

Інтегрована методика оцінки фізико-механічних характеристик флішу Карпат з використанням геофізики та числового FEM/LEM-аналізу стійкості схилів

Людмила БОНДАРЕВА¹, Василь БЕГАН²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних сил, Київ, Україна, 03037,

¹bondareva.lo@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-7392-814X

²began.vasya@gmail.com, orcid.org/0009-0008-0357-5762

DOI: 10.32347/0475-1132.51.2025.26-35

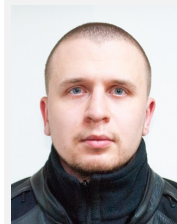
Анотація. Карпатський фліш є однією з найбільш складних у геотехнічному сенсі геологічних товщ, що характеризується дуже змінною структурою, чергуванням пісковиків, алевролітів і сланців, підвищеною тріщинуватістю та вираженою анізотропією механічних властивостей. Такі особливості значно ускладнюють визначення фізико-механічних параметрів та прогнозування стійкості схилів.

У роботі представлено комплексний підхід до оцінки механічної поведінки флішових порід, що поєднує результати буріння, статичного зондування (CPT/CPTu), геофізичних методів (сейсмоакустика, електророзвідка), лабораторних досліджень та числового моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). На основі інтерпретації геофізичних досліджень виділено категорії скельних порід за ступенем вивітрювання та структурного порушення, для яких визначено параметри міцності для моделей ґрунтового середовища Нокс–Браун та Mohr–Coulomb.

Розрахункові параметри верхніх шарів вивітреного флішу уточнені шляхом зворотного аналізу. Для розрахунку використано два підходи: перший - із застосуванням підходу ϕ -с редукції в середовищі Plaxis 2D, та аналітичний розрахунок методом Бішоп у програмі GEO-5. Зворотній аналіз виконано при умові, що схил знаходиться на межі рівноваги, тобто параметри підбрано так, щоб коефіцієнт стійкості дорівнював 1. Порівняння результатів МСЕ та аналітичних розрахунків продемонструвало узгодженість між підходами та підтвердило достовірність підібраних параметрів для різних сценаріїв формування зсувів, як поверхневих



Людмила БОНДАРЕВА
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Василь БЕГАН
аспірант кафедри
геотехніки

так і глибоких. Варто зауважити, що зворотній аналіз виконано для нормативних значень міцнісних параметрів, тобто без коефіцієнтів, що використовуються у Єврокоді 7, для розрахунку стійкості, тобто для підходу DA3 (design approaches 3).

Отримані результати показують, що комплексне поєднання даних геофізичної розвідки, польових та лабораторних вишукувань і числового моделювання дозволяє визначати механічні властивості флішу та суттєво підвищує якість прогнозування стійкості схилів у Карпатському регіоні. Представлена методика може бути використана при проектуванні та оцінці ризиків для природних схилів, де присутні флішові товщі.

Ключові слова. Карпатський фліш, числове моделювання, зворотний розрахунок (back-analysis), анізотропія, стійкість схилів, геофізичні дослідження.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Карпатський фліш є складною осадовою товщею, сформованою чергуванням шарів пісковиків, алевролітів і глинистих сланців. Ці породи зазвичай характеризуються високою тріщинуватістю, тектонічною порушеністю та інтенсивним вивітрюванням у приповерхневій зоні. Така геологічна будова призводить до значної анізотропії фізико–механічних властивостей і суттєво ускладнює виконання інженерно–геотехнічних оцінок.

Однією з головних проблем при дослідженні флішу є **визначення надійних механічних параметрів**, які достовірно відображають поведінку масиву в природніх умовах. Лабораторні випробування зразків часто дають неточні результати через порушення структури при відборі, масштабні ефекти та неоднорідність порід.

У зв'язку з цим виникає потреба в **комплексному підході**, який поєднує польові методи (зондування, геофізичні дослідження, колонкове буріння) із подальшим числовим моделюванням для уточнення параметрів. На основі отриманих даних виділяються окремі геотехнічні зони флішу різного ступеня вивітрювання та структурного порушення. Верхня, найбільш деградована частина товщі, часто розглядається як єдиний слабкий шар із пониженими показниками міцності.

Для врахування складності структури флішу та відсутності прямих даних про параметри міцності застосовано **зворотний розрахунок (back-analysis)**. Його метою є підбір таких параметрів, за яких коефіцієнт стійкості схилу досягає граничного стану ($FoS = 1.0$), що відповідає рівновазі масиву під дією існуючих навантажень. Такий підхід дозволяє отримати характеристики міцності та деформаційні параметри флішу для подальших розрахунків та проектування протизсувних споруд.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблематика інженерно-геологічного вивчення карпатського флішу привертала

увагу багатьох дослідників, зокрема у контексті стійкості схилів, побудови моделей масиву та визначення фізико-механічних параметрів порід.

У статті (Bestyński et al., 2018) представлено можливість використання комплексних геофізичних досліджень та геотехнічної класифікації для визначення геологічної структури та оцінки стійкості карпатських зсувів. Вказано на можливість використання сейсмічних досліджень для визначення геометрії схилу зсуву, необхідної для аналізу обчислювальної стійкості. У статті автори представляють можливість геотехнічної класифікації флішової основи KFG за геофізичними параметрами у зв'язку з класифікацією SMR, запропонованою М. Романом, для швидкої кількісної оцінки стійкості флішового схилу. У книзі (Duncan et al., 2014) описані методи аналізу стійкості схилів та механізми руйнування територій складених флішовими відкладеннями. У одній з найвідоміших класичних книг (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996) описано формування напружено-деформованого стану при зсувних процесах, параметри міцності, лабораторні та польові методи визначення, а також проблеми стійкості схилів і укосів.

У статті (Marinos et al., 2005) розглядається Geological Strength Index (GSI) — система класифікації гірських порід, що використовується для оцінки їх міцності та деформаційних властивостей у геотехнічних розрахунках. Автори пояснюють принципи побудови GSI та його зв'язок із характеристиками масиву порід (структурою, ступенем вивітрювання, станом, показують практичні приклади застосування GSI у проектуванні тунелів, відкритих виробок і укосів; обговорюють обмеження методу, зокрема суб'єктивність оцінки та можливі похибки при використанні в неоднорідних або сильно порушених масивах. Стаття узагальнює досвід застосування GSI та дає рекомендації щодо його коректного використання в інженерній геології та геотехніці.

У публікації (Bishop, 1955) автор розглядає метод аналізу стійкості схилів, заснований на припущенні, що потенційна поверх-

ня зсуву має круглу форму також автор вводить і обґрунтовує метод Бішопа спрощений (Bishop's Simplified Method) — один із найпоширеніших ліміт-статичних підходів для визначення коефіцієнта стійкості схилів; враховує вплив міжблокових сил, роблячи метод точнішим порівняно з попередніми підходами (наприклад, методом Фелленіуса); подає математичний вивід рівняння рівноваги та ітераційний алгоритм розрахунку; демонструє ефективність методу на практичних прикладах.

У публікації (Grozic, 2009) розглядається фліш, як складний, шаруватий комплекс гірських порід (чергування пісковиків, алевролітів, глин), який створює значні труднощі для геотехнічного проектування. Автор аналізує: геологічні та механічні характеристики флішу, включно з анізотропією, слабкими прошарками, тріщинуватістю, неоднорідністю; поведінку флішу під навантаженням, його міцність, деформаційні властивості та чутливість до розмокання; механізми зсувів, які часто виникають у флішових товщах через слабкі контактні поверхні та різномірність порід; складності в інженерній практиці: будівництво доріг, фундаментів, тунелів, укосів у флішових районах; рекомендації щодо оцінки стійкості схилів та підходи до безпечного проектування. Стаття узагальнює ключові проблеми, які виникають при роботі з фліше-вими масивами, та підкреслює необхідність уважного геологічного аналізу й спеціальних методів розрахунку.

Попри наявність значного обсягу даних про будову флішу, питання визначення надійних механічних характеристик залишається відкритим. Існуючі методики, як правило, не забезпечують узгодження результатів лабораторних, геофізичних і розрахункових даних. Це зумовлює необхідність застосування комплексного підходу, що поєднує різні типи досліджень із подальшим калібруванням параметрів за допомогою зворотного числового аналізу.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є показати можли-

вості визначення фізико-механічних параметрів карпатського флішу, необхідних для оцінки стійкості схилів і розрахунку інженерних споруд, що розташовані в межах флішових товщ. Через складну геологічну будову, високу тріщинуватість та значну неоднорідність флішу традиційні лабораторні методи часто не забезпечують отримання репрезентативних характеристик. Тому у роботі реалізовано комплексний підхід, який поєднує результати колонкового буріння, дані статичного зондування (CPT) та геофізичних досліджень (зокрема сейсмоакустичних і електророзвідувальних методів) для виділення окремих геотехнічних шарів і їх категоризації за станом міцності.

На основі узагальнених даних побудовано спрощену стратиграфічну модель масиву, у якій верхня зона, що характеризується високим ступенем вивітрювання та структурного порушення, розглядається як єдиний ослаблений шар, а глибші скельні горизонти поділяються на шари різних категорій міцності. Для визначення розрахункових параметрів міцності застосовано зворотний числовий аналіз (back-analysis) методом скінчених елементів із використанням підходу ϕ - c редукції, що реалізована в середовищі Plaxis 2D. Під час розрахунку параметри зчеплення та кута внутрішнього тертя поступово зменшувалась до моменту досягнення коефіцієнта стійкості $FoS \approx 1.0$, який відповідає граничному стану рівноваги схилу.

Для перевірки коректності отриманих результатів виконано незалежний аналітичний розрахунок стійкості схилу за спрощеним методом Бішопа. Порівняння результатів MSE і аналітичних розрахунків дозволило підтвердити коректність обраних параметрів та характер очікуваних поверхонь ковзання — як у межах вивітреної зони, так і вздовж структурно послаблених шарів.

