بندی مقاله به بحث گذاشته شد. خلاصه اطلاعات بارش‌ها و تحلیل‌ها در خلال تحقیق در شکل ۹ ارائه شده است.

## نتایج و بحث

مدل عددی شیروانی خاک برداری شده در مسیر احداث کانال اصلی خداآفرین در نرم افزار FLAC 2D کدنویسی شد. بارش‌های انتخاب شده به شیروانی اعمال و تحلیل‌های همبسته تراوش- تغییر شکل آماده شد و در انتهای هر ماه تغییرات درجه اشباع،



شکل ۹- خلاصه اطلاعات بارش‌ها و تحلیل‌ها در تحقیق

Fig. 9. Summary of precipitation and analysis performed in the study

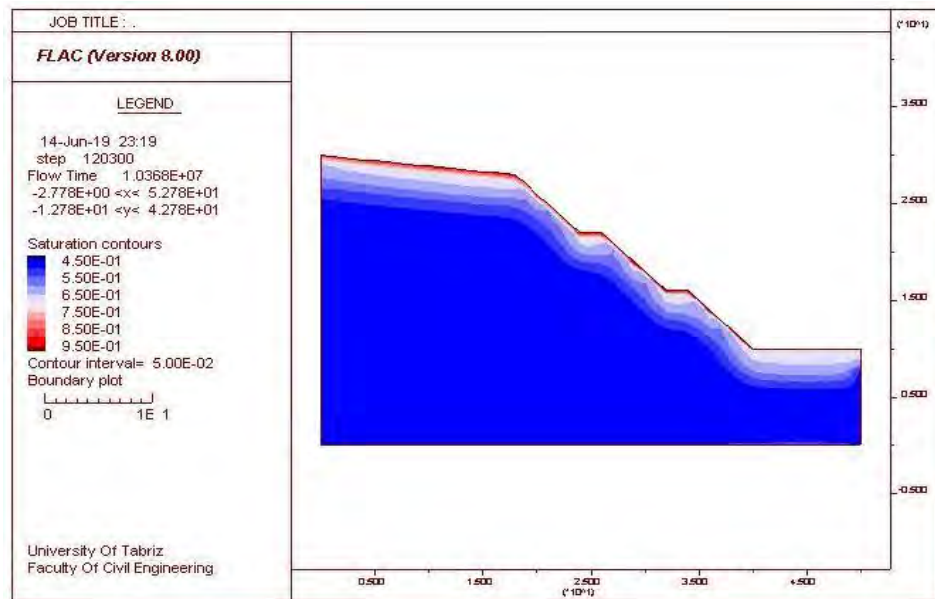
تغییرات درجه اشباع می‌توان گفت که عمق خیس شده شیروانی در اثر بارش چهار ماهه در بیشترین مقدار حدود ۶ متر و تغییرات آن در عمق غیرخطی است، به شکلی که در سطح شیروانی حدود ۹۵ درصد است و تا عمق ۶ متری به تدریج کاهش می‌یابد تا به درجه اشباع اولیه خاک در عمق ۶ متری رسیده و بعد از آن تغییرات عمده‌ای در درجه

بررسی تغییرات درجه اشباع خاک در طول زمان بارندگی

نفوذ آب باران به خاک شیروانی با گذشت زمان، رطوبت خاک و در نتیجه درجه اشباع خاک را بالا می‌برد. در شکل ۱۰ تغییرات درجه اشباع بر حسب درصد در شیروانی مورد مطالعه در انتهای ماه چهارم نشان داده می‌شود. با توجه به بررسی

علاوه بر میزان بارش و رطوبت اولیه خاک بستگی دارد به درجه اشباع، رطوبت اولیه خاک در انتهای تحلیل شرایط اولیه و نفوذپذیری خاک غیراشباع متأثر از درجه اشباع و مکش.

اشباع اتفاق نیفتاده است؛ دلیل آن هم نفوذپذیری نسبتاً پایین خاک شیروانی است. سرانجام می‌توان گفت تغییرات درجه اشباع نسبت به زمان و عمق غیرخطی است و عمق خیس شده و مدت زمان رسیدن به درجه اشباع صد در صد (رطوبت اشباع)،



