

مدلسازی عددی شیروانی خاکی و بررسی پایداری آن با روش تعادل حدی با مطالعه موردی بر روی شیروانی خاکی سد شیرین دره در شهر بجنورد

حجت دهستانی^۱، منصوره کدخدای بلقور^۲، حامد دهستانی^۳

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان

۲- کارشناس ارشد خاک و پی در شرکت مهندسین مشاور طوس آب

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت

dehestani@qiet.ac.ir
hojatdehestani@yahoo.com

خلاصه

لغزش و ناپایداری شیب های خاکی و خاکریزها همواره یکی از عوامل تهدید کننده ایست که ایمنی سازه ها و شریان های حیاتی نظیر مناطق مسکونی، بزرگراه ها، خطوط راه آهن و خطوط انتقال نیرو را به مخاطره می اندازد. یکی از روش های جلوگیری از وقوع این نوع ناپایداری ها، تثبیت و پایدارسازی شیب های خاکی با استفاده از روش های مختلف پایدارسازی میباشد. از آنجا که معیار ناپایداری شیب ها بر هم خوردن تساوی نیروی محرک و مقاوم می باشد، کاهش وزن توده خاک لغزنده باعث کاهش نیروهای رانش و در نتیجه افزایش اطمینان در برابر جابجایی و لغزش خواهد شد. روش دیگر برای جلوگیری از ناپایداری شیب ها افزایش نیروهای مقاومت در مقابل جابجایی می باشد. برای این حالت یا باید با اعمال نیروهای خارجی، مثل دیوار حائل با نیروهای رانشی زمین مقابله کنیم و یا باید مقاومت داخلی توده لغزنده به اندازه ای افزایش یابد که شیب پایدار بماند. در این مقاله به بررسی هر دو روش پرداخته شده است. در این مقاله به بررسی پایداری شیروانی خاکی مشرف به ضلع جنوبی مخزن ۳۰۰۰۰ مترمکعبی خط انتقال آب از سد شیرین دره به شهر بجنورد پرداخته شده است. با توجه به ارتفاع زیاد شیروانی لازم است پایداری شیب بررسی شده و در صورت نیاز راهکار مناسب جهت پایداری ارائه گردد. تحلیل پایداری شیب به روش تعادل حدی با نرم افزار *GEO-SLOPE* صورت گرفته و روش تحلیل مورد استفاده "روش بیشاپ و جانبو" در نظر گرفته شده است و پس از مقایسه مقاطع بحرانی مدلسازی شده از لحاظ پایداری تصمیمات و پیشنهادات لازم جهت تثبیت شیب خاکی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: شیب خاکی، پایدار سازی، ضریب اطمینان، شیروانی

۱. مقدمه

اصولاً شیب جانی خاکریزها از بافت مصالح خاکریز و کاربری طرح پیروی می کند. معمولاً خاکریزها با خاک ماسه ای دارای شیب جانی کند و با خاک رسی دارای شیب جانی تندتر می باشند. کاربری خاکریز بر شیب جانی در دو حالت خشک و تر، میانی پیش بینی های خاص خود را در زاویه و حفاظت شیب طلب می کند. در حالت خشک با آزمایش های مکانیک خاک تا حد مطلوبی می توان شیب پایدار را برآورد نمود. در مناطق آبدار فاکتورهای متعددی از جمله جریان آب و سرعت باد که عمدتاً باعث ایجاد آبستگي در بدنه خاکریزها می گردند باید مد نظر باشند و تدابیر لازم را جهت کنترل آنها اتخاذ نمود [۱].

^۱ حجت دهستانی، عنوان عضو هیئت علمی دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان

^۲ منصوره کدخدای بلقور، کارشناس ارشد خاک و پی در شرکت مهندسین مشاور طوس آب

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت

اقدام اصلی برای اجتناب از خطر لغزش این است که در مرحله شناسایی مطالعات طرح، نواحی با قابلیت زهکشی ضعیف و یا نقاط فعال از نظر جابجایی و نشست مثل محل لغزشهای قدیمی دقیقاً شناسایی شوند. این شناخت کمک زیادی در تصمیم گیری برای انتخاب محل طرح یا جابجایی آن خواهد نمود. در این بررسیها اگر ضریب اطمینان در برابر لغزش بیشتر از ۱/۵ باشد میتوان انتظار داشت که کمترین کاهش در نیروهای مقاوم (بطور مثال در اثر بالا رفتن سطح آب) باعث ناپایداری شود. از آنجا که معیار ناپایداری بر هم خوردن تساوی نیروی محرک و مقاوم می باشد، کاهش وزن توده خاک لغزنده باعث کاهش نیروهای رانش و در نتیجه افزایش اطمینان در برابر جابجایی خواهد شد. کاستن از زاویه شیب، پلکانی نمودن و زهکشی خاک و استفاده از مصالح سبک در خاکریزی ها نمونه هایی از روشهای اجرایی برای کاهش وزن توده لغزنده و در نتیجه کاستن از نیروهای رانشی زمین میباشد. روش دیگر برای جلوگیری از ناپایداری شیبها افزایش نیروهای مقاومت در مقابل جابجایی می باشد [۲]. برای این حالت یا باید با اعمال نیروهای خارجی، مثل دیوار حائل با نیروهای رانشی زمین مقابله کنیم و یا باید مقاومت داخلی توده لغزنده به اندازه ای افزایش یابد که شیب پایدار بماند. برای دست یافتن به یک طرح فنی و اقتصادی هر دو روش باید مورد نظر قرار گیرد [۳].

۲. شرح روشهای مختلف پایدارسازی شیب های خاکی

روشهای مختلف پایدارسازی زمین لغزشها بر اساس کاهش نیروهای محرک و افزایش نیروهای مقاوم صورت می گیرد. در ادامه برخی از شیوه های پایدارسازی شیروانیهای خاکی مورد بررسی قرار گرفته است [۵]:

۲-۱. روش اصلاح هندسی شیب

اصلاح هندسی شیب ها به منظور کاهش نیروهای محرک یا افزایش نیروهای مقاوم، روشی است که به طور متداول جهت افزایش ضریب پایداری دامنه ها و تثبیت زمین لغزش ها به کار می رود.

یک روش خاکبرداری در پنجه جهت ایجاد زمینه تداوم لغزش تا زمان رسیدن به پایداری است. این روش، روشی ساده و اولیه مبتنی بر برداشت مصالح لغزشی و تحریک مکرر لغزش تا زمان کاهش شیب کلی توده لغزشی و رسیدن به پایداری می باشد. بعضی مواقع ممکن است حجم خاکبرداری قابل ملاحظه ای برای رسیدن به وضعیت پایدار لازم گردد. روش دیگر برداشت و جایگزینی مصالح لغزشی، به وسیله مصالح دارای قابلیت زهکشی مناسب است. این روش تنها برای لغزش های نسبتاً کوچک کاربرد دارد. در این شیوه، اطمینان از پایداری قسمت تاج در هنگام برداشت مصالح لغزشی حائز اهمیت است.

افزایش وزن پنجه به طریق خاکریزی که معمولاً به وسیله ایجاد سکوهای خاکی صورت می گیرد و ممکن است در ترکیب با سازه های وزنی دیگر مانند گابیون و دیواره های خاکی مسلح مورد استفاده قرار گیرد. در این روش نیز تعیین محل صحیح خاکریز و همچنین زهکشی مناسب آن بسیار حائز اهمیت است.

۲-۲. روش زهکشی

زهکشی بدنه توده های لغزنده فقط به منظور خارج ساختن آب اضافی از توده خاک است. به طور کلی زهکشی خاک به دو طریق امکان پذیر است اول زهکشی سطحی و دیگری زهکشی زیر سطحی (عمقی) [۴].

الف - زهکشی سطحی

منظور از این نوع زهکشی، انتقال آب اضافی از سطوح خاک است. این آبها در اثر بارندگی یا آبیاری زمینهای اطراف جمع می شوند و چون با سرعت لازم در خاک نفوذ نمی کنند، در سطح زمین جاری می شوند.

کانال های زهکشی به منظور جمع آوری آب باران و هدایت آنها به خارج از توده لغزنده احداث می گردند. برای طراحی شبکه کانال های زهکشی در توده لغزنده باید بررسی های دقیق از منطقه توپوگرافی زمین لغزش به عمل آید و نقشه توپوگرافی با مقیاس مناسب از محدوده زمین لغزش تهیه گردد. بطوریکه بتوان آب داخل کانال را با شیب مناسبی به چاه تخلیه و یا به نهر زهکشی هدایت نمود.