Отримані результати демонструють ефективність поєднання геофізичних, бурових і числових методів для достовірного визначення параметрів флішу та можуть бути використані при оцінці стійкості природних і техногенних схилів у межах Карпатського

регіону.

МЕТОД ϕ -с РЕДУКЦІЇ

Метод ϕ -с редукції є одним із найбільш поширених числових підходів для визначення коефіцієнта стійкості схилів у розрахунках методом скінченних елементів. Його суть полягає у поступовому зменшенні параметрів міцності ґрунту або порід — кута внутрішнього тертя (ϕ) та питомого зчеплення (c) — до моменту, коли модель втрачає стійкість, тобто перестає збігатися розв'язок рівнянь рівноваги.

Такий підхід реалізований у програмних комплексах Plaxis 2D, MIDAS GTS NX, ZSoil, Abaqus та інших. Метод ґрунтується на поступовому зниженні міцнісних характеристик матеріалу за допомогою коефіцієнта зниження (Mobilized Strength Factor, Msf). Під час розрахунку параметри міцності змінюються відповідно до співвідношень:

$$c_{\text{mobilized}} = \frac{c'}{M_{\text{sf}}}, \quad (1)$$

$$\tan(\phi_{\text{mobilized}}) = \frac{\tan(\phi')}{M_{\text{sf}}}, \quad (2)$$

де c' — ефективне зчеплення, ϕ' — ефективний кут внутрішнього тертя, M_{sf} — коефіцієнт зниження міцності.

Обчислення виконується ітераційно: на кожному кроці M_{sf} зростає, що призводить до поступового зниження міцності матеріалу. У певний момент система стає нестійкою, і числове рішення більше не збігається. Значення M_{sf} при втраті збіжності приймається як коефіцієнт стійкості схилу (FoS):

$$\text{FoS} = M_{\text{sf}}^{\text{failure}}, \quad (3)$$

Цей підхід має кілька суттєвих переваг:

- дозволяє враховувати реальний напружено-деформований стан у зоні поте-

нційного зсуву;

- не потребує попереднього припущення про форму поверхні ковзання;
- може відображати нелінійну поведінку матеріалів і вплив анізотропії;
- легко поєднується з моделями Hoek–Brown, Mohr–Coulomb, Hardening Soil тощо.

У даній роботі метод ϕ -с редукції реалізовано в середовищі Plaxis 2D. Модель ґрунтового масиву побудована на основі стратиграфічних та геофізичних даних, які дозволили виділити окремі шари флішу за категоріями міцності (III, IV, V). Для кожного сценарію розглядалися два можливих механізми руйнування:

1. **Поверхневий зсув** у межах вивітреної зони флішу;
2. **Глибинний зсув** уздовж структурно ослаблених шарів.

На кожному етапі ϕ -с редукції здійснювався контроль за розвитком деформацій, ізолініями пластичних зон та зміщеннями ґрунтового масиву. Стан втрати стійкості визначався моментом, коли обчислення в Plaxis 2D втрачало збіжність, а переміщення у моделі починали необмежено зростати.

Отримане критичне значення M_{sf} інтерпретовано як фактичний коефіцієнт стійкості FoS, що відображає граничний стан рівноваги. На основі цього підходу було виконано калібрування параметрів зчеплення c' та кута внутрішнього тертя ϕ' до досягнення умови $\text{FoS} \approx 1.0$, що відповідає сучасному напружено-деформованому стану схилу.

Таким чином, метод ϕ -с редукції у поєднанні з даними польових і геофізичних досліджень дозволяє не лише оцінити поточну стійкість схилу, але й уточнити параметри міцності флішу, які характеризують його поведінку в природному заляганні.

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД БІШОПА BISHOP'S SIMPLIFIED METHOD (LEM)

Спрощений метод Бішопа — це класичний аналітичний підхід для визначення коефіцієнта стійкості схилу.

Метод ґрунтується на поділі масиву, який може зсунутися, на вузькі вертикальні слайси (елементи). Для кожного елемента враховується його вага, параметри міцності порід і поровий тиск. Потім виконується підсумовування сил вздовж потенційної поверхні ковзання.

У цьому методі форма поверхні ковзання задається як частина кола, що є типовим припущенням для багатьох реальних зсувів, у тому числі й для флішових товщ.

Коефіцієнт стійкості визначається за формулою:

$$FoS = \frac{\sum [c' \cdot b + (W - u \cdot b) \tan \phi'] \cdot 1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

де: W – вага елемента, b – ширина елемента, u – поровий тиск, α – кут між основою елемента та горизонталлю, m – коефіцієнт, що враховує взаємодію між вертикальною та дотичною складовими сил, c', ϕ' – параметри міцності (питоме зчеплення та кут внутрішнього тертя).

В даному дослідженні метод Бішопа застосовано для перевірки результатів FEM, отриманих методом ϕ -с редукції. Для коректного порівняння аналізували ті самі сценарії:

- **Мілкий зсув** у межах вивітреної зони флішу.
- **Глибинний зсув** вздовж слабого структурного контакту.

Геометрію потенційних поверхонь ковзання брали з МСЕ–результатів, щоб оцінити відповідність між числовим та аналітичним підходами.

Отримані значення FoS для обох сценаріїв виявилися близькими до 1,0, яке було досягнуто методом ϕ -с редукції. Це підтвердило точність підібраних параметрів міцності та правильність форм потенційних поверхонь ковзання.

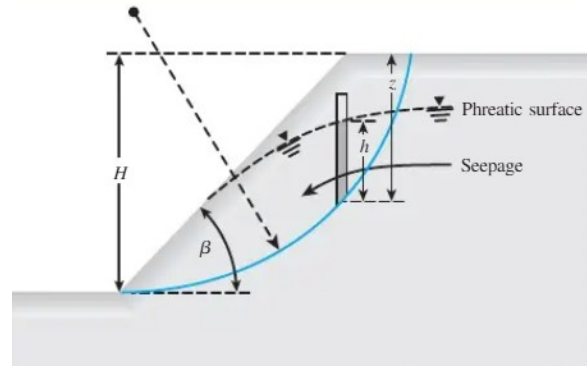


Рис.1. Схема до аналітичного розрахунку методом Бішопа

Fig.1. Diagram for Analytical Calculation Using Bishop's Method

Таким чином метод Бішопа було використано як надійний інструмент для перевірки результатів числового моделювання, щоб підвищити загальну достовірність оцінки стійкості схилу та підбору параметрів міцності флішових порід.

КАТЕГОРИЗАЦІЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОФІЗИЧНИХ ДАНИХ

Флішові товщі Карпат характеризуються значною мінливістю міцнісних властивостей, що зумовлено різними ступенями вивітрювання, тектонічного порушення та зміненої структури пісковиків і сланців. Для коректного моделювання поведінки масиву необхідно виділити окремі геотехнічні категорії скельних порід, які відображають їхній фактичний стан.

У даному дослідженні категоризацію виконано на основі комплексної інтерпретації:

- Геофізичних даних;
- Результатів колонкового буріння;
- Емпіричних залежностей на основі моделі Hoek–Brown;
- Лабораторних досліджень.

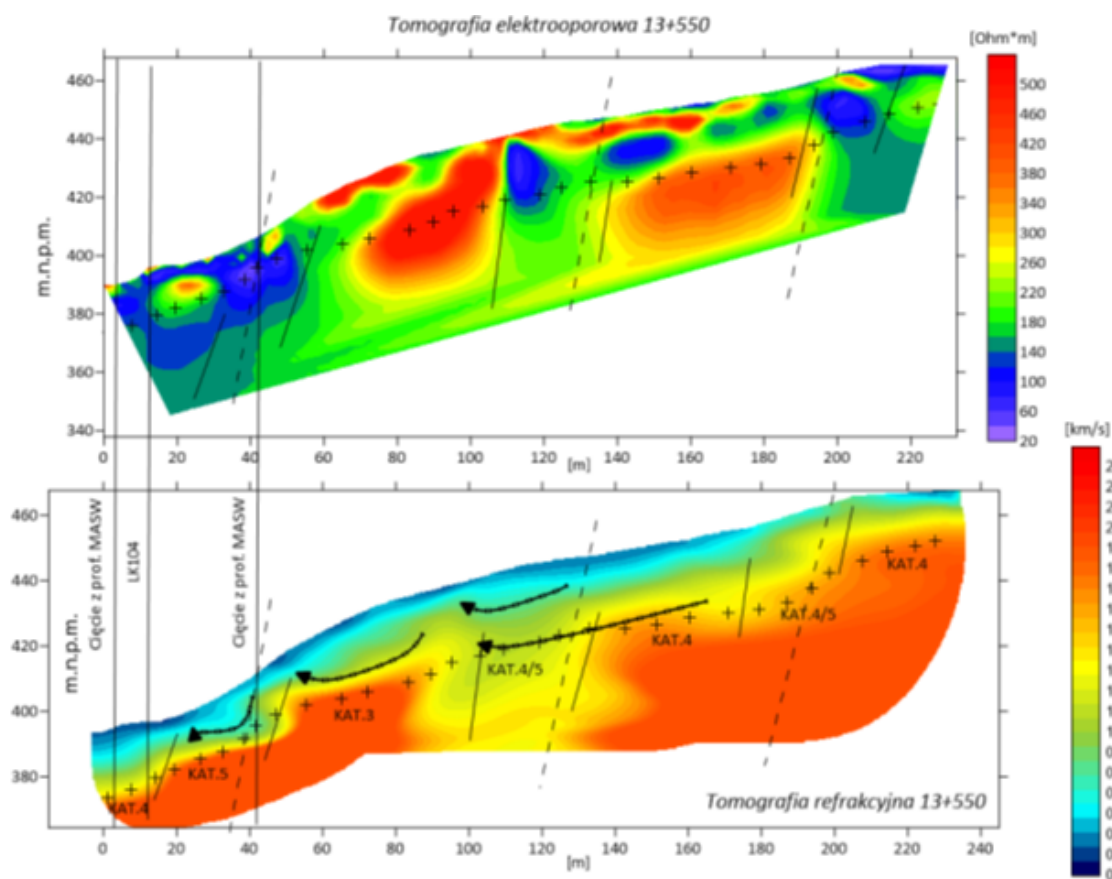


Рис.2. Приклад поділу скелі на категорії на основі геофізичних даних

Fig.2. Example of Rock Classification into Categories Based on Geophysical Data

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СХИЛУ ЗА РЕ- ЗУЛЬТАТАМИ FEM ТА LEM

У процесі числового моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) та при перевірці аналітичним методом було встановлено, що характер механізму руйнування суттєво залежить від вибору фізико-механічних параметрів ґрунту. Підбір параметрів виконувався з метою отримання такої моделі, у якій проявляється або поверхневий, або глибинний зсувний процес. Такі варіанти є типовими для реальних схилів зі стратифікованою структурою (слабкі шари зверху, міцніші внизу) та добре відтворюється числовим моделюванням за умови правильного підбору параметрів міцності та деформативності.

ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗСУ- ВУ МЕТОДОМ FEM ТА LEM

Поверхневий зсув формується у верхній

(слабкій) зоні ґрунту, яка має знижені параметри міцності, порівняно з нижніми шарами. Такий зсув було отримано за рахунок збільшення кута внутрішнього тертя та зменшення питомого зчеплення.

У FEM-аналізі поверхневий зсув проявився як локальна пластична зона, що утворюється у верхній частині схилу та прогресує вниз по схилу по відносно короткій та мілкій призмі ковзання. Під час зниження ϕ та c у процесі $\phi - c$ reduction пластичні деформації концентрувалися саме в цій зоні, поки не формувався замкнений шлях ковзання — після чого коефіцієнт стійкості M_{sf} досягав критичного значення.

Метод Бішопа для тих же параметрів показав аналогічну форму ковзної поверхні: коротка некругла або близька до круглої поверхня з виходом на денну поверхню в межах верхнього шару. Отримане значення коефіцієнта стійкості добре корелювало з результатами FEM-моделі, що підтверджує відповідність обраних параметрів

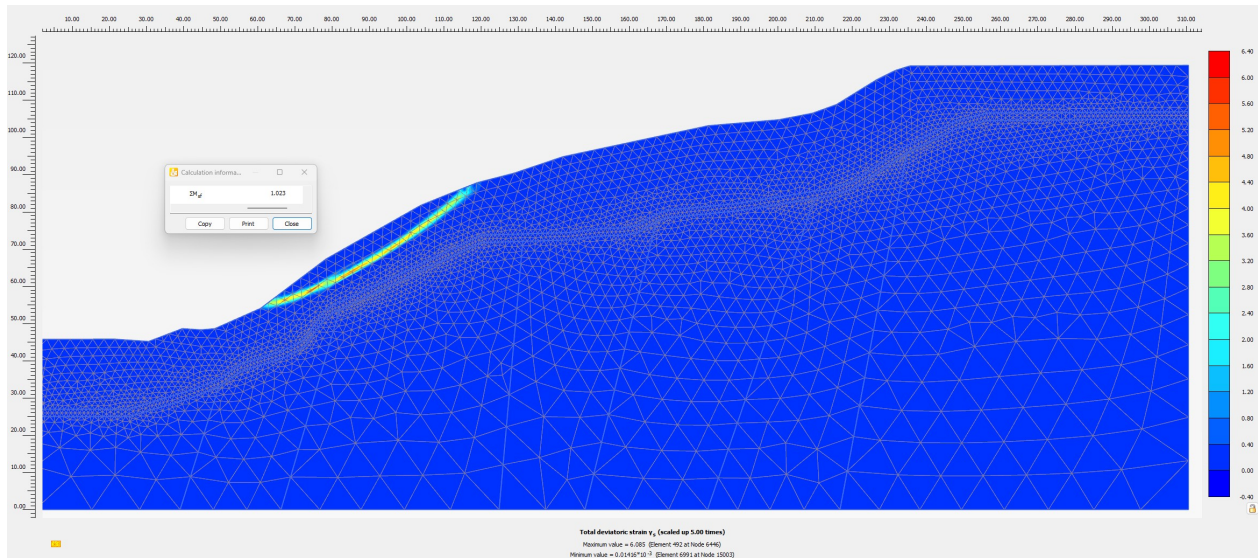


Рис.3. Лінія ковзання схилу при варіанті поверхневого зсуву методом FEM
Fig.3. Slope Slip Surface for the Surface Failure Scenario Using the FEM Method

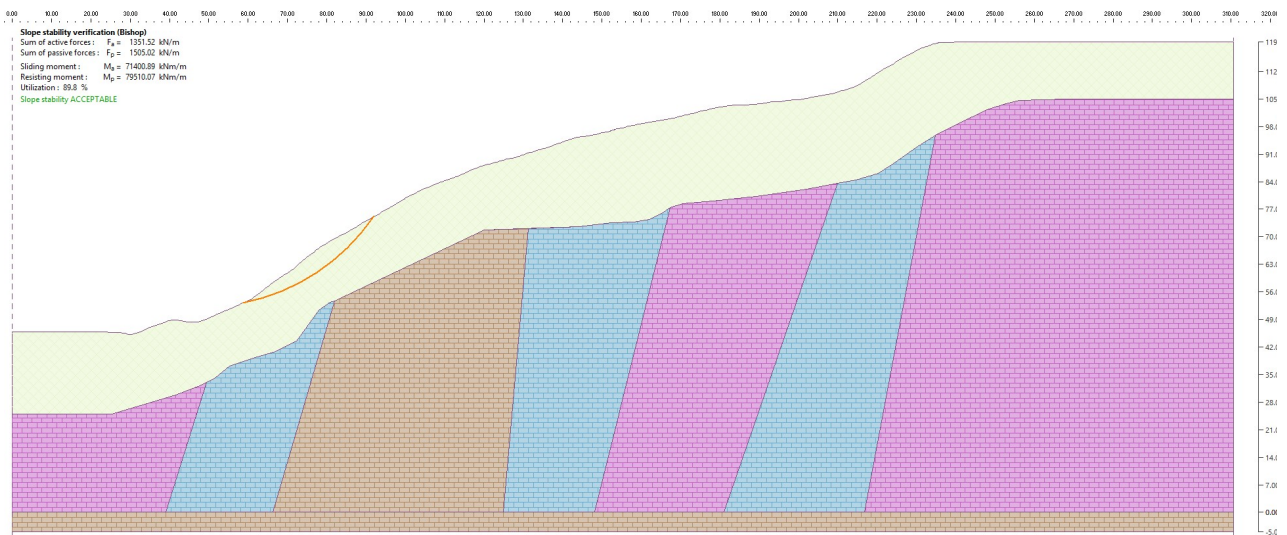


Рис.4. Лінія ковзання схилу при варіанті поверхневого зсуву методом LEM
Fig.4. Slope Slip Surface for the Surface Failure Scenario Using the LEM Method

ФОРМУВАННЯ ГЛИБИННОГО ЗСУВУ МЕТОДОМ FEM ТА LEM

Глибинний зсув формується тоді, коли слабкість матеріалу або геометрії схилу проявляється не лише у верхніх, а й у середніх та нижніх шарах, що призводить до розвитку великої, протяжної поверхні ковзання. У каліброваних моделях це досягалося шляхом встановлення більшого значення питомого зчеплення та меншого кута внутрішнього тертя для верхніх шарів, за яких сумарна стійкість масиву падала до

рівня, що дозволяє формування глибокої, майже круглої або комбінованої поверхні ковзання.

У FEM-моделі при поетапному зменшенні ϕ та c зона пластичних деформацій почала формуватися не на поверхні, а в основній товщі схилу, розростаючись у напрямку вниз і назад у бік вершини.

Коли параметри досягли критичного стану, у моделі з'явився замкнений пластичний шлях, який проходив на значній глибині, захоплював декілька шарів та виходив на поверхню в нижній частині укосу.

Метод Бішопа для тих же параметрів показав утворення глибокої круглоциліндричної поверхні ковзання, яка:

- перетинає кілька шарів із різними параметрами,
- має більшу довжину дуги ковзання,
- виходить на схил значно нижче точ-

ки ініціації руйнування.

Розрахований коефіцієнт стійкості добре корелював із FEM-значенням, підтверджуючи, що обрана комбінація параметрів дійсно моделює глибинний зсув.

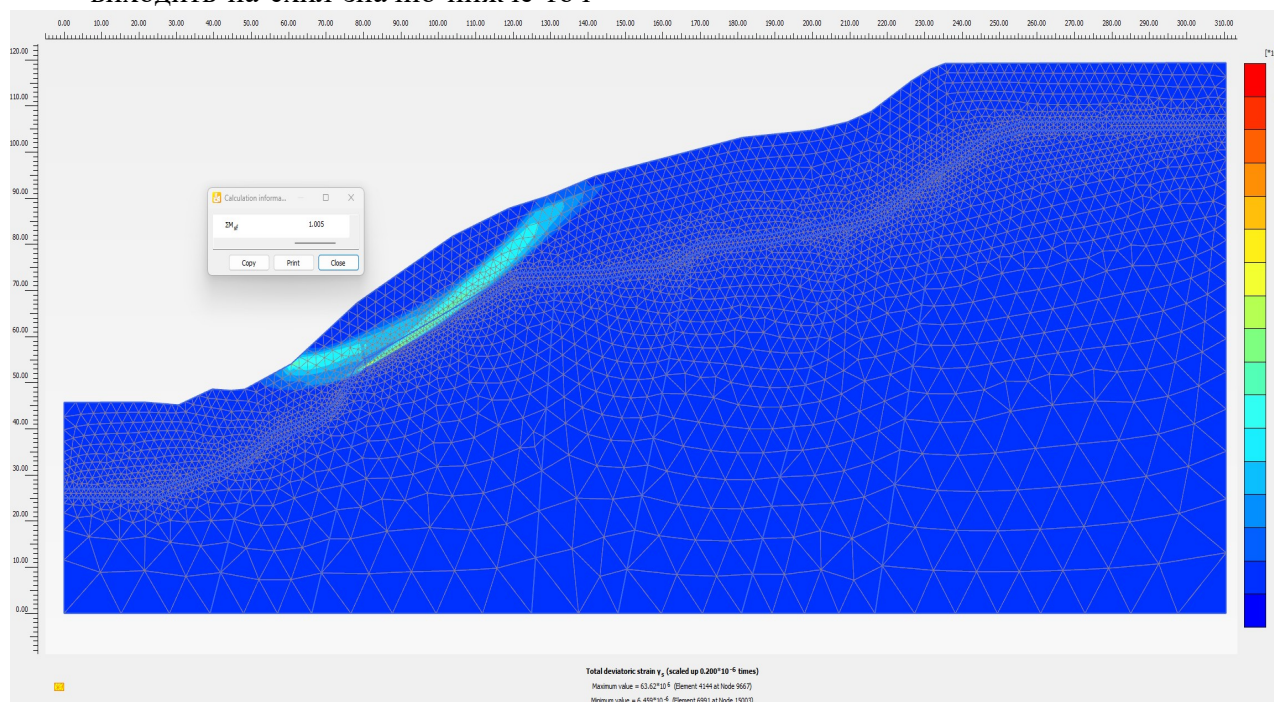


Рис.5. Лінія ковзання схилу при варіанті глибинного зсуву методом FEM

Fig.5. Slope Slip Surface for the Deep-Seated Failure Scenario Using the FEM Method

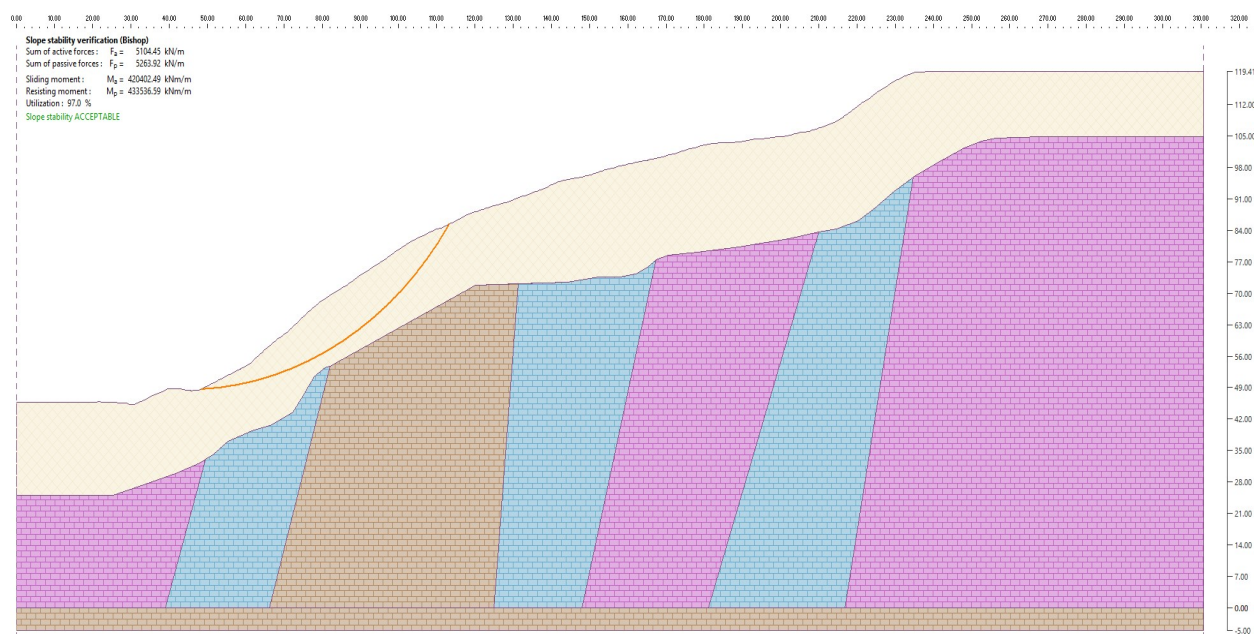


Рис.6. Лінія ковзання схилу при варіанті глибинного зсуву методом LEM

Fig.6. Slope Slip Surface for the Deep-Seated Failure Scenario Using the LEM Method

Табл. 1: Прийняті параметри ґрунтів
Table 1. Accepted soil parameters

Найменування	Категорія	Питома вага, (кН/м ³)	Питоме зчеплення, кПа	Кут внутрішнього тертя, (°)
Flysch (1 scenario)	—	21.5	6.6	29.7
Flysch (2 scenario)	—	21.5	15.75	23.1
Rock (sandstone)	3	26.0	334.0	44.4
Rock (sandstone)	4	24.0	99.0	23.37
Rock (sandstone)	5	24.0	58.0	17.3

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження показало ефективність інтеграції геофізичних інтерпретацій, даних буріння та польових спостережень для оцінки міцнісних характеристик флішу та скельного масиву в Карпатах, відомих своєю неоднорідністю, анізотропією та складними поверхнями зсуву.

Для спрощення стратиграфічної моделі верхня зона вивітрювання була розглянута як єдиний шар, тоді як глибші шари скелі були поділені на категорії відповідно до результатів геофізичних досліджень та бурових даних. Категорії 3–5 відображають від найміцнішого матеріалу до зон потенційних зсувів, що дозволило побудувати адекватну геотехнічну модель для аналізу стійкості схилів.

Параметри флішу були підібрані для двох сценаріїв з урахуванням різних значень питомого сцеплення та кута внутрішнього тертя, що враховує природну варіабельність породи. Для скельних шарів механічні характеристики були інтерпретовані на основі геофізичних даних (класифікація KFG), результатів буріння та літературних джерел, що дозволило визначити середні параметри масиву та отримати розрахункові ϕ' та c' за методом Кулона-Мора через Roclab.

Застосування методу ϕ - c reduction у MCE дало змогу калібрувати параметри зсувної міцності для наближення до граничного стану рівноваги ($FoS \approx 1$), а результа-

ти були підтверджені незалежними розрахунками методом Бішопа, що підтвердило достовірність прогнозів для поверхневих та глибинних механізмів руйнування.

Отримані параметри відображають ймовірну поведінку порід in-situ і можуть бути використані для подальших аналізів та проектування. Враховуючи складність та змінність флішових та скельних формацій, рекомендовано застосовувати інструментальні спостереження (інклінометри, пізмометри) для подальшого уточнення геотехнічної моделі та підвищення точності прогнозів.

Інтегрований підхід — поєднання моделювання, геофізичних даних та польових спостережень — забезпечує практичну та обґрунтовану методологію роботи зі схилами, складеними флішем та скелями, у Карпатському регіоні та подібних геологічних умовах.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Bestyński, Z., Pacanowski, G., & Sieinsk, E. (2018). Geophysical investigation and geotechnical classifications for stability assessment of Carpathian flysch slopes. *Prz. Geol.*, 65(10), 717–724.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, & T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley-Interscience.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). *The Geological Strength Index: Applications*

- and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65.
5. Bishop, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7–17.
 6. Grozic, J. L. H. (2009). The Geotechnical Behaviour of Flysch: Slope Stability and Engineering Challenges.
 7. Rocscience Inc. (n.d.). *Rocscience software documentation*. Rocscience. Retrieved from <https://www.rocscience.com>.

assessment of the strength and deformation behavior of flysch formations and significantly improves the quality of slope stability predictions in the Carpathian region. The proposed methodology can be applied in the design, risk assessment, and long-term monitoring of natural and anthropogenic slopes composed of flysch materials.

Key words. Carpathian flysch, numerical modeling, back-analysis, anisotropy, slope stability, geophysical investigations.

Integrated Methodology for Assessing the Physical-Mechanical Properties of the Carpathian Flysch Using Geophysics and Numerical FEM/LEM Slope Stability Analysis

*Liudmyla BONDAREVA,
Vasyl BEHAN*

Abstract. The Carpathian flysch is one of the most complex geological formations in Eastern Europe, characterized by alternating layers of sandstone, siltstone, and clay shale, pronounced fracturing, structural heterogeneity, and strong anisotropy of mechanical properties. These features significantly complicate the determination of reliable physical and mechanical parameters and the prediction of slope stability.

This study presents an integrated approach to evaluating the mechanical behavior of flysch formations that combines drilling data, CPT/CPTu testing, geophysical investigations (seismic-acoustic profiling, electrical resistivity, GPR), laboratory testing, and numerical modeling using the Finite Element Method (FEM). Based on the interpretation of geophysical data, several rock mass categories were identified according to the degree of weathering and structural disturbance. Strength parameters for these categories were derived using the Hoek–Brown and Mohr–Coulomb criteria.

The mechanical parameters of the flysch were refined through back-analysis employing ϕ – c reduction in Plaxis 2D. The critical safety factors obtained from FEM were compared with analytical results from Bishop’s simplified method (LEM). The consistency between FEM and LEM confirmed the reliability of the calibrated parameters and enabled the identification of both shallow and deep-seated failure mechanisms.

The results demonstrate that the combined use of geophysical interpretation, field testing, and numerical modeling provides a more accurate