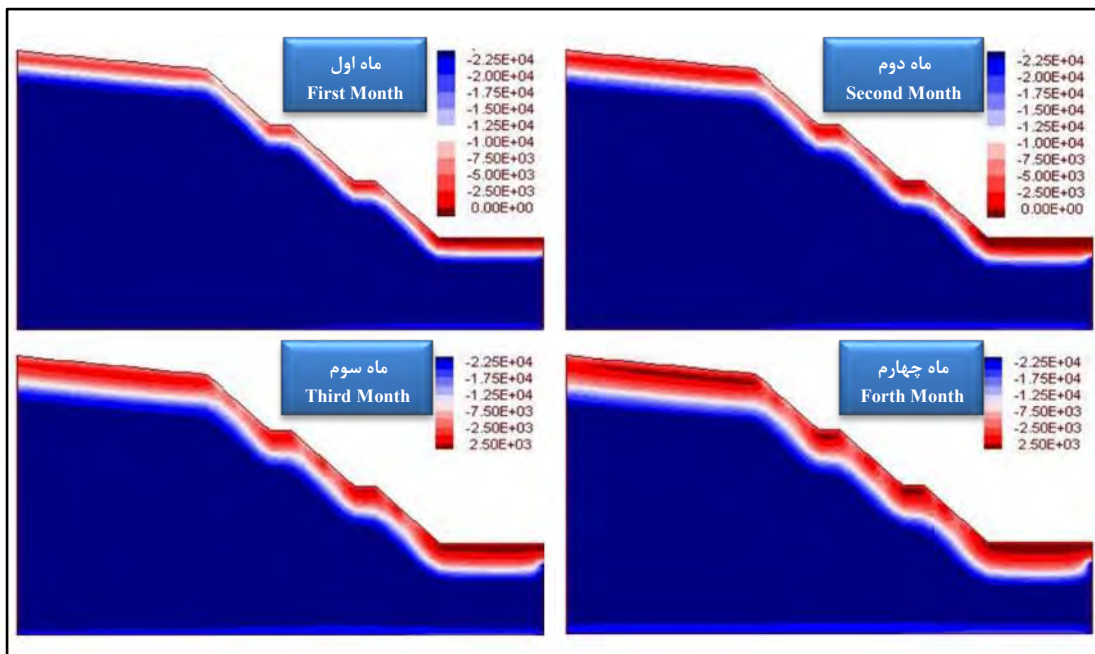
شکل ۱۰- تغییرات درجه اشباع شیروانی در انتهای ماه چهارم

Fig. 10 - Water saturation distribution at the end of 4<sup>th</sup> month

فشار آب منفذی را در انتهای هر ماه برحسب پاسکال نشان می‌دهد. با مقایسه کانتورها می‌توان دریافت که فشار آب منفذی در داخل خاک شیروانی به دلیل نفوذ آب باران با گذشت زمان بیشتر می‌شود ولی به دلیل نفوذپذیری نسبتاً پایین خاک، تغییرات در عمق ۶ متری از سطح شیروانی است و در انتهای ماه چهارم تا عمق ۲ متری فشار آب منفذی مثبت شده به بیش از ۲۵۰۰ پاسکال هم رسیده و مکش خاک و مقاومت برشی ناشی از آن نیز از بین رفته است.

بررسی تغییرات فشار آب منفذی در طول زمان بارندگی

مکش خاک و به تبع آن مقاومت برشی خاک تابع فشار آب منفذی است. در بررسی پایداری شیروانی، تغییرات فشار آب منفذی اهمیت ویژه‌ای دارد و به نوعی تغییرات مکش در داخل شیروانی را نشان می‌دهد. فشار آب منفذی تابع میزان رطوبت و درجه اشباع خاک است و بیشترین تغییرات فشار آب منفذی نیز به تبع تغییرات درجه اشباع، باید در عمق‌های بالایی شیروانی باشد. شکل ۱۱ تغییرات

