



Получена: 26.06.2023 г.

Приета: 03.07.2023 г.

СЪПОСТАВИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ РАЗЛИЧНИ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА СВЛАЧИЩЕ ПО НАЧУПЕНА ХЛЪЗГАТЕЛНА ПОВЪРХНИНА

Д. Фотев¹

Ключови думи: свлачище, начупена хлъзгателна повърхнина, коефициент на устойчивост, оценка на устойчивост

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия е изготвена на базата на проведено инженерно-геоложко проучване на свлачище на път Перник – Рударци – стопанство „Витошко“.

В статията е разгледана комплексна методика за изследване на стабилитета на свлачището въз основа на сравнение на резултатите, получени чрез различни методи за оценка на устойчивостта.

1. Въведение

Съществуват множество методи за определяне на устойчивостта на свлачищни склонове. Най-често използваните методи за определяне на устойчивостта на склоновете са в зависимост от дълбочината и формата на потенциалната хлъзгателна повърхнина. За условията на България основните методи са регламентирани в Наредба № 12/03.07.2001 на МРРБ за проектиране на геозащитни строежи [1], сгради и съоръжения в свлачищни райони.

За свлачищно опасни склонове и откоси, с установявана по изчислителен път свлачищна повърхнина, се използва успешно хипотезата за нейната кръгово-цилиндрична форма. В този случай се прилагат методите на Терцаги, Тейлор, Бишоп, Маслов и др. [3].

¹ Димитър Фотев, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dimitarfotew@abv.bg

В случаите на активни свлачища с изяснена свлачищна повърхнина, фиксирана при инженерно-геоложкото проучване, се използват изчислителните методи на Шахунянц, Маслов-Берер, Янбю и др.

Свлачището, което е разгледано за целите на настоящата статия, има хлъзгателна повърхнина с неправилна форма, която е установена още по време на инженерно-геоложките проучвания. Местоположението ѝ е определено, като за горна и долна граница са приети отчетливо оформените свлачищни откоси и пукнатини по терена. В останалата си част хлъзгателната повърхнина преминава по слаба прослойка, която е установена както от проучвателните сондажи, така и от динамичните пенетрации.

В случаи като този, когато е налична предварително зададена (фиксирана) хлъзгателна повърхнина, предимството е, че се спестяват множество изчислителни процедури за определяне на най-опасната зона на хлъзгане, поради което могат да се използват сравнително прости решения за оценка на устойчивостта, без да е необходим специализиран софтуер.

В статията е разгледана комплексна методика за изследване на стабилитета на свлачище, въз основа на сравнение на резултатите, получени чрез различни методи за оценка на устойчивостта. За целта е използвано съкратеното аналитично решение по метода на Шахунянц, при което изчисленията са извършени без специализиран софтуер. Устойчивостта на масива е изследвана и въз основа на метода на крайните разлики (МКР) с помощта на компютърната програма FLAC-Slope (Itasca, 2001). Използван е и специализираният софтуерен продукт GEO5 – Slope Stability за определяне на коефициентите на устойчивост по методите на Янбю и Маслов-Берер. Изследването на устойчивостта чрез всички тези методи повишава надеждността на получените резултати.

2. Общи сведения за изследвания обект

Възникналото свлачище се намира на западните склонове на Витоша, в община Перник, на около 500 m югозападно от с. Рударци и на около 1000 m южно от село Драгичево. Засегнало е пътя между гр. Перник и с. Рударци. Теренът в преобладаващата си част е нископланински и хълмист с много хълмове и дерета.

В тектонско отношение разглежданият район попада в Средногорската тектонска зона. Разломи са установени от двете страни на мислената линия, прекарана от с. Рударци до с. Кладница. Направлението им е северозапад-югоизток.

Геоложката основа е изградена главно от горнокредни скали, представени от монцонити и сиенити.

Съгласно сеизмичното райониране на България по БДС EN 1998-1:2005 (Еврокод 8) [2] районът попада в област с референтно ускорение $P_U = 0,11$ g при период на повторяемост на земетресенията – 475 години.

В скалните разновидности на кредата циркулират главно пукнатинни води.

Свлачището е засегнало една част от пътното трасе с широчина около 20 m. В южната част на шосето се наблюдава свлачищен отстъп (фиг. 1). Дължината на свлачището е приблизително 30 – 35 метра.

Възможни причини за свлачището са формирането на поток от повърхностни води, които преминават през пътния насип и преовлажняването на делувиялните отложения по повърхността на склона.

Свлачищното тяло се класифицира като плитко, детрузивно, IV клас, съгласно [1]. Скоростта на движение на свлачището е сравнително ниска и то може да бъде отнесено към 5-а до 6-а група. По значимост на засегнатите обекти свлачището се отнася към категория В.



Фиг. 1. Деформации по пътното трасе

В зоната на пропадане на пътя се забелязват няколко слоя положен асфалт, което е признак за дългогодишни деформации в пътния участък, след които е извършвано преасфалтиране, без да се отстраняват причините, водещи до аварията. На места асфалтовата покривка достига дебелина до 50 cm.