ب - زهکشی زیرزمینی (عمقی)

زهکشی اکثر خاکها از طریق زهکش های سفالی و لوله های مشبک و دارای شیار که در زیر خاک کار گذاشته می شود، صورت می گیرد. در شرایطی که خاک محل ریزدانه بوده و قابلیت زهکشی و عبور آب را نداشته باشد و بخصوص در مناطق دارای شیب که وجود آب احتمال ریزش را افزایش می دهد، لازم است با تعبیه لوله های زهکش در فواصل مناسب خاک زهکشی گردد.

۲-۳. حفر چاههای زهکش

چاههای زهکش، چاههایی هستند که جهت تخلیه آب نشتی در عمق خاک ایجاد می‌شوند. چاههای زهکش در واقع یکی از روش‌های کنترل جریان نشت و کاهش فشار در لایه‌های خاکی هستند.

چاههای زهکش به صورت یک سری، در یک و گاهی چند ردیف، در جهت عمود بر مسیر جریان آب تعبیه می‌شوند. معمولاً جدار این چاهها از لوله‌های مشبک همراه با فیلتر مناسب است. جنس این لوله ممکن است از فولاد، آهن گالوانیزه، پی‌وی‌سی یا سایر مواد مناسب انتخاب شود. چاهها بوسیله یک لوله جمع‌آوری کننده و یا مجاری بتنی به یکدیگر متصل می‌شوند و آب نشت یافته از طریق این مجاری جمع‌آوری و تخلیه می‌شود. فیلتر اطراف چاه باید به گونه‌ای طراحی و اجرا شود که اولاً جریان آب نشتی به داخل چاه با سهولت و بدون مقاومت زیاد صورت گیرد، ثانیاً ذرات خاک اطراف به داخل چاه منتقل نشود.

۲-۴. استفاده از پوشش گیاهان

اثرات مثبت پوشش گیاهی عبارتند از:

مسلح نمودن ریشه‌ها از نظر مکانیکی از طریق تبدیل تنش برشی در خاک به مقاومت کششی در ریشه‌ها، خاک را مسلح می‌کنند. کاهش رطوبت خاک: تبخیر و تعرق توسط ریشه و گیرش بارش توسط شاخ و برگ درختان می‌تواند موجب کاهش فشار آب منفذی گردد. ایجاد شمع مهار: ساقه‌ها می‌توانند به صورت مهار شمع یا پایه‌های قوسی عمل نمایند و با نیروهای برشی دامنه مقابله نمایند. بارگذاری: وزن پوشش گیاهی در مواردی خاص می‌تواند از طریق افزایش تنش عمودی بر سطح گسیختگی پایداری را افزایش دهند. اثرات منفی پوشش گیاهی عبارتند از: مهمترین تأثیر منفی پوشش درختی بر پایداری دامنه به وزن ظاهری درختان و خطر واژگونی یا ریشه‌کشی آنها در بادهای و جریانات شدید مربوط می‌گردد. چنانچه توده ریشه‌ای حجیم از زمین کنده شود، بسته به موقعیت درخت نسبت به دامنه می‌تواند پایداری نهایی را کاهش دهد. این موضوع برای درختان بزرگی که بر خاکریزهای نسبتاً کوچک رشد میکنند بحرانی تر می‌باشد. در برخی موارد ممکن است بدلیل بهم زدن بافت خاک تأثیر نامطلوب در پایداری شیب داشته باشد.

۳. مدل‌سازی عددی شیروانی خاکی

در این مقاله به بررسی پایداری شیروانی خاکی مشرف به ضلع جنوبی مخزن ۳۰۰۰۰ مترمکعبی خط انتقال آب از سد شیرین دره به شهر بجنورد پرداخته شده است.

۳-۱. مشخصات پروژه

این مجموعه در رابطه با شیروانی خاکی مشرف به ضلع جنوبی مخزن ۳۰۰۰۰ مترمکعبی خط انتقال آب از سد شیرین دره به شهر بجنورد می‌باشد. با توجه به ارتفاع زیاد شیروانی لازم است پایداری شیب بررسی شده و در صورت نیاز راهکار مناسب جهت پایداری ارائه گردد.

۳-۲. مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه

جهت بررسی و مطالعه شرایط ژئوتکنیکی محل احداث مخزن ۳۰۰۰۰ مترمکعبی، تعداد سه گمانه اکتشافی به عمق ۴/۵، ۸ و ۸/۵ متر به روش دستی حفاری شده است. در این پروژه تا عمق حفاری شده سطح آب مشاهده نشده است.

بر اساس لوگ گمانه‌ها و نمودارهای دانه‌بندی جنس خاک عمدتاً ریزدانه بوده و در آن لایه‌هایی از ماسه مشاهده می‌شود.

متوسط درصد رطوبت خاک با توجه به نتایج آزمایشها بین ۵/۵ تا ۲۰/۳٪ متغیر است. چگالی توده خاک بطور میانگین حدود $2/70 \text{ gr/cm}^3$ برآورد شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش SPT خاک محل پروژه در لایه‌های رسی سفت و در لایه‌های ماسه‌ای از تراکم نسبتاً بالایی برخوردار است.

جدول ۱- مقایسه میزان سفتی و عدد N در خاکهای رسی

>۳۲	۱۶-۳۲	۸-۱۶	۴-۸	۲-۴	<۲	N
سخت	بسیار سخت	سفت	متوسط	نرم	بسیار نرم	سفتی

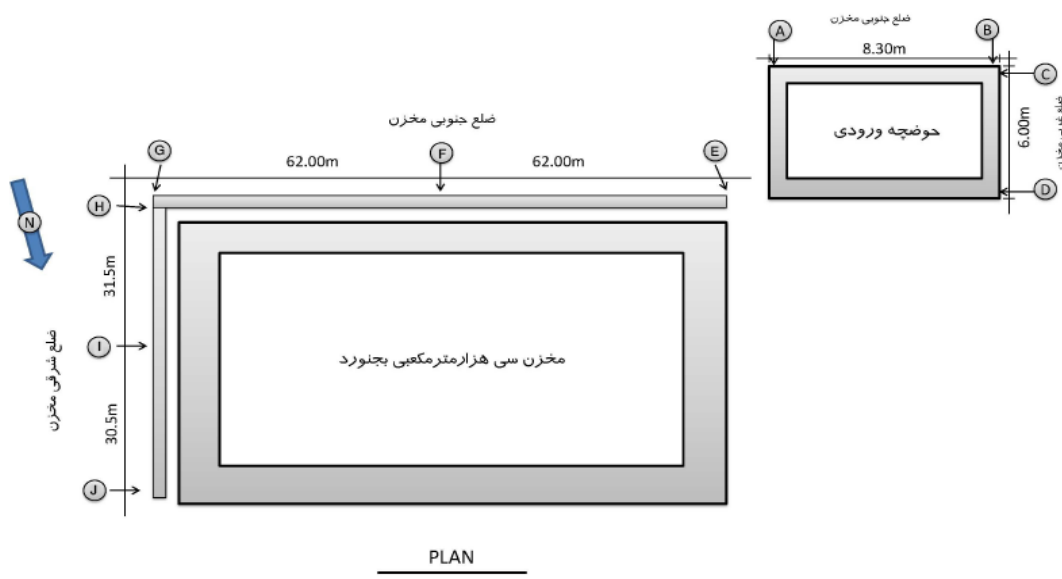
جدول ۲- مقایسه میزان تراکم و نتیجه آزمون SPT (عدد N) در خاکهای بدون چسبندگی

>۵۰	۳۰-۵۰	۱۰-۳۰	۴-۱۰	<۴	N(SPT)
بسیار متراکم	متراکم	تراکم متوسط	سفت	بسیار سفت	میزان تراکم

در ادامه ابتدا پایداری و سطح لغزش دیواره های شیروانی مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته است و سپس راهکارهای مناسب جهت پایداری نمودن شیروانی ارائه شده است.