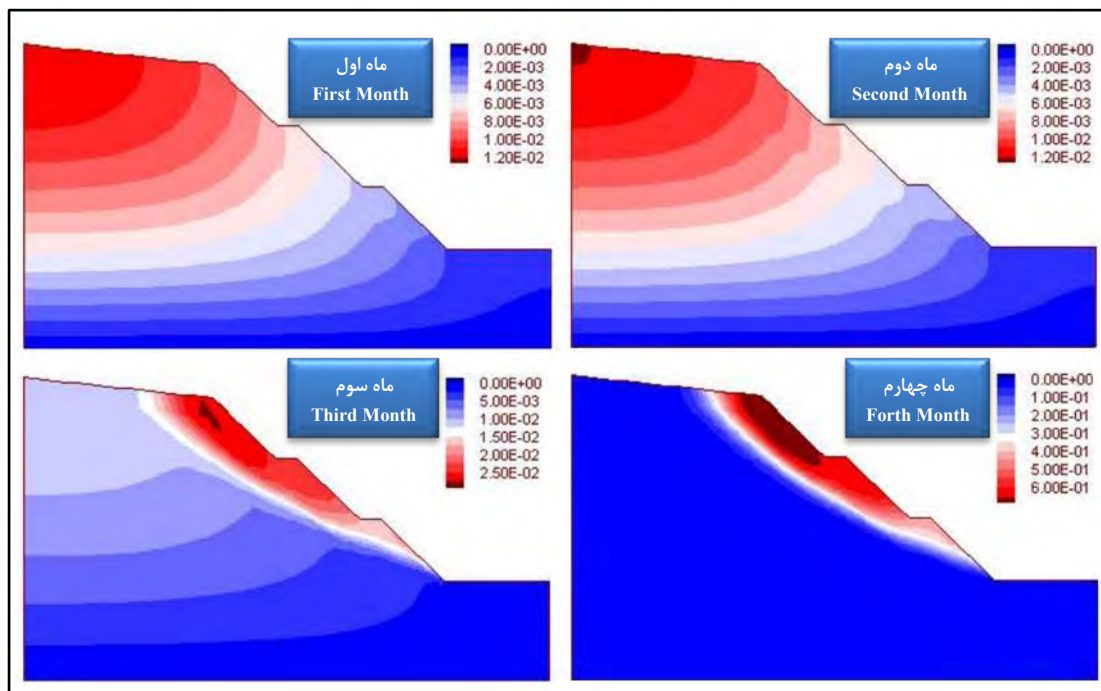


شکل ۱۱- تغییرات فشار آب منفذی شیروانی در انتهای هر ماه (پاسکال)  
 Fig. 11- Distribution of the pore water pressure at the end of 4 month (Pa)

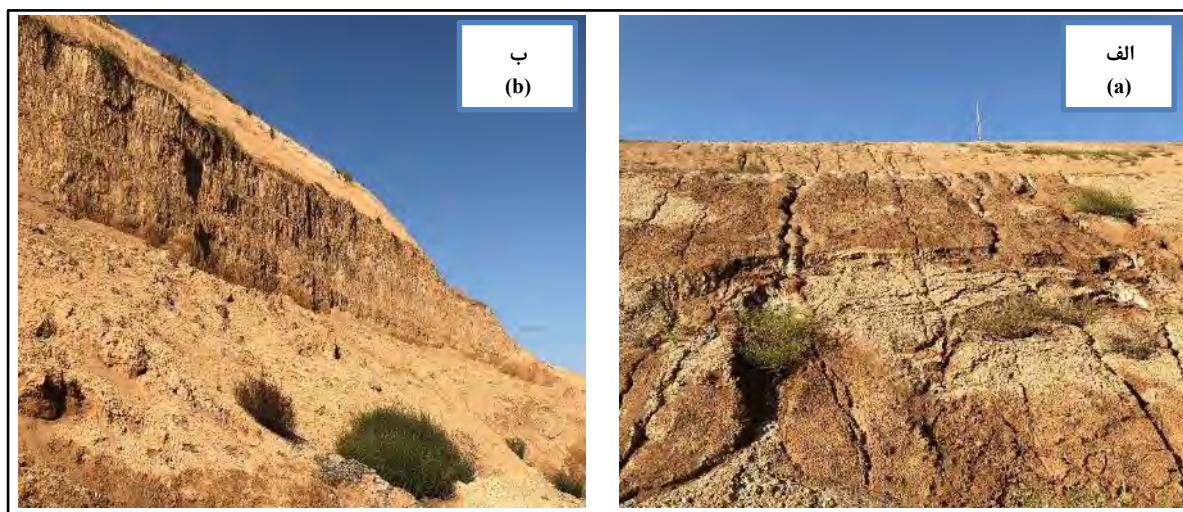
نفوذ آب باران بیشتر، ناپایداری از پنجه برم اول شیروانی به سمت بالا توسعه می‌یابد تا شیروانی به ناپایداری کامل برسد. همچنان که از مقایسه کانتورهای تغییر شکل در انتهای هر ماه مشخص است این ناپایداری در انتهای ماه سوم خود را نشان می‌دهد ولی به دلیل اینکه هنوز به گسیختگی کامل نرسیده بیشترین مقادیر تغییر شکل‌ها در سطح شیروانی حداکثر به ۲/۵ سانتی‌متر رسیده است ولی در ادامه بارش‌ها شیروانی به‌طور کامل گسیخته می‌شود و در انتهای ماه چهارم، تغییر شکل‌ها در تاج شیروانی به بیش از ۵۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. شکل ۱۳-الف تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در سطح شیروانی را نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از تحقیق هم‌خوانی مناسبی دارد.