Теренът под трасето е с наклон около 35°. Той е покрит с делувиална покривка, по която се наблюдава дървесна и тревна растителност. По склоновете под шосето има признаци за деформации и премествания на почвите от делувиалната покривка – наклонени дървета, променен релеф.

Инженерно-геоложките проучвания включват оглед на терена и запознаване на автора с наличните за района литературни данни. В границите на проучвания терен са направени 4 бр. проучвателни шурфа с обща дължина 14 m, 3 бр. непрекъснати динамични пенетрационни тестове с обща дължина 18 m и 2 бр. моторни проучвателни сондажи с обща дължина 17 m.

В резултат на направеното проучване са отделени следните четири инженерно-геоложки разновидности:

Разновидност 1 (Песъчлива прахова глина, светлокафява). Тази почвена разновидност се установява на дълбочина от 0,0 до 6,00 m от повърхността на терена. Произходът ѝ е предимно делувиален. Дебелината на пласта се изменя от 2,0 до 6,0 m. Изследваните земни проби характеризират пласта по зърнометричен състав, като прахова глина (**saCl**) до песъчлив прах (**saSi**). Визуално се различава от *разновидност 2* с по-светлия си цвят и с по-малката си влажност. Съгласно БДС EN ISO 14688-2 почвата е *в много твърда консистенция*. По степен на водонасищане – S_r , почвата е *влажна*.

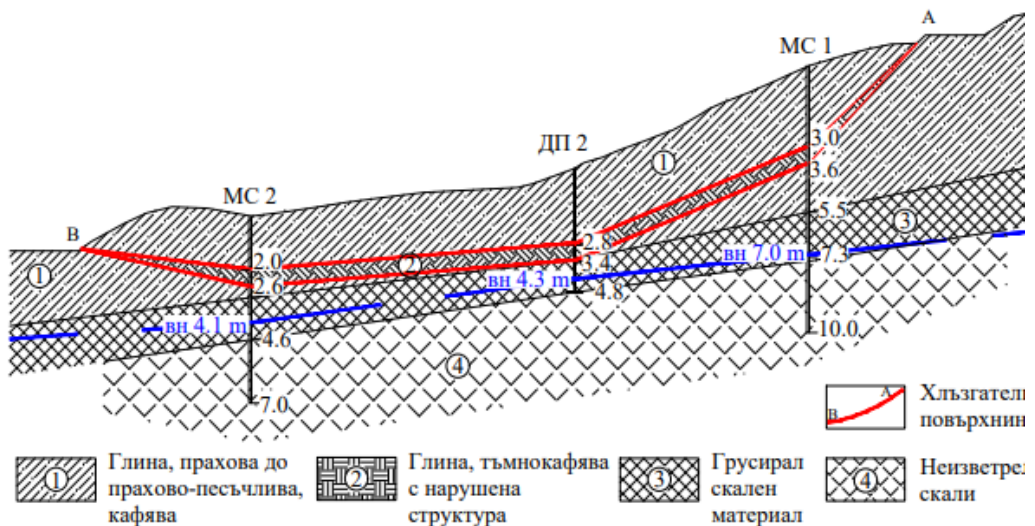
Разновидност 2. (Глина, тъмнокафява). Тази почвена разновидност в проучвателните сондажи и пенетрациите се установява на дълбочина между 2 и 3 m в

тялото на свлачището, като прослойка сред *разновидност 1*. В този пласт е формирана хлъзгателната повърхнина на свлачището. Дебелината на пласта е не повече от 0,6 m. От направения динамич пенетрационен опит (ДП2) е видно, че при навлизане на накрайника в разновидност 2 броят на ударите рязко намалява от 5 – 6 бр. до 0 – 1 бр. за проникване на 10 cm (фиг 3). Изследваните земни проби характеризират пласта по зърнометричен състав, като глина (C1) до пясъчлива глина (saC1). Съгласно БДС EN ISO 14688-2 почвата в *средно-твърда консистенция*. При водонасищане тази почвена разновидност вероятно преминава в мека до много мека и показателите на якостта на срязване намаляват, което води до възникване на деформации и премествания по откоса. По степен на водонасищане – S_r , почвата е *много влажна*.

Разновидност 3 (Грусирал скален материал). Тази почвена разновидност е установена в сондажите и пенетрациите на дълбочина между 3 и 5 m от повърхността на терена. Дебелината на пласта е около 1,5 m. Изследваните земни проби характеризират пласта по зърнометричен състав, като пясък (Sa) до чакълест пясък (grSa). В *Разновидност 3* се установява появата на подземните води.

Дълбочината на водното ниво в горната част на склона е над 7 m, а в подножието му тя е около 3 m от повърхността на терена.

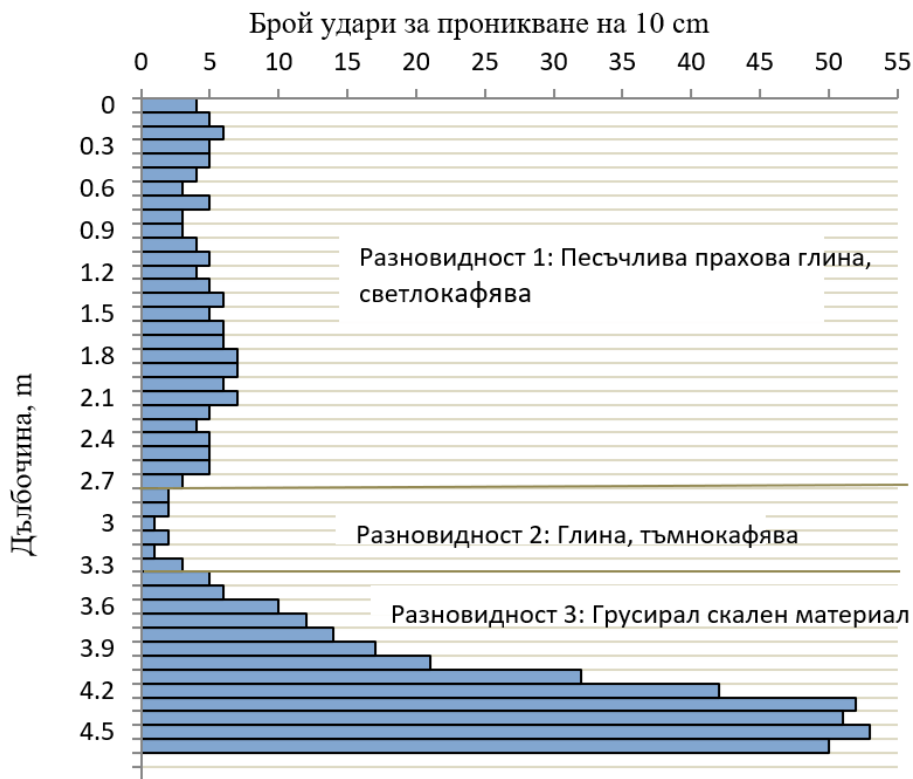
Разновидност 4 (Неузветряла скала). Представени са монзонити с горнокредна възраст. Тази почвена разновидност е установена в двата прокарани разреза. Цялата ѝ дебелина не е преминала.



Фиг. 2. Инженерно-геоложки разрез, прокаран през централната част на свлачището

Хлъзгателната повърхнина на свлачището е с неправилна (начупена) форма, която е установена още по време на инженерно-геоложките проучвания. Местоположението ѝ е определено, като за горна и долна граница са приети отчетливо оформените свлачищни откоси и пукнатини по терена. В останалата си част хлъзгателната повърхнина преминава по „слаба прослойка“ (разновидност 2), която е установена както от

проучвателните сондажи (МС 1 и МС 2), така и от динамичните пенетрации (ДП2). Дълбочината на хлъзгателната повърхнина е не повече от 3 до 5 m. На фиг. 3 е показано разпределението на броя удари в дълбочина при динамичния пенетрационен опит (ДП2), с който е преминалата инженерно-геоложка разновидност.



Фиг. 3. Пенетрационна диаграма на ДП2

3. Стабилитетни изчисления

3.1. Параметри на земната основа и въздействия

За всички инженерно-геоложки разновидности са определени характеристични (нормативни) стойности на основните геотехнически показатели, получени от лабораторните изпитвания или от пенетрациите. Изчислителните якостни показатели на пластовете са определени съгласно изискванията на точки 20 – 25 от Приложение № 2 към чл. 5, ал. 4 на [1]. В табл. 1 са дадени основните изчислителни показатели на литоложките разновидности, заложи в моделите за оценка на склоновата устойчивост:

За всеки от методите, описани по-долу (в т. 3.2), са извършени изчисления в условията на основно и особено съчетания на товарите при актуалното състояние на масива, установено след свличането. Също така, за двата случая са разгледани и условията при максимално водонасищане.

Таблица 1. Изчислителни показатели на литоложките разновидности

| Почвена разновидност № | | 1 | 2 | 3 | |
|------------------------|---|--|-------------------------------|---------------------------------------|-------|
| Наименование | | песъчлива прахова глина, светлокафява (sasicl) | глина, тъмнокафява (cl) | грусирал скален материал (grsa) | |
| № | Физични показатели | | | | |
| 1 | обемно тегло – γ_n , kN/m ³ | | 18,50 | 18,50 | 20,50 |
| 2 | обем на порите – n | | 0,41 | 0,440 | – |
| 3 | водно съдържание – w , % | | 20,05 | 26,00 | – |
| 4 | Показатели за якост на срязване | | | | |
| | върхова | ъгъл на вътрешно триене φ , ° | 15,60 | 11,60 | 30,00 |
| | | кохезия c , kN/m ² | 27,50 | 14,30 | 0,00 |
| | остатъчна | ъгъл на вътрешно триене φ' , ° | 14,30 | 8,00 | – |
| | | кохезия c' , kN/m ² | 26,80 | 9,00 | – |

За разновидност 2 са използвани характеристичните показатели за остатъчна якост, а за всички останали пластове е използвана върховата якост.

При изчислението на устойчивостта с отразяване на сеизмичното въздействие е взето под внимание, че съгласно Еврокод 8 [2], референтното ускорение за 475-годишен период за района е $PY = 0,11g$, при почвен профил група E.

3.2. Методики и получени резултати

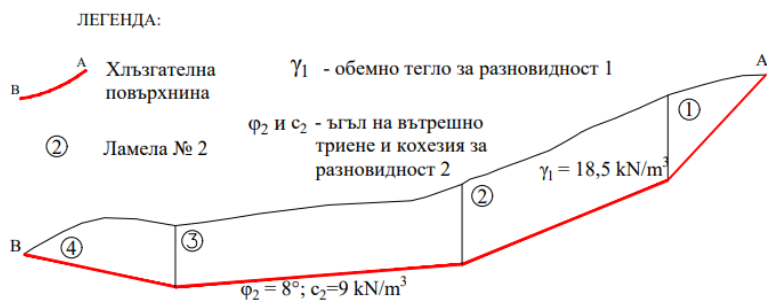
Изчисленията за устойчивост са проведени съгласно действащите нормативни изисквания за проектирането и строителството в България, отнасящи се за стабилитетни изчисления [1, 2]. Оценката на склоновата устойчивост е извършена на базата на съставения инженерно-геоложки разрез (вж. фиг. 2).

С цел повишаване надеждността на получените резултати е направено изследване на устойчивостта по няколко метода, които са подходящи за изследване на свлачища по изяснена свлачищна повърхнина с начупена форма. За целта е използвано съкратеното аналитично решение по метода на Шахуняц [6 – 8]. Устойчивостта на масива е изследвана и въз основа на метода на крайните разлики (МКР) с помощта на компютърната програма FLAC-Slope (Itasca, 2001). Използван е и специализираният софтуерен продукт GEO5 – Slope Stability за определяне на коефициентите на устойчивост по методите на Янбю и Маслов-Берер.

3.2.1. Съкратено аналитично решение по метода на Шахуняц

За целите на настоящия труд изчисленията са извършени по примера, посочен в [8].

За целта свлачището е разделено на ламели, дължината на които е съобразена с начупеността на повърхнината на хлъзгане (фиг. 4).



Фиг. 4. Изчислителен профил за разреза през централната част на свлачището

Свлачищните сили са дени под наклон β , който е приет за равен на средния наклон на терена. Всеки блок е приет за твърдо тяло, намиращо се под действието на собственото си тегло, сеизмични сили, полезен товар, хидродинамичен и хидростатичен натиск и налягането на съседните блокове.

По-долу са представени формулите, по които е изчислен коефициентът на устойчивост ($K_{уст.}$) за различните условия, въздействащи върху устойчивостта на свлачищния склон.

Първият случай разглежда условията при естествено състояние на масива – сух свлачищен масив без наличие на сеизмична сила. В този случай коефициентът на устойчивост е определен по формулата:

$$K_{уст.} = \frac{\sum T_i}{\sum H_i} = \frac{\sum \left[(G_i \cos \alpha_i \tan \phi + c l_i) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}{\sum \left[G_i \sin \alpha_i \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}, \quad (1)$$

където l_i е дължината на свлачищната повърхнина на i -тата ламела, m;

α_i – наклонът на свлачищната повърхнина на i -тата ламела, °;

β – наклонът на свлачищните сили спрямо нормалите на разделителните повърхнини, °. В случая е приет за равен на средния наклон на терена;

ϕ – ъгълът на вътрешно триене на почвата от свлачищната повърхнина, °;

c – кохезията на почвата от свлачищната повърхнина, kN/m²;

В модела са заложен остатъчните стойности на ϕ и c за разновидност 2.

G_i – теглото на i -тата ламела в случай, че в свлачищното тяло не е установено водно ниво, kN;

$$G_i = F_i \gamma_n b, \quad (2)$$

където F_i е площ на ламелата, m²;

γ_n – обемното тегло на почвата (скалата), kN/m³;

В модела е заложена стойността на γ_n за разновидност 1.

b – широчината на ламелата.

При единична ширина на ламелата – $b = 1$ m.

$$G_i = F_i \gamma_n. \quad (3)$$

Вторият случай разглежда условията при напълно водонаситен свлачищен масив без наличие на сеизмична сила. В този случай коефициентът на устойчивост е определен по формулата:

$$K_{\text{уст.}} = \frac{\sum T_i}{\sum H_i} = \frac{\sum \left[(G'_i \cos \alpha_i \tan \phi + c l_i) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}{\sum \left[G'_r \sin \alpha_i \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}, \quad (4)$$

където G' е теглото на i -тата ламела, в случай че има установено водно ниво в тялото на свлачището, с отчитане на водния подем, kN:

$$G'_i = F_i \gamma', \quad (5)$$

γ' – обемното тегло на почвата под вода, kN/m³.

За γ' е приета стойност – 10 kN/m³.

G_{ri} е теглото на i -тата ламела в случай, че има установено водно ниво в тялото на свлачището, kN;

$$G_{ri} = F_i \gamma_r, \quad (6)$$

γ_r – обемното тегло на почвата във водонаситено състояние, kN/m³.

За γ_r е приета стойност – 20 kN/m³.

Третият случай разглежда условията на сух свлачищен масив с наличие на сеизмична сила. В този случай коефициентът на устойчивост е определен по формулата:

$$K_{\text{уст.}} = \frac{\sum T_i}{\sum H_i} = \frac{\sum \left[(G_i \cos \alpha_i \tan \phi + c l_i) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}{\sum \left[(G_i \sin \alpha_i + S_i) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}, \quad (7)$$

където S_i е сеизмичната сила в i -тата ламела, в случай че в свлачищното тяло не е установено водно ниво, kN;

$$S_i = \eta C K_c R_n G_i, \quad (8)$$

C е коефициент на значимост, който се определя в зависимост от вида на съоръжението. За категория В – $C = 1,00$.

K_c – сеизмичен коефициент, определен от картата на сеизмично райониране. За въпросния район $K_c = 0,11$;

R_n – коефициент на реагиране на почвата, който е приет за равен на 0,5;

G_i – сила на тежестта на ламелата;

η – коефициент на усилване, който съгласно Национално приложение EN 1998-1/NA1 за установения тип на земната основа E, се приема равен на 1,2.

Четвъртият случай разглежда условията на водонаситен свлачищен масив с наличие на сеизмична сила. В този случай коефициентът на устойчивост е определен по формулата:

$$K_{уст.} = \frac{\sum T_i}{\sum H_i} = \frac{\sum \left[(G'_i \cos \alpha_i \tan \phi_i + cl_i) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}{\sum \left[(G'_i \sin \alpha_i + S_{ir}) \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} \right]}, \quad (8)$$

където S_{ir} е сеизмичната сила в i -тата ламела, в случай че в свлачищното тяло е установено водно ниво, kN. Изчислява се по формула (7), като вместо G_i се взема тежестта на ламелата с водно ниво – G_{ri} , изчислена по формула (5).

Определена е свлачищната сила E_i , действаща в края на всяка ламела от свлачищен масив при водонаситено състояние и при въздействие на сеизмична сила и зададен коефициент на устойчивост $K_{уст.} = 1,2$.

Свлачищната сила се изчислява по формулата:

$$E_i = \left[K_{уст.}^{доп.} (G_{ri} \sin \alpha_i + S_{ir}) - (G'_i \cos \alpha_i \tan \phi + cl_i) \right] \frac{\cos \phi}{\cos(\alpha_i - \beta_i - \phi)} + E_{i-1}. \quad (9)$$

Основните компоненти на формулите за определяне на коефициента на устойчивост на свлачищен масив в сухо състояние при въздействие на сеизмична сила, успоредно на хлъзгателната повърхнина, се нанасят в таблица (същите като в случай 4).

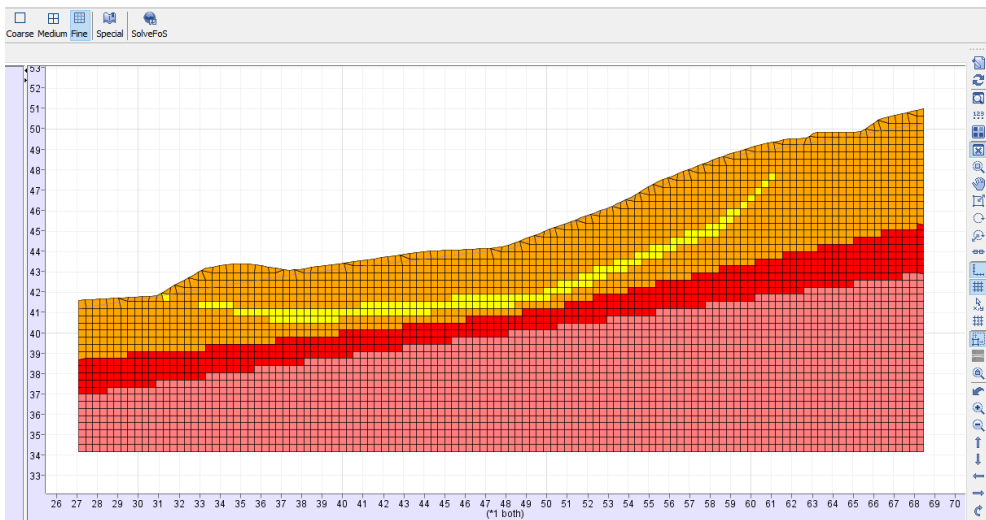
За улеснено приложение на метода е разработен алгоритъм, който се изпълнява чрез известното Microsoft приложение EXCEL. Изчисленията за устойчивостта на склона по съкратеното аналитично решение на Шахунянец и получените резултати са представени в табл. 2.

Таблица 2. Изчисления за устойчивостта на склона

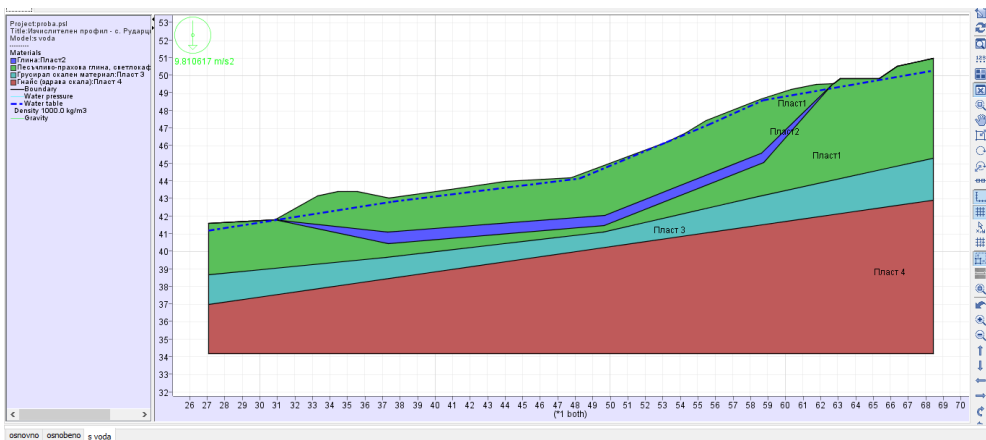
| Входни данни | | | | | | | | | |
|---|---|--------------|-----------------------|----------|----------------------------|------------|--------------------|----------------|------------|
| $\gamma_n = 18,5 \text{ kN/m}^3$ | $\phi = 8^\circ$ | $R = 0,5$ | | | | | | | |
| $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ | $c = 9 \text{ kPa}$ | $K_c = 0,11$ | | | | | | | |
| $\gamma^W = 10 \text{ kN/m}^3$ | $\beta = 13^\circ$ | $\eta = 1,2$ | | | | | | | |
| $\gamma^r = 20 \text{ kN/m}^3$ | | | | | | | | | |
| Изчисления | | | | | | | | | |
| Ламела № | α [°] | l [m] | A [m ²] | G [kN] | G' [kN] | G_r [kN] | S_{ir} [kN] | S'_{ir} [kN] | E_i [kN] |
| 1 | 47 | 6,0 | 7,50 | 138,75 | 75,00 | 150,00 | 9,16 | 9,90 | 90,71 |
| 2 | 22 | 9,6 | 30,70 | 567,95 | 307,00 | 614,00 | 37,48 | 40,52 | 287,05 |
| 3 | 7 | 12,4 | 30,00 | 555,00 | 300,00 | 600,00 | 36,63 | 39,60 | 268,49 |
| 4 | -7 | 6,6 | 11,00 | 203,50 | 110,00 | 220,00 | 13,43 | 14,52 | 168,12 |
| Резултати | | | | | | | | | |
| Коефициент на устойчивост $K_{уст.} =$ | при естествено водно ниво (без вода) | | | | във водонаситено състояние | | | | |
| | без сеизмична сила | | със сеизмична сила | | без сеизмична сила | | със сеизмична сила | | |
| | 1,44 | | 1,10 | | 1,13 | | 0,86 | | |

3.2.2. Метод на крайните разлики

Методът на крайните разлики (МКР) е един от най-универсалните числени методи [5]. Той се основава на това, че непрекъснатите разпределения на параметрите, характеризиращи процеса, са съвкупност от дискретни стойности във фиксирани точки – възли. В резултат на производните в основните уравнения и гранични условия с достатъчна точност могат да се заменят (апроксимират) съотношения на крайни разлики, съдържащи стойности на мрежова функция в няколко възли от мрежата; при това крайната цел на задачата е да се заменят изходните диференциални уравнения със система алгебрични уравнения. През последните години голям брой изследвания в областта на геодинамичните процеси и явления са извършени въз основа на метода на крайните разлики и неговото реализиране, например с компютърната програма Flac (Itasca, 2001). За целите на настоящия труд е използвано приложението на метода на крайните разлики (FLAC-Slope). На фиг. 5 и фиг. 6 са представени мрежата на крайните разлики и геомеханичният модел с параметрите на свлачището, използвани в изчисленията.

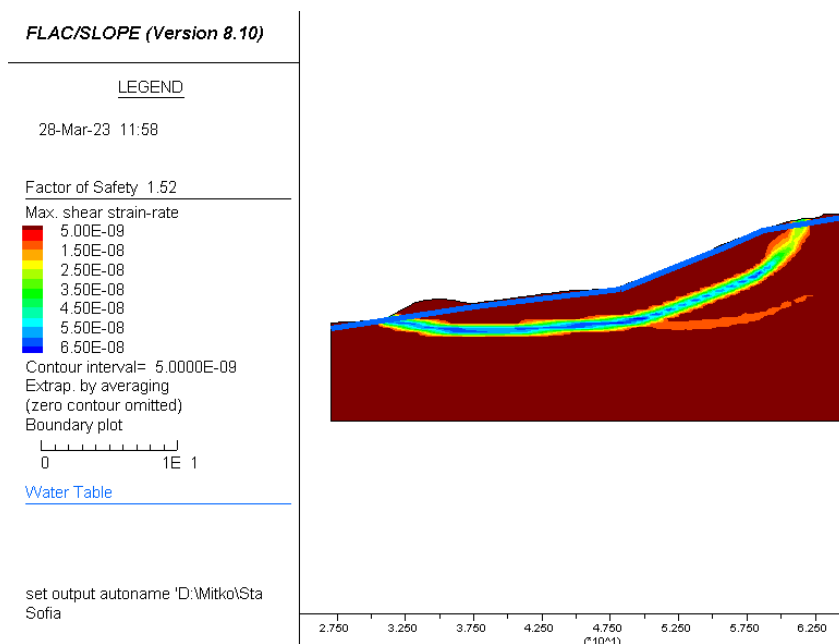


Фиг. 5. Мрежа на крайните разлики на изчислителния профил



Фиг. 6. Геомеханичен модел на изчислителния профил на откоса

На фиг. 7 са показани резултати от моделирането на водонаситен откос с наличие на сеизмична сила. Определеното положение на зоната на деформациите посредством моделирането е близко до положението на фиксираната хлъзгателна повърхнина по време на инженерно-геоложкото проучване.



Фиг. 7. Резултати от моделирането по метода на крайните разлики (цветната скала показва степента на максималните деформации)

Резултатите от моделирането на устойчивостта на откоса по МКР в четирите случая (както в т. 3.1.1) са представени в табл. 3.

Таблица 3. Резултати от изчисления за устойчивостта на склона по МКР

| Коефициент на устойчивост $K_{уст.} =$ | При естествено водно ниво (без вода) | | Във водонаситено състояние | |
|---|---|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | без сеизмична сила | със сеизмична сила | без сеизмична сила | със сеизмична сила |
| | 2,30 | 2,20 | 1,60 | 1,52 |

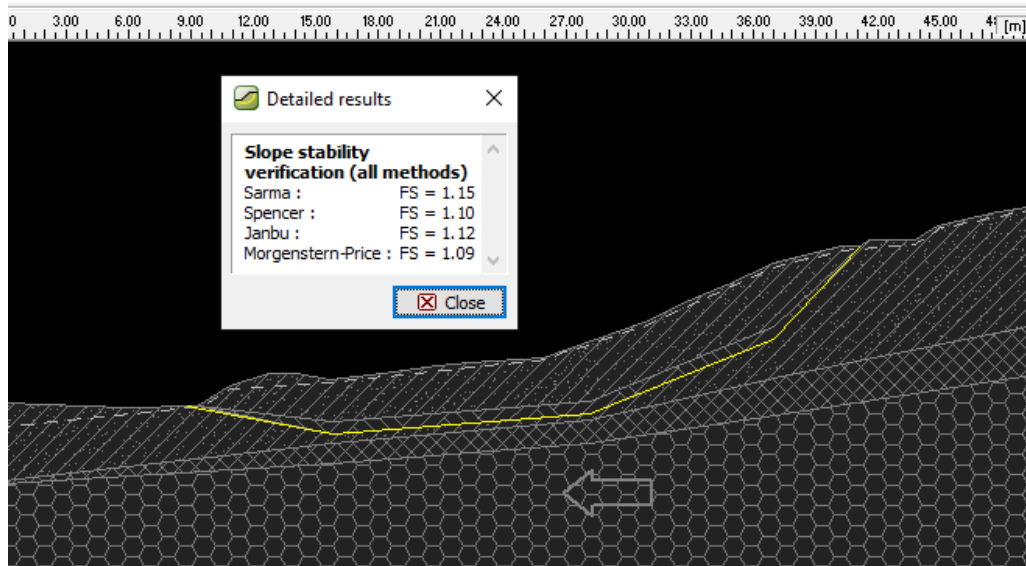
3.2.3. Други методи за анализ на устойчивостта при начупена хлъзгателна повърхност

Освен посочения по-горе метод (по Шахунянц), за изчисление на слоновата устойчивост при използване на начупена (полигонална) хлъзгателна повърхнина, е използван и специализиран софтуерен продукт Geo5 – Slope Stability, с определяне на коефициентите на устойчивост по методите на Ябню, Сарма, Моргенщерн-Прайс и Спенсър. Изчислителните постановки за тези методи са описани в [9]. Както и при метода на Шахунянц, решенията се състоят в намиране на състоянието на гранично равновесие на силите, действащи върху масива над хлъзгателната повърхност. За да

може да се определят тези сили, почвата над хлъзгателната повърхност се разделя на ламели (вж. фиг. 4). По правило ламелите се отсичат вертикално, но това не е предпоставка, например методът Сарма работи с наклонени ламели.

Програмата дава възможност да се определят позициите на точките на приложение на отделните сили, както и наклоните на силите между ламелите. Равновесното решение след това води до итеративни процедури, при които предварително избраните стойности трябва както да позволяват да се постигне баланс на силите, така и да осигуряват кинематичната допустимост на полученото решение.

На фиг. 9 е представен геомеханичният модел на свлачището, използван в изчисленията с резултатите от моделирането на водонаситен откос с наличие на сеизмична сила.



Фиг. 9. Геомеханичен модел и резултати от моделирането с програмата Geo5

Резултатите от моделирането на устойчивостта на откоса с програмата GEO5 по методите на Ябню, Сарма, Моргенщърн-Прайс и Спенсър, в различните изчислителни случаи са представени в таблица 4.

Таблица 4. Резултати от изчисления за устойчивостта на склона с GEO 5

| Използван метод | K _{уст.} при естествено водно ниво (без вода) | | K _{уст.} във водонаситено състояние | |
|------------------|---|------------|--|------------|
| | без сеизм. | със сеизм. | без сеизм. | със сеизм. |
| Сарма | 2,10 | 1,46 | 1,65 | 1,15 |
| Спенсър | 2,08 | 1,42 | 1,60 | 1,10 |
| Ябню | 2,11 | 1,44 | 1,64 | 1,12 |
| Моргенщърн-Прайс | 2,05 | 1,41 | 1,59 | 1,09 |

4. Заключение

Моделирането на устойчивостта на склона по фиксираната хлъзгателна повърхнина показва, че разликите в коефициента на устойчивост, получени по различните методи, в някои случаи надвишават 50 %. Това значително разсейване на резултатите от една страна се дължи на теоретичните неточности на методите, а от друга – на несъответствието им с разнообразната природна обстановка и неотчитането на някои важни природни фактори в изходните изчислителни схеми.

При всички използвани решения в естествено състояние (без водно ниво и без сеизмично въздействие) откосят се намира в устойчиво положение и коефициентите на сигурност превишават минимално допустимия коефициент от 1,25, съгласно [1].

Под влиянието на сеизмично въздействие във водонаситено състояние условието за удовлетворяване на минимален коефициент на сигурност от 1,15 е изпълнено единствено при решението по МКР.

Стойностите на коефициента на устойчивост, получени с програмата GEO5, в най-неблагоприятния случай се изменят между 1,09 и 1,15.

Най-ниският коефициент на устойчивост е получен при използването на съкратено аналитично решение по метода на Шахунянец, в условия на водонаситен свлачищен масив с отчитане на сеизмичното въздействие. Стойността на коефициента на устойчивост в този случай е 0,89.

По принцип предимството на МКР се изразява в по-пълното отчитане на напрегнатото и деформирано състояние на масива, което при по-голяма част от конвенционалните методи е недостатък, но в този случай, тъй като е налице активно свлачище, най-достоверни изглеждат най-ниските стойности на коефициента на устойчивост, получени по консервативното аналитично решение на Шахунянец.

За гарантиране на устойчивостта на пътя се препоръчва проектиране и изпълнение на укрепителни мероприятия, осигуряващи минимално допустим коефициент на устойчивост. За оразмеряване на укрепителната конструкция може да се използват стойностите на свлачищните сили, посочени в табл. 2.

Въз основа на изследванията следва да се отбележи, че комплексното използване на различните методики позволява да се повиши достоверността на оценката на устойчивостта на свлачището.

ЛИТЕРАТУРА

1. Naredba № 12 от 3 юли 2001 г. на MRRB за проектиране на geozashitni stroezhi, sgradi i saorazhenia v svlachishtni rayoni.
2. BDS EN 1998-1/NA (Evrokod 8): Projektirane na konstruktsiite za seizmichni vazdeystvia. Chast 1: Obshti pravila, seizmichni vazdeystvia i pravila za sgradi.
3. BDS EN-1997 (Evrokod 7): Geotehnicheskoproektirane.
4. *Angelova, R.* 2015. Environmental Geology and Geotechnics.
5. *KsyaoLin, Li.* 2019. Izbor na metodi za otsenka na ustoychivostta na raboten bord i vazmozhnost za tehnologichno vazdeystvie. Avtoreferat na disertatsia. MGU, 73 s.
6. *Angelov, K.* 1997. Inzhenerna geodinamika. 237 s.
7. *Angelov, K.* 1988. Rakovodstvo za uprazhnenia po inzhenerna geodinamika. 141 s.
8. *R. Varbanov, Bozhinova, A., Filipov, K., Nankin, R.* Kursovi zadachi po inzhenerna geologia i hidrogeologia. 92 s.
8. <http://publicatioAnethics.org/flowcharts>, poseten na 12.12.2017.
9. GEO5 – User's Guide. 2017.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF DIFFERENT ASSESSMENT METHODS OF LANDSLIDE RESISTANCE ON A BROKEN SLIDE SURFACE

D. Fotev¹

Keywords: landslide, polygonal slip surface, safety factor

ABSTRACT

The paper is based on engineering-geological investigations of a landslide on the road Pernik – Rudartsi – Vitoshko Farm.

A complex methodology for the study of slope stability, based on a comparison of the results obtained by the different methods is discussed.

¹ Dimitar Fotev, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dimitarfotev@abv.bg