

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет

ДАХУА ЛАМРІ

УДК 625.85

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ УКОСІВ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ТА СХИЛІВ
(НА ПРИКЛАДІ АЛЖИРУ)**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Доктор технічних наук, професор
Савенко Вячеслав Якович,
Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри транспортного будівництва та управління майном, м. Київ

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор
Смірнова Наталія Володимирівна,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг, м. Харків

Кандидат технічних наук,
Нестеренко Сергій Григорович,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, м. Харків

Захист відбудеться «08» квітня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 209.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Михайла Бойчука, 42.

Автореферат розісланий «06» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.Ю. Усиченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Забезпечення стабільності транспортної інфраструктури (автомобільної дороги, залізниці тощо), розуміння причин і механізмів їх нестабільності та знаходження ефективних рішень попередження руйнувань мають важливе значення для їх безперебійної роботи і, як наслідок, успішного економічного і соціального розвитку будь-якого регіону. Як і у всіх країнах Середземного моря, Алжир серйозно страждає від небезпеки непередбачуваних зсувів. Останніми роками ці зсуви мають тенденцію до збільшення, що призводить до великих збитків у багатьох секторах економіки країни і, зокрема, у дорожньому господарстві. У північно-західному регіоні провінції Бордж-Бу-Арірель і на північному сході провінції Буйра останнім часом зазнали руйнувань декілька міст і сіл (осідання ґрунту, зсуви, падіння каменів та брил тощо). У дорожній інфраструктурі міст Аомар, Кадір, Айн-Турк, Аїт-Лазиз, Ібурассен, Іфулух'єн, Іалуахен, Маалла, Ігіль Оуманчар і Тагзут щорічно реєструють значні руйнування і матеріальні затрати на ліквідацію цих руйнувань особливо після значних опадів чи землетрусів. Відсутність фундаментальних досліджень про вплив зсувів на основні траси доріг на північному сході Алжиру, обумовили напрямок досліджень.

Незважаючи на весь досвід, накопичений за останні десятиліття, проектування насипів на схилах або на нестійких ґрунтах, наразі в Алжирі, викликає проблеми, які пов'язані з особливістю клімату, геотехнічними характеристиками ґрунтів. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування армування схилів і укосів земляного полотна автомобільних доріг геосинтетичними матеріалами.

Проте в умовах Алжиру не існує простого інженерного методу розрахунку стійкості схилів і укосів виїмок чи насипів із комплексним врахуванням сил від дії землетрусів, ґрунтових вод та армування. Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю вирішення цієї задачі, а також використання геоінформаційних систем, що дозволить на стадії проектування обґрунтувати найбільш оптимальні варіанти проходження трас автомобільних доріг з урахуванням стійкості земляного полотна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Наукові результати одержані у процесі виконання науково-дослідних робіт кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету: «Удосконалення системи управління станом автомобільних доріг та методів їх оцінки» (реєстраційний номер 0116U002491); «Розроблення сучасних методів проектування, будівництва та експлуатації дорожніх конструкцій, транспортних споруд та інженерних мереж земляного полотна» (реєстраційний номер 0114U006496).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення методу Бішопа на підставі врахування сил порового тиску ґрунтових вод, сейсмічних сил і армування геосинтетичними матеріалами для розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів.

Для досягнення мети були поставлені наступні **завдання**:

- виконати аналіз існуючих методів розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг і схилів та армування їх геосинтетичними матеріалами;
- удосконалити спрощений метод Бішопа за рахунок врахування сейсмічних сил, сил порового впливу ґрунтових вод, армування геосинтетичними матеріалами і на його підставі удосконалити метод проектування ґрунтових споруд, які армовані цими матеріалами;
- провести числове моделювання з використання методу скінчених елементів та розрахунки стійкості укосів і схилів, з метою обґрунтування доцільності використання армованих геосинтетиками конструкцій;
- на основі запропонованого удосконаленого методу Бішопа розробити методику розрахунку армованих геосинтетичними матеріалами укосів земляного полотна автомобільних доріг;
- на основі розробленого удосконаленого методу Бішопа та геоінформаційних систем обґрунтувати карту зсувів для автомобільної дороги А1 (провінція Буйра, Алжир).

Об'єкт дослідження: забезпечення стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів.

Предмет дослідження: удосконалення методу Бішопа для розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів, які армовані геосинтетичними матеріалами.