### بررسی تغییر شکل شیروانی در اثر بارندگی

در اثر نفوذ آب ناشی از بارندگی و تغییرات فشار آب منفذی و مکش ناشی از آن، تنش مؤثر و در نتیجه مقاومت برشی خاک کمتر می‌شود. در اثر نفوذ آب باران و بالا رفتن درجه اشباع خاک، وزن شیروانی نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه کم شدن مقاومت برشی و افزایش وزن شیروانی، تغییر شکل‌هایی در جهت‌های مختلف در شیروانی ایجاد می‌شود. شکل ۱۲ کانتور جابه‌جایی‌های کل (برآیند جابه‌جایی در دو جهت افقی و قائم) ایجاد شده در انتهای هر ماه را نشان می‌دهد. همچنان که از نتایج افزایش فشار آب منفذی و درجه اشباع شیروانی استنباط می‌شود، در اثر وزن شیروانی و تغییرات فشار آب منفذی، تغییر شکل‌ها ابتدا در سطح و قسمت بالایی شیروانی است ولی با گذشت زمان و



شکل ۱۲- تغییر شکل‌های شیروانی در اثر بارندگی بر حسب متر  
Figure 12-Deformation contours at the end of 4 month



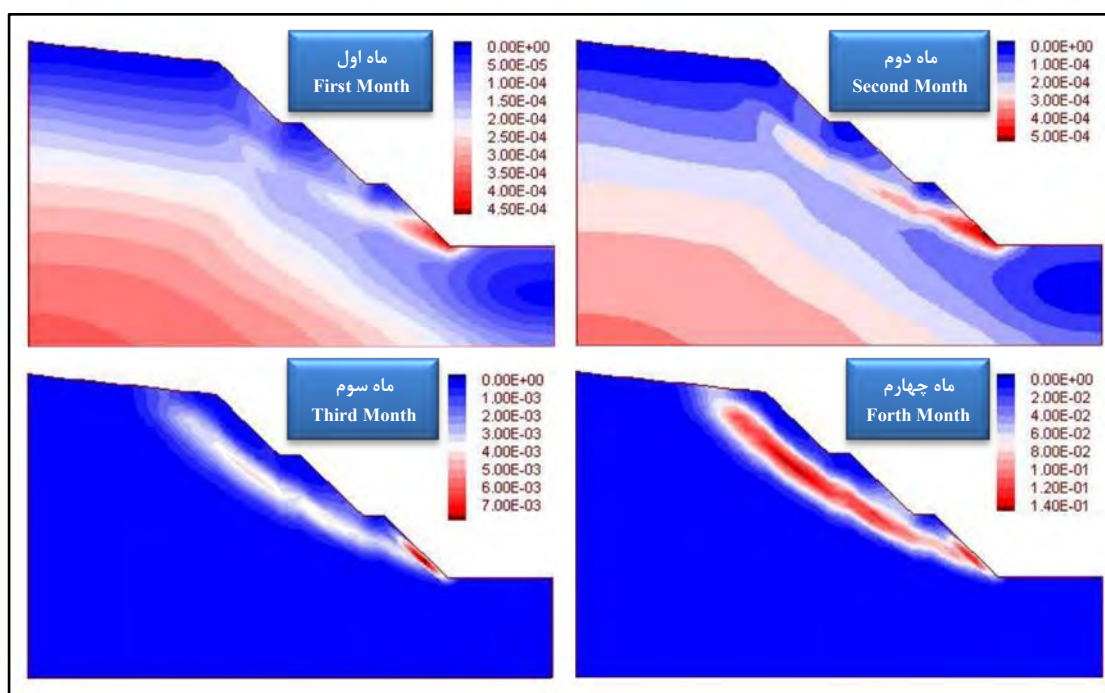
شکل ۱۳- الف) تغییر شکل‌های ایجاد شده در سطح شیروانی و ب) گسیختگی کامل شیروانی  
Fig. 13-a) Slope failure and b) Deformations on the slope surface

گسیختگی برشی ظاهر می‌شود؛ بنابراین، سطح لغزش را می‌توان با جستجوی موقعیت مسیر بیشترین مقدار افزایش کرنش برشی به‌دست آورد. در این تحقیق، علاوه بر بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده در خلال بارندگی، نحوه ایجاد

بررسی تغییرات کرنش برشی در اثر بارندگی در روش تفاضل محدود، افزایش کرنش برشی یک کمیت فیزیکی مرتبط با جابه‌جایی گره‌ها در گوشه هر زون است. در تحلیل پایداری شیروانی‌ها، بیشترین مقدار افزایش کرنش برشی در سطح

تشکیل شده از نوع کم‌عمق است و مسیر لغزش تا عمق حدود ۴ متر می‌رسد. همچنین، قبل از ناپایداری کلی شیروانی، یک لغزش سطحی با عمق کمتر در پنجه برم اول شیروانی اتفاق افتاده است و دلیل اصلی لغزش کلی شیروانی هم می‌تواند در نتیجه وقوع این لغزش و خالی شدن پنجه شیروانی باشد. شکل ۱۳-ب گسیختگی شیروانی در برم اول پس از بارش‌های بهاری سال ۹۶ را نشان می‌دهد که با نتایج تحلیل‌ها همخوانی لازم را دارد.

تغییر شکل‌های برشی با استفاده از معیار افزایش کرنش برشی بررسی گردید. شکل ۱۴ تغییرات کرنش برشی در انتهای هر ماه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج کانتورهای ارائه شده، می‌توان استنباط کرد که تغییر شکل‌های برشی در پنجه شیروانی از انتهای ماه دوم شروع و در انتهای ماه سوم مسیر لغزش شیروانی کامل شده است. بر اساس اطلاعات این شکل مشخص می‌شود به‌رغم اینکه شیروانی مذکور چهار ماه تحت تأثیر بارش بوده است ولی به دلیل پایین بودن نفوذپذیری مصالح، گوه گسیختگی



شکل ۱۴- تغییرات کرنش برشی بر اثر بارندگی

Fig. 14- Shear Strain Increment at the end of 4 month

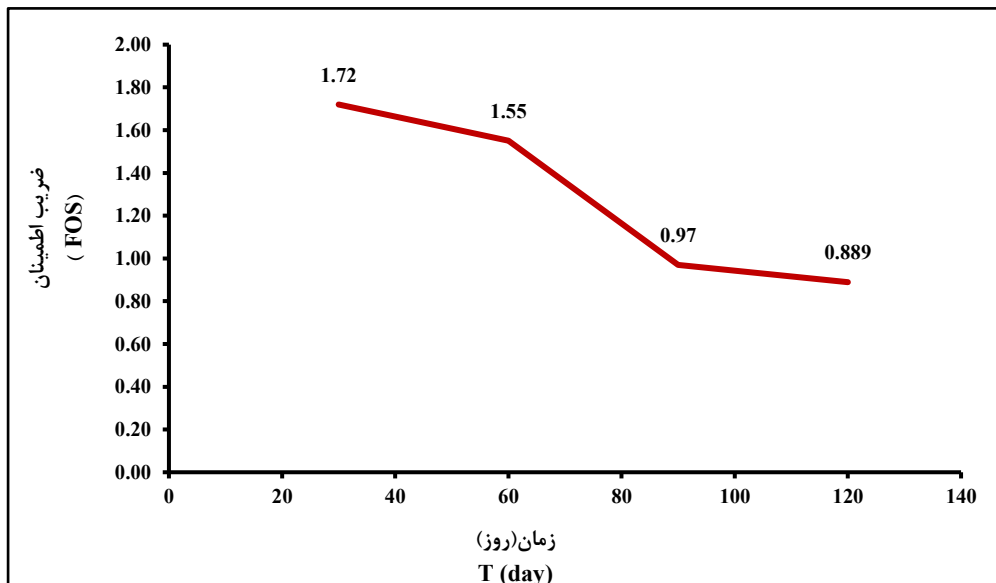
گذشت زمان کاهش می‌یابد ولی برخلاف بیشتر مطالعات، این کاهش در روزهای ابتدایی خیلی ناچیز است به‌نحوی که در انتهای شرایط اولیه مدل (پس از اعمال بارش متوسط سالیانه به مدت شش ماه)، ضریب اطمینان ۱/۷۲ بوده است. این ضریب پس از

تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی در مدت زمان بارش باران شکل ۱۵ تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی را در خلال چهار ماه بارندگی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، ضریب اطمینان با



سرعت پایینی اتفاق افتاده و شیروانی همچنان پایدار بوده است. ولی با گذشت زمان و نفوذ آب باران در عمق‌های بیشتر، بعد از حدود ۸۰ روز، گسیختگی کامل شیروانی از پنجه شیروانی شروع شده است و می‌توان استنباط کرد برای شیروانی‌های از جنس مصالح با نفوذپذیری پایین، بارش‌های با مدت‌زمان طولانی می‌توانند تأثیر بیشتری در ناپایداری آنها داشته باشد تا بارش‌های با مدت‌زمان کمتر و شدت بیشتر.

اعمال بارش‌های چهار ماهه به مقادیر کمتر از یک کاهش پیدا کرده و گسیختگی اتفاق افتاده است. با روند یابی تغییرات ضریب اطمینان می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اطمینان بعد از حدود ۸۰ روز به کمتر از واحد (۱) رسیده و شیروانی ناپایدار شده است. به عبارت دیگر، به‌رغم اینکه مجموع بارش‌ها در انتهای ماه دوم به بیش از ۵۷ میلی‌متر هم رسیده است ولی به دلیل سرعت نفوذ کم آب باران که ناشی از پایین بودن نفوذپذیری مصالح است، تغییرات در مقادیر رطوبت و مکش در عمق با



شکل ۱۵- تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی طی چهار ماه بارندگی

Fig. 15- Factor of safety history for the 4 month

غیرخطی افزایش می‌باید ولی با توجه به نتایج مطالعات پیشین، سرعت و روند افزایش فشار آب منفذی و درجه اشباع، در بارش‌های با شدت زیاد و در مدت‌زمان کوتاه، متفاوت است این افزایش در سطح شیروانی سریع‌تر است ولی با افزایش عمق، سرعت نفوذ آب و در نتیجه تغییرات در فشار آب منفذی طولانی‌تر خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

- شیروانی‌های غیراشباع از مصالح خاکی ریزدانه، در مقایسه با خاک‌های درشت‌دانه، به دلیل نفوذپذیری خیلی پایین از یک‌طرف و مکش خیلی زیاد در رطوبت‌های پایین، از طرف دیگر، رفتار نسبتاً پیچیده‌ای دارند.

- در این شیروانی‌ها نیز فشار آب منفذی و درجه اشباع با افزایش مدت‌زمان بارندگی به‌صورت

کرنش برشی در پنجه شیروانی دیده می‌شود و محل شروع ناپایداری شیروانی نیز از همین جا است.

- ضریب اطمینان با گذشت زمان بارش کمتر می‌شود و پس از حدود ۸۰ روز، ناپایداری شیروانی شروع خواهد شد. دلیل طولانی شدن آن را می‌توان در پایین بودن نفوذپذیری مصالح شیروانی دانست؛ بنابراین، برای شیروانی با نفوذپذیری نسبتاً پایین، مثل شیروانی ایجاد شده در خاک‌های ریزدانه، بارش‌های طولانی‌مدت بیشتر از بارش‌های با شدت زیاد، ولی مدت‌زمان کم، تأثیر دارند.

- با توجه به نتایج مطالعات پیشین در بررسی تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی‌ها، عمده مطالعات بررسی تأثیر بارش‌های با شدت بالا در مدت‌زمان کوتاه بوده است، در شیروانی‌های از بافت ریزدانه به دلیل پایین بودن نفوذپذیری مصالح، بارش‌های با شدت بالا در مدت‌زمان کوتاه فرصت نفوذ پیدا نمی‌کنند و به شکل رواناب در سطح شیروانی حرکت می‌کنند بنابراین در بررسی تأثیر بارندگی بر پایداری شیروانی‌های از بافت ریزدانه، بایستی پایداری برای بارش‌های با شدت متوسط در مدت‌زمان طولانی بررسی گردند.

- بیشترین مقادیر فشار آب منفذی و درجه اشباع خاک در نزدیکی سطح شیروانی قرار دارد و با افزایش شدت و مدت‌زمان بارندگی افزایش می‌یابد تا به اشباع کامل برسد. در اثر بارش‌های چهار ماهه، جبهه خیس شده حدود ۶ متر بوده است و بیشترین تأثیر بارندگی که باعث از بین رفتن مکش در خاک شده است تا عمق ۲ متری است، درحالی‌که در مطالعات قبلی این موضوع در مدت‌زمان کمتری اتفاق می‌افتاد و دلیل اصلی آن نفوذپذیری نسبتاً پایین مصالح شیروانی مورد مطالعه بوده است.

- با افزایش مدت‌زمان بارش، درجه اشباع (رطوبت) و به تبع آن وزن شیروانی افزایش و در مقابل مکش ماتریک کاهش می‌یابد و به تدریج حذف می‌شود. در شرایط بارش‌های طولانی‌مدت، اثر متقابل این دو عامل باعث کاهش مقاومت برشی خاک و در نتیجه ناپایداری شیروانی می‌شود.

- در ماه‌های اول بارندگی، بیشترین تغییر شکل‌ها در سطح شیروانی است ولی با گذشت زمان و در ماه چهارم تغییر شکل‌ها در عمق اتفاق می‌افتد و شیروانی ناپایدار می‌شود. در هر حال، بیشترین مقدار

## قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اردبیل به خاطر فراهم نمودن امکانات و تسهیلات لازم برای انجام این پژوهش اعلام می‌نمایند.

## مراجع

- Ali, A., Huang, J., Lyamin, A. V., Sloan, S. W., & Cassidy, M. J. (2014). Boundary effects rain-induced landslide. *Computers and Geotechnics*, 61, 341-354.
- Anon. (2011). *FLAC Manual. Fluid-Mechanical Interaction*. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Dangla, P. (1999). *Approches energetique et numerique des milieux poreux non saturés. Memoire d'habilitation a diriger des recherches*. Ecole normale superieure de Cachan. Universite de Marne-la-Valee.

- Fei, C., & Keizo, U. (2004). Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 4(2), 69-74.
- Josifovski, J., Susinov, B., & Abazi, S. (2019). Experimental and numerical modelling of rainfall induced slope instabilities in unsaturated sandy soil. WMHE 2019. 16<sup>th</sup> *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, Sep. 5-7. Skopje, Macedonia.
- Koner, R., & Chakravarty, D. (2016). Numerical analysis of rainfall effects in external overburden dump. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26, 825-831.
- Liu, J. Q., & Liu, J. L. (2012). Slope stability analysis with finite element method. *Advanced Materials Research*, 538-541, pp. 819-822. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr>.
- Mukhlisin, M., & Taha, M. R. (2012). Numerical model of antecedent rainfall effect on slope stability at a hillslope of weathered granitic soil formation. *Journal of the Geological Society of India*, 79(5), 525-531.
- Rahimi, A., Rahardjo, H., & Leong, E. (2011). Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 483-491.
- Richards, L.A. (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1, 318-333.
- Soren, K., Budi, G., & Sen, P. (2014). Stability analysis of open pit slope by finite difference method. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(5), 326-334.
- Van Genuchten, M. T. (1986). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J., & 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, DC.
- Xue, K., Ajmera, B. Tiwari, B., & Hu, Y. (2016). Effect of long duration rainstorm on stability of red-clay slopes. *Geoenvironmental Disasters*, 3(12), 1-13.
- Zheng, Y., Hatami, K., & Miller, G. (2013). Numerical modeling of wetting-induced settlement of embankments". Proceedings of the Geo-Congress. March 3-7. San Diego, California.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., & Lewis, R. W. (1975). Associated and non-associated viscoplasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25, 671-689.

## **Stability Analysis of Unsaturated Cut Slopes Due to Rainfall Infiltration (Case Study-Khoda Afarin Main Irrigation Canal)**

**D. Sattari\*, M. Hajjalilue-Bonab and A. Arabpour-Javadi**

\*Corresponding Author: Ph. D. Candidate, Department of Soil Mechanics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: d-sattari@tabrizu.ac.ir.

Received: 5 October 2019, Accepted: 22 December 2019

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

The stability of unsaturated slopes during rainfall is an important natural hazard. Past studies have shown that slope failures generally occur during or after rainfall. A review of past studies shows that instability of natural or excavated slopes for infrastructure construction occurs mainly during or after rainfall. Due to rainfall infiltration into unsaturated soil, the apparent cohesion and shear strength provided by matrix suction reduces  $d$ , resulting in slope instability. Library studies for this research, revealed that in recent years, extensive studies have been conducted on the rainfall infiltration in unsaturated slopes and their effect on shear strength and stability. But much of the research has been on high-intensity rainfall over a short period of time, however, some instability of slopes occurs during long-term rainfall or after rainfall. In addition to field research and physical modeling, numerical methods have also been developed to solve complex problems of unsaturated soils within the framework of various scientific theories in recent years. In this paper, in addition to considering the results of previous studies, the stability of the excavated soils with multiple berms has been investigated by considering transient fluid-mechanical coupled analysis.

Khodafarinn Irrigation network is one of the largest water resources development projects in northwestern Iran. The length of its main canal is 144 km. According to the topography of the project area, excavations were required to construct the main canal and its structures. The stability of the slopes created by excavation is of great importance for canal construction and operation. One of the critical slopes created along the main canal is in the trench created at the site of the Golmali cut and cover which was selected as a case study.

#### **Methodology**

FLAC 2D is one of the most applicable geotechnical software based on the FDM and complex LAC 2D is one of the most applicable geotechnical software based on the FDM and complex geotechnical problems can be modeled by using FISH. The general framework

of the study is that geometrical characteristics and materials parameters of the slope were first extracted using in situ and laboratory tests and then the average monthly rainfall was obtained from the meteorological station statistics. Then, transient fluid-mechanical coupled analysis was prepared for rainfall infiltration and deformation analysis using TPFLOW. As a result of the analysis, pore water pressure, degree of saturation and deformation were calculated and according to results, the stability of slope was evaluated by using the shear strength reduction method.

Filter paper test and RETC code were used to extract the SWRC and HCF of unsaturated soil parameters by Van-Genuchten model. Table.1 shows the parameters used in the analysis.

**Table 1-Parameters of slope material for numerical analysis**

$\gamma_{sat}$	G	C	$K_s$	$\phi$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n
KN/m <sup>3</sup>	MPa	Pa	m/s	Deg.	-	-	-	-
19.1	100	8340	1.42E-06	27.4	0.453	0.05	1.282	1.585

Based on the available meteorological data, the average annual rainfall and monthly values of rainfall were extracted for the study area. In order to reach initial conditions in terms of water content and degree of saturation, average annual rainfall (288 mm) was applied to the slope for six months. Then, the most critical time limit for performing the task in terms of rainfall was selected from monthly values of rainfall for the 4 critical months (March-June) Fig. 1.

**Results and Discussion**

Fig. 1 shows the changes in the factor of safety during the four months of rainfall. According to the results, the FOS was 1.72 at the end of the initial condition and after applying four-month rainfalls, it was reduced to less than 1 and as result failure occurs. By finding the trend of its changes, it can be concluded that, when the FOS was reached less than the unit after about 80 days and the slope became unstable. In other words, with the passage of time and the increased rainfall infiltration at higher depths, after about 80 days, the complete slope failure started from the slope claw.

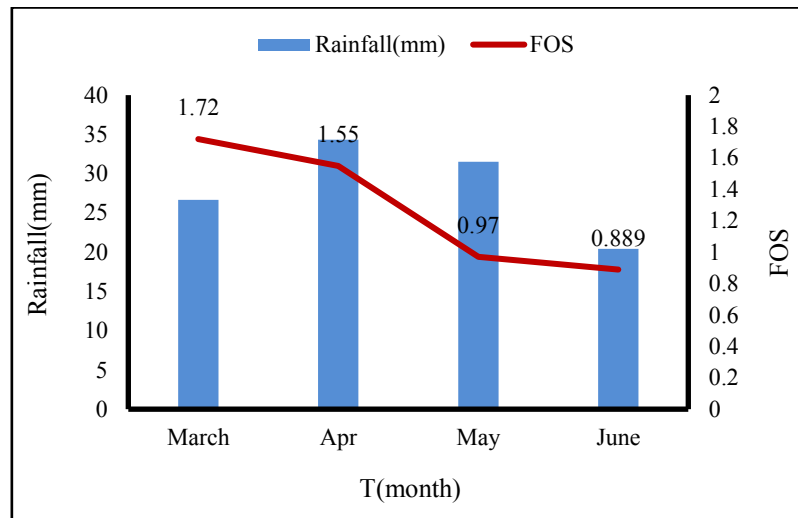


Figure 16- Factor of safety and rainfall history for the 4 month

### Conclusions

- 1) Due to very low permeability and high suction at a low saturation ratio, the behavior of unsaturated excavated slopes in fine-grained soil is relatively complex compared to coarse-grained soil slopes.
- 2) In fine-grained soil slopes, pore water pressure and degree of saturation increase nonlinearly with increasing rainfall duration. However, the increase rate and the trend of increase was different from studies for high-intensity short duration rainfalls, The increase was faster at the slope surface but with increasing depth, water infiltration rate and consequently changes in pore water pressure will take longer time.
- 3) The factor of safety decreases with the time of rainfall and after about 80 days, the instability of the slope begins and the reason for its prolongation can be attributed to the low permeability of the slope material. Therefore, for relatively low permeability soil slopes such as those in fine-grained soils, long-duration rainfall is more effective than high-intensity but low-duration rainfall.
- 4) According to the results of previous studies conducted on high-intensity rainfall on slope stability in fine-grained slopes, high intensity and low duration rainfalls cannot infiltrate due to low permeability of materials and moves in the form of runoff at the slope surface and their stability should be examined for moderate to long-duration rainfall if necessary.

**Key Words:** FDM, HCF, Pore Water Pressure, RETC, SSR, SWCC, Unsaturated Soil