۳-۳. بررسی سطح لغزش و پایداری دیواره شیروانی

پایداری شیروانی ها به پارامترهای مقاومت برشی مصالح خاکی (c & ϕ)، وزن مخصوص طبیعی خاک و همچنین ارتفاع خاکریز بستگی دارد. مصالح ریزدانه دارای پارامترهای مقاومت چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می باشند. چنانچه این مصالح اشباع شوند و تحت سربار قرار گیرند زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر صفر شده و فقط چسبندگی خواهند داشت، در نتیجه در شرایط اشباع ضعیف ترین حالت خود را بلحاظ مقاومتی دارا هستند. مصالح درشت دانه فاقد چسبندگی هستند و تحت بارگذاری فقط دارای پارامتر (ϕ) می باشند که مقدار آن در شرایط خشک و یا اشباع تفاوت چندانی ندارد. خاکها اکثراً دارای ترکیبی از مصالح درشت دانه و ریزدانه می باشند و درصد مقدار آنها بسته به نوع خاک متفاوت است. جهت بررسی پایداری شیب تعداد ۱۰ مقطع عرضی از شیروانی نقشه برداری شده است. شکل (۱) موقعیت نقاط را نشان می دهد.



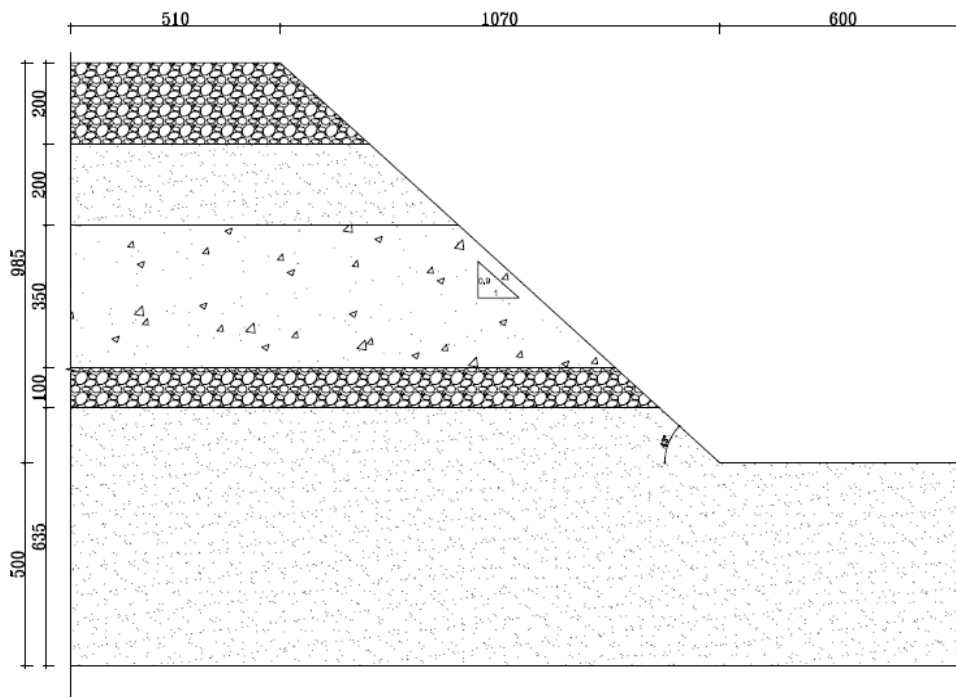
شکل ۱- موقعیت مقاطع عرضی تهیه شده از محل سایت پروژه

زاویه شیب شیروانی در ۱۰ مقطع متفاوت در جدول ۳ آورده شده است. در مقاطع عرضی A تا D زاویه شیب بین 58° تا 63° و در مقاطع E تا J زاویه شیب بین 32° تا 43° متغیر است. با در نظر گرفتن ارتفاع شیروانی مقطع C از دیواره پشت حوضچه شیرآلات و دو مقطع G و H از محل مخزن جهت تحلیل در نرم افزار انتخاب شده اند. هندسه شیروانی برای مقطع G در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۳- زاویه شیب در مقاطع A تا J

SECTION	Gradient(°)	SECTION	Gradient(°)
---------	-------------	---------	-------------

A	58	F	35
B	62	G	43
C	63	H	41
D	59	I	41
E	32	J	35



شکل ۲- هندسه مدلسازی مقطع G

تحلیل پایداری شیب به روش تعادل حدی با نرم افزار GEO-SLOPE صورت گرفته و روش تحلیل مورد استفاده "روش بیشاپ و جانبو" در نظر گرفته شده است.

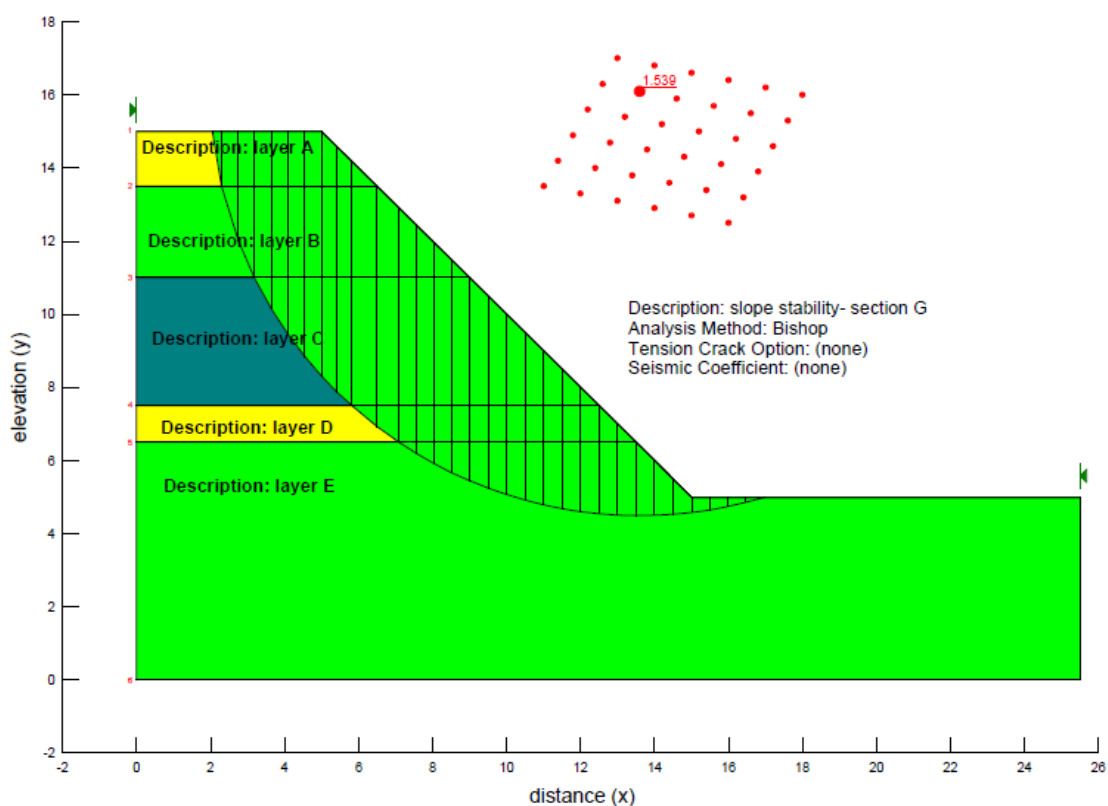
بمنظور بررسی پایداری برشی شیروانی‌ها، تحلیل کنترل پایداری در دو حالت زیر صورت گرفته است:
در حالت اول، پایداری شیب با معرفی پارامترهای چسبندگی و زاویه های اصطکاک حاصل از آزمایش‌ها صورت گرفته است.
در حالت دوم، تحلیل در شرایطی که خاک اشباع است، صورت گرفته است.
پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری شیب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری شیب

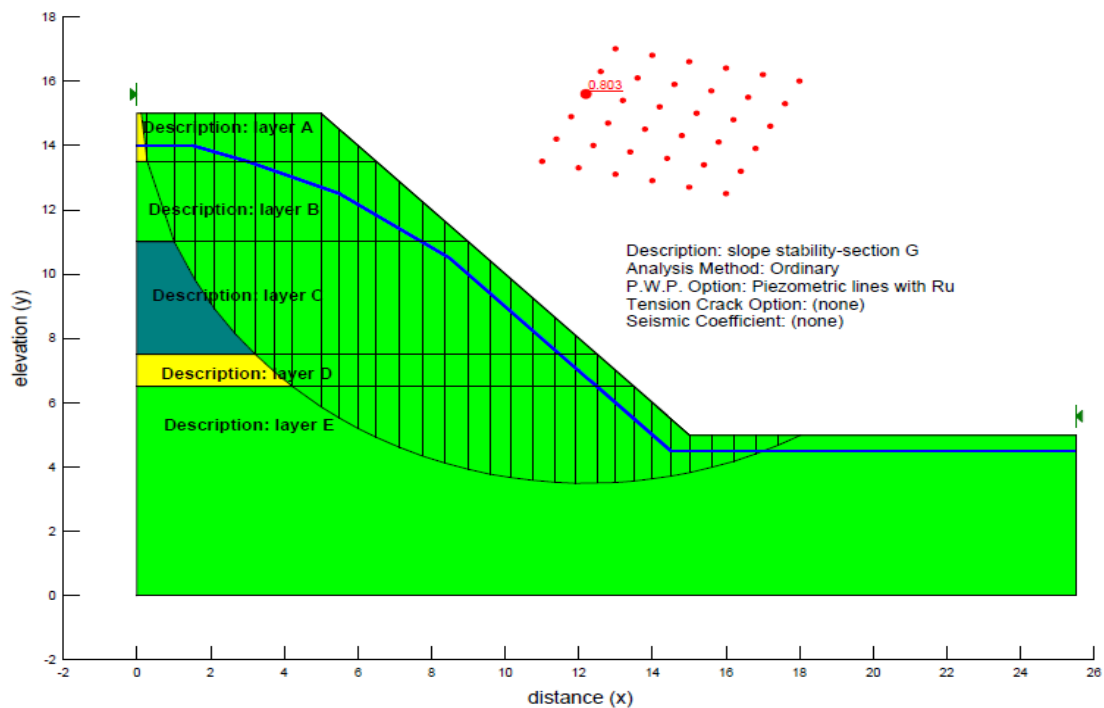
پارامترهای برشی	وزن مخصوص KN/m^3	مصالح
-----------------	--------------------	-------

چسبندگی KN/m^2	زاویه اصطکاک (درجه)	مرطوب	خشک	
۸	۴۰	۲۰/۵	۱۹/۳	لایه خاک نوع A
۱۵	۲۴	۱۷/۱	۱۵/۲	لایه خاک نوع B
۱۸	۲۵	۱۹	۱۵/۸	لایه خاک نوع C

شکل های ۳ و ۴ نتایج تحلیل را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳- نتایج پایداری شیروانی برای مقطع G در شرایط غیراشباع



شکل ۴- نتایج پایداری شیروانی برای مقطع G در شرایط اشباع

همانطور که ملاحظه می شود شیروانی در دو مقطع G در شرایطی که سطح آب پایین است دارای ضریب اطمینان $1/53$ بوده و پایدار است. اما در شرایط اشباع ضریب اطمینان به مقادیر $0/80$ کاهش می یابد که در این حالت شیروانی ناپایدار می باشد. لذا در صورتی که بتوان با در نظر گرفتن تمهیداتی از نفوذ آب به مصالح شیروانی جلوگیری نمود، سطح شیبدار پایدار باقی می ماند. شیروانی موجود در پشت حوضچه در هر دو حالت حضور و عدم حضور آب بدلیل داشتن شیب تند، ناپایدار است. لذا لازم است علاوه بر دور نمودن آب از شیروانی پشت حوضچه دیواره نیز محافظت شود.

۴. بررسی روشها و ارائه راهکار

در این پروژه با توجه به محدودیت در دسترسی به اراضی بالادست شیب و همچنین موقعیت جاده دسترسی مخزن، امکان تغییر زاویه شیب و هندسه شیروانی وجود ندارد و همچنین جایگزینی مصالح مقرون به صرفه نیست. در بالادست شیب، بدلیل وجود زمینهای کشاورزی لازم است با احداث آبرو در فاصله مناسبی از شیروانی در بالادست، آبهای حاصل از آبیاری و بارندگی هدایت شود. در پایین دست شیب، آبهای سطحی روی دامنه با ریختن مصالح زهکش در پشت دیوار حائل جمع آوری و هدایت می شوند. جهت زهکشی در عمق شیروانی می توان از لوله های مشبک مورب استفاده نمود و یا بکمک حفر چاههای زهکش در یک ردیف، در بالای شیب مانع از نفوذ آب به داخل شیروانی شد. در ادامه برآورد مالی برای دو گزینه صورت گرفته است:

گزینه یک: تعبیه لوله های زهکش نیمه سوراخدار درون بدنه خاکریز با طول ۳ متر در فواصل قائم ۳ متر و افقی ۵ متر
گزینه دو: احداث چاههای زهکش به قطر ۸۰ سانتیمتر به عمق ۴ متر و به فواصل ۱۰ متر در یک ردیف در بالادست شیروانی، بطوریکه توسط مجاری بتنی به یکدیگر متصل می شوند و آب نشت یافته از طریق این مجاری جمع آوری و تخلیه می شود.
در هر دو گزینه دیواره پشت حوضچه شیرآلات بوسیله مش شاکریت محافظت شده است. سطح شیروانی با سنگ مالون پوشش داده شده و کانال جمع آوری آبهای سطحی در بالادست و مصالح زهکش در پشت دیوار حائل در نظر گرفته شده است.
با استناد به نتایج حاصل از برآورد هزینه ها، هر دو گزینه از لحاظ قیمت مشابه هستند.

۵. نتایج

در رابطه با شیروانی خاک مشرف به ضلع جنوبی مخزن ۳۰۰۰۰ متر مکعبی خط انتقال آب از سد شیرین دره به شهر بجنورد نتایج زیر بدست آمده است

- ۱- با توجه به بافت و ویژگی های مقاومتی بدنه و پی شیروانی، ملایم سازی شیب و دور کردن آب از بدنه شیروانی و پی آن برای اطمینان از پایداری در شرایط استاتیکی و دینامیکی کاملاً الزامی و ضروریست.
- ۲- تحلیل های پایداری شیروانی نشان دهنده پایداری در شرایط شیب ۰/۹:۱ (V:H) است. این مساله در شرایط خاک با رطوبت طبیعی و نه اشباع و حضور آب توصیه می شود.
- ۳- برای ملایم سازی شیب، تا جایی که زمین تملک شده اجازه دهد باید شیب را ملایم کرد و حتی بدین منظور می توان جاده دسترسی ضلع جنوبی را حذف کرد.
- ۴- برای دور کردن آب از شیروانی، تعبیه کانال جمع آوری آب در بالای شیب الزامی است. این کانال باید توانایی هدایت و جمع آوری آب های نشتی و سطحی را داشته باشد. کانال باید الزاماً بتنی باشد و از ابعاد کافی شامل عمق و سطح مقطع برخوردار باشد.
- ۵- بسیار مفید و در جهت اطمینان خواهد بود که رویه شیروانی در سرتاسر ضلع جنوبی برای جلوگیری از فرسایش سطحی با سنگ مالون پوشش داده شود.
- ۶- تعبیه لوله های زهکش نیم سوراخدار half perforated درون بدنه خاکریز به تخلیه آب های نشتی احتمالی به بدنه کمک شایانی می کند.
- ۷- پس از پوشش شیروانی با سنگ مالون، با توجه به اینکه در انتهای شیب دیوار حائل اجرا شده است، با ریختن مصالح زهکش در پشت دیوار جمع آوری آب های نشتی در پای شیروانی صورت گیرد.
- ۸- دیواره های پشت حوضچه شیرآلات بوسیله مش شاتکریت محافظت شود.

۵. مراجع

1. BodeC, HirschauerR, SavadisSA. Soil-structure interaction in the time domain using half-space Green's functions. Soil Dyn Earthquake Eng 2002;22(4):283-95
2. Cundall, P. A. "Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics," in Numerical Methods in Engineering (Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, June, 1976), Vol. 1
3. BeskosDE, DasguptaG, VardoulakisIG. Vibration isolation using open or filled trenches part 1: 2-Dhomogeneous soil. Comput Mech 1986; 1(1): 43-63.
4. V.V.Orehov, Hassan Negahdar, R.Negahrdar Moghanlou. " Investigation Effects of Trench Barrier on the Reducing Energy of Surface Waves in Soils.
5. Wittke, W.W. (1965) Method to analyze the stability of rock slopes with and without additional loading (in German). Felsmechanick und Ingenieurgeologie. Supp. II. Vol. 30, 52-79. English translation in Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 6, July, 1971.