Методи дослідження. Аналітично-експериментальні з використанням положень теорії граничної рівноваги ґрунтів та критерію міцності Кулона-Мора; числове моделювання; методи математичної статистики; геоінформаційні системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено спрощений метод Бішопа, який дозволяє враховувати сили від армування, землетрусів і порового тиску ґрунтових вод;
- удосконалено метод проектування ґрунтових споруд, армованих геосинтетичними матеріалами на основі розробленого удосконаленого методу Бішопа;
- на основі застосування методу аналізу даних геоінформаційних систем та удосконаленого методу Бішопа запропоновано новий підхід до вибору напрямку траси автомобільної дороги в гірських районах.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена методика розрахунку укосів земляного полотна автомобільних доріг, які армовані геосинтетиками з використанням методом Бішопа, яка дозволяє обґрунтовувати армоґрунтові конструкції для забезпечення стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів.

Використання методу аналізу даних геоінформаційних систем та удосконаленого методу Бішопа дозволяє визначати раціональне положення траси автомобільної дороги.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в проєкті на проєктування автомобільної дороги А1 від ПК 235 до ПК 245 місто Ханіф, провінції Буйра. У навчальний процес на кафедрі наук про Землю (інститут архітектури та наук про Землю) університету Ферхата Аббаса СЕТИФ 1 (Алжир). У навчальний процес Національного транспортного університету при викладанні дисципліни «Механіка земляного полотна» та в дипломному проєктуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота є результатом самостійного наукового дослідження автора. Особистий внесок здобувача в публікаціях із співавторами полягає в: [1] – обґрунтуванні сил і впливів, що дозволило удосконалити метод Бішопа; [2] – отриманні результатів дослідження ґрунтів; [3] – в опрацюванні даних і побудові нової траєкторії траси автомобільної дороги А1; [4] – отриманні залежностей розрахунку коефіцієнта безпеки; [5] – отриманні основних розрахункових залежностей; [7] – виконано аналіз різних методів розрахунку стійкості; [8] – виконано розрахунки за допомогою програми Plaxis; [9] – в опрацюванні даних ґрунтово-геологічних досліджень; [10] – в опрацюванні даних ГІС і побудові карт; [11] – обґрунтуванні застосування геосинтетиків у дорожньому будівництві.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи були представлені: на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Національного транспортного університету №№ 71-73 в 2015-2017 рр.; на міжнародних: The 1 International Symposium (WREIANA 2017) Water Resources and Environmental Impact Assessment in North Africa, 24-26 March, 2017 Gafsa; 1 Séminaire National Géologie, Geotechnique et Georessources, 8-9 Novembre 2017, Jijel; Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration EMCEI 2017, 22-25 November 2017, Sousse, Tunisia; 4 Colloque International :Les Géosciences au Service du Développement Durable, 22 November, 2018, Tebessa; 2 Colloque International sur la Géologie de la Chaîne des Maghrebides et des Régions Voisines, 05 Decembre 2018, Setif; The International Association of Water Resources in the Southern Mediterranean Basin WREIANA 2019, 25-27 March 2019, Sousse, Tunisia.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 12 праць: 4 статті у виданнях іноземних держав, 3 з яких у виданнях, які включено до міжнародної науково-метричної бази Scopus [1-3], 5 статей у наукових фахових виданнях України, одна з яких – одноосібна [6], 3 праці апробаційного характеру, одна з яких включена до міжнародної науково-метричної бази Scopus [10].

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменування) та 3 додатків. Основний текст викладений на 130 сторінках. Текст ілюструється 56 рисунками і 15 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність дисертаційної теми, сформульовані мета та завдання дослідження. Визначена наукова новизна роботи, показано практичне значення отриманих результатів та їх напрямки впровадження у виробництво та навчальний процес.

У першому розділі виконано аналіз природно-кліматичних характеристик Алжиру, ґрунтово-геологічних особливостей району дослідження. Як і у всіх країнах Середземного моря, Алжир серйозно страждає від небезпеки непередбачуваних зсувів (одним із наслідків є землетруси). Останніми роками ці зсуви мають тенденцію до збільшення, що призводить до великих збитків у багатьох секторах економіки країни і, зокрема, в дорожній інфраструктурі.

Проаналізовано стан питання щодо методів розрахунку стійкості укосів і схилів. Встановлено, що біля 80 % країн Західної Європи і Африки використовують спрощений метод Бішопа. Саме цей метод прийнятий для подальшої роботи у дисертаційному дослідженні.

Виконано аналіз методів розрахунку армування укосів насипів за допомогою геосинтетичних матеріалів як напрямку вирішення проблем підвищення стійкості земляних конструкцій.

Враховуючи ландшафт Алжиру і потребу у розвитку дорожньої мережі, проаналізовано можливість застосування геоінформаційних систем для проектування трас нових автомобільних доріг, в умовах гірського Алжиру, з врахуванням оцінки стійкості укосів і схилів та встановлено перспективність цього напрямку.

Виконаний огляд робіт показав відсутність науково-обґрунтованого підходу, який би дозволяв розраховувати армоґрунтові конструкції із врахуванням дії землетрусів і порового тиску ґрунтових вод.

У другому розділі наведені теоретичні аспекти дисертаційного дослідження.

Вивченню аналізу стійкості укосів і схилів присвячені роботи Г.М. Шахунянца, М.М. Маслова, Берера, Вольта, Н.М. Герсєванова, Л.К. Гінзбурга, М.Н. Гольдштейна, Н.А. Цитовіч, А.Г. Дорфман, Г. Крея, К. Терцагі, Р.Р. Чугаєва, Е.Н. Бромхеда, М.Д. Фредланда, Дж.М. Дункана, В.В. Соколовського, І.А. Садовенко, В.Г. Шаповала, С.Ф. Власова, А.І. Вайнберга, А.К. Тернера, І.В. Федорова, А.Л. Можевітінова, Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern, Price, Fredlund, Krahn, Nash, Duncan і інших дослідників.

В Алжирі для розрахунків стійкості схилів, укосів насипів та виїмок автомобільних доріг застосовують спрощений метод Бішопа. Цей метод задовольняє тільки рівновазі моментів, але визначений коефіцієнт безпеки за цим методом, менш чутливий до припущень, які застосовуються до сил зсуву між відсіками, порівняно з іншими методами.

Дія ґрунтових вод на стан зсувного схилу проявляється різними шляхами, викликаючи зміну напруженого стану масиву і фізико-механічних властивостей ґрунтів, а також обумовлюючи розвиток фільтраційних деформацій. Питанням

впливу підземних вод на стійкість схилів займалися багато радянських і зарубіжних вчених Н. Пузиревський, Д.В. Тейлор, Н.А. Цитович, В.А. Мироненко та В.М. Шестаков, К.І. Фоменко, Л.К. Гинзбург, М.Є. Харр та ін.

При насиченні ґрунтів водою змінюються їх фізико-механічні характеристики і, зокрема, міцність на зсув, зменшуючи величину опору зсуву. При цьому вода, за рахунок виникнення порового тиску, змінює величину напружень, що діють на скелет ґрунту, а також, призводить до зважування ґрунтового скелету, зниження нормальних напружень в площині зсуву. Однак, вода може і збільшувати міцність ґрунту, наприклад за рахунок виникнення капілярних сил. У всіх випадках при розрахунках обводнених схилів значення зсувних характеристик ґрунтів в них, встановлюються з урахуванням впливу зволоження на зміну міцності ґрунту.

Розміри зони обводнення приймаються найбільш несприятливими (для оцінки стійкості) з реально можливих.

Спрощений підхід, як і точний метод Бішопа, засновані на ефективному напруженні, згідно з умовою Терцагі. У загальному випадку насичені ґрунти складаються з двох фаз: твердого скелета і води, ефективне напруження (σ') розраховується наступним чином:

$$\sigma' = \sigma - u, \quad (1)$$

де σ – нормальне напруження;

u – поровий тиск

$$u = \gamma_w h R_u, \quad (2)$$

де γ_w – щільність води;

h – вертикальна відстань від базового фрагмента до лінії п'єзометричного рівня;

R_u – коефіцієнт порового тиску.

Коефіцієнт порового тиску R_u , може змінюватися від 0 до 1, наприклад: $R_u = 0$ приймають для сухих ґрунтів (поровий тиск дорівнюватиме нулю); $R_u = 1$ приймають для повністю водонасичених ґрунтів.

Розрізняють дві зони: одна, де ґрунт насичений капілярним підйомом води, інша, яка знаходиться вище зони насичення.

Для повністю насиченої капілярної зони, внутрішній тиск є від'ємним та дорівнює $(-\gamma_w h)$, отже ефективне напруження буде:

$$\sigma' = \sigma + \gamma_w h. \quad (3)$$

Над цією зоною має місце тиск повітря (u_a), тиск води (u_w), а їх різниця, яка виникає $(u_a - u_w)$, називається всмоктуванням.

Принцип Терцагі в інтерпретації Бішопа має вигляд:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w), \quad (4)$$

де u_a та u_w – відповідно поровий тиск повітря та поровий тиск води;

χ – параметр Бішопа ($\chi = 0$ для сухих ґрунтів і $\chi = 1$ для насичених ґрунтів).

Для переходу від нормальних напружень до нормальної сил отримуємо наступну залежність:

$$N' = N - u_a + \chi (u_a - u_w). \quad (5)$$

Зчеплення ґрунту змінюється від збільшення вмісту води і має гіперболічний характер. Форма цієї кривої змінюється залежно від літологічного складу ґрунту. Вплив води у подальших розрахунках враховуємо за рахунок зміни кута внутрішнього тертя ($\varphi' = \varphi K_\varphi$, де $K_\varphi = 0,8$) та питомого зчеплення c' .

У такому випадку закон Кулона-Мора приймає вигляд:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + \chi (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi'. \quad (6)$$

Виходячи із формули (6), дотична складова сили визначається як:

$$S = 1 / F (c' \ell + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'), \quad (7)$$

де F – фактор безпеки;

ℓ – довжина підошви відсіку.

Землетруси в Алжирі враховуються за допомогою сейсмічних норм (кодів). При розрахунках штучних укосів врахування сейсмічних впливів проводиться на основі використання псевдостатичного аналізу. При цьому підході ефект від землетрусу моделюється шляхом введення додаткової сили, що визначається наступним чином:

$$F = \frac{a}{g} W = k W, \quad (8)$$

де a – сейсмічне прискорення;

W – питома вага ґрунту;

g – прискорення вільного падіння;

k – коефіцієнт сейсмічності.

У розрахунках використовуються горизонтальна та вертикальна складові цієї сили, які визначаються за відповідними формулами:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W, \quad F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W, \quad (9)$$

$$k_h = A, \quad k_v = \pm 0,3A,$$

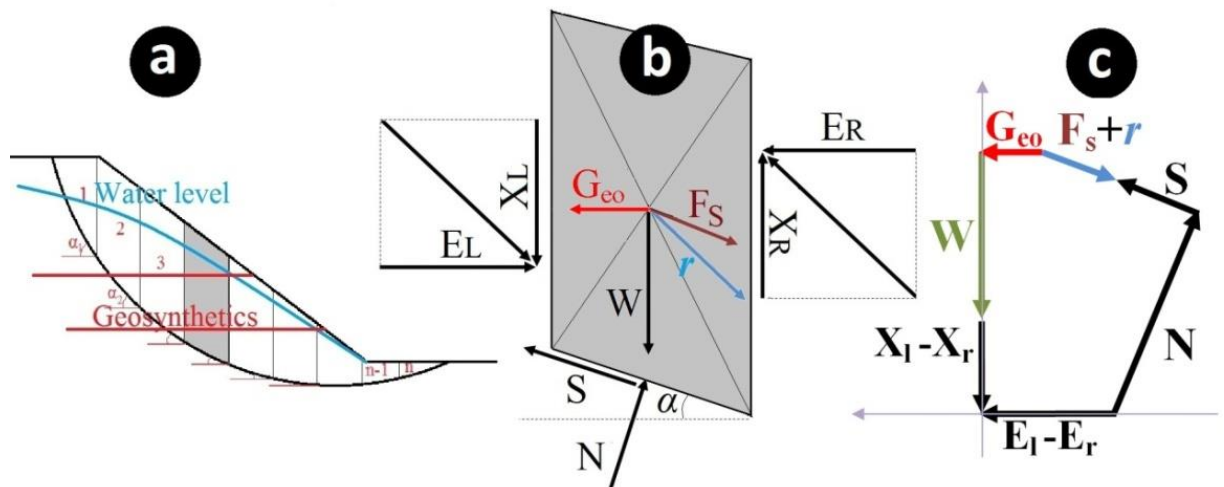
де a_h і a_v – відповідно горизонтальна і вертикальна складові сейсмічного прискорення;

A – коефіцієнт прискорення, який залежить від сейсмічної зони і групи важливості конструкції.

У методі Бішопа сили між відсіками не ігноруються, а враховуються за рахунок результуючої сили, яка є горизонтальною, а вертикальні складові взаємодії між відсіками зрівноважують одна одну, так само як моменти цих складових відносно центра кривої ковзання.

Метод Бішопа дозволяє врахувати вплив реакції геосинтетичного матеріалу (пасивна сила) або ж сейсмічні впливи та поровий тиск ґрунтових вод (активні сили).

При удосконаленні спрощеного методу Бішопа вищезгадані сили введені в багатокутник сил (рис. 1).



X_L , X_R , E_L , E_R – вертикальні та горизонтальні сили між блоками; W – вага блоку; N – нормальна сила; S – сила опору зсуву; α – кут між горизонтальною поверхнею і поверхнею блока по лінії зсуву; r – сила, яка враховує вплив ґрунтових вод; F_s – сила, яка враховує сейсмічний вплив; G_{geo} – сила, яка враховує армування геосинтетичними матеріалами; θ – кут між горизонтальною і пьезометричною лініями

Рисунок 1 – Розрахункова схема: а) розділення укосу на відсіки; б) рівновага відсіку; в) багатокутник сил для удосконаленого методу Бішопа

Для знаходження коефіцієнта безпеки F важливим моментом, є визначення нормальної складової сил, яку визначають з рівняння проєкцій сил на вертикальну вісь в центрі відсіку і, з врахуванням вищенаведених залежностей (5) і (7), отримаємо:

$$N = \frac{W - [c'(w)\ell \sin \alpha + u \ell \operatorname{tg} \varphi'(w)] / F + F_{vert}^S + r \sin \theta}{(\cos \alpha + (\operatorname{tg} \varphi'(w) \sin \alpha) / F)}. \quad (10)$$

Коефіцієнт безпеки визначають з рівняння моментів сил відносно центру обертання навколо кривої ковзання із врахуванням формули (10):

$$F = \frac{\frac{c'(w)\ell \cos \alpha + [W - u \ell \cos \alpha + F_{vert}^S + r \sin \theta] \operatorname{tg} \varphi'(w)}{(\cos \alpha + (\operatorname{tg} \varphi'(w) \sin \alpha) / F)}}{W \sin \alpha + (F_{vert}^S + r \sin \theta) \sin \alpha + (F_{horiz}^S + r \cos \theta - G_{eo}) (\cos \alpha - h / (2R))}. \quad (11)$$

З урахуванням суми відсіків маємо:

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c'(w)_i \ell_i \cos \alpha_i + [W_i - (u_{ai} - \chi se_i) \ell_i \cos \alpha_i + F_{vert_i}^S + r_i \sin \theta_i] \operatorname{tg} \varphi'(w)_i}{(\cos \alpha_i + (\operatorname{tg} \varphi'(w)_i \sin \alpha_i) / F)} \right]}{\sum [W_i \sin \alpha_i + (F_{vert_i}^S + r_i \sin \theta_i) \sin \alpha_i + (F_{horiz_i}^S + r_i \cos \theta_i - G_{eo_i}) (\cos \alpha_i - h_i / (2R))]} \quad (12)$$

Наступним завданням дисертаційної роботи було удосконалення методу проектування ґрунтових споруд, які армовані геосинтетичними матеріалами.

Забезпечення внутрішньої стійкості укосу обумовлено загальним армуючим зусиллям, яке визначається виходячи з формули (12) коефіцієнта безпеки для удосконаленого метода Бішопа.

Введемо для спрощення розрахункової залежності позначення сил, які не залежать від армування:

$$A = \left(\sum \left[\frac{c'(w)_i \ell_i \cos \alpha_i + [W_i - (u_{ai} - \chi se_i) \ell_i \cos \alpha_i + F_{vert_i}^S + r_i \sin \theta_i] \operatorname{tg} \varphi'(w)_i}{(\cos \alpha_i + (\operatorname{tg} \varphi'(w)_i \sin \alpha_i) / F_{fel})} \right] / F \right). \quad (13)$$

Тоді загальне армуюче зусилля, яке необхідно для забезпечення заданої внутрішньої стійкості укосу:

$$T_{geo} = K_{мет} \cdot \sum |G_{eo_i} (\cos \alpha_i - h_i / (2R))|, \quad (14)$$

де $K_{мет}$ – коефіцієнт врахування зменшення міцності геосинтетика.

$$\begin{aligned} \sum |G_{eo_i} (\cos \alpha_i - \frac{h_i}{2R})| &= \sum [(F_{horiz_i}^S + r_i \cos \theta_i) (\cos \alpha_i - \frac{h_i}{2R})] - A + \\ &+ \sum [W_i \sin \alpha_i + (F_{vert_i}^S + r_i \sin \theta_i) \sin \alpha_i]. \end{aligned}$$

Ще одним із завдань дисертаційного дослідження було розроблення методу застосування геоінформаційних систем для проектування трас нових

автомобільних доріг в умовах гірського Алжиру з врахуванням оцінки стійкості схилів.

В Алжирі, формальні процедури картування небезпеки зсуву засновані на підході, званому «Експерт». Що є не завжди об'єктивним відображенням реальної ситуації в силу неможливості одночасно врахувати велику кількість факторів по району дослідження.

Геоінформаційна система (географічна інформаційна система або ГІС) – це інформаційна система, що призначена для збору, зберігання, пошуку та оперування даними про територіальні об'єкти. Територіальна ГІС дозволить не тільки отримувати за запитом семантичну інформацію про об'єкти на карті, але і прогнозувати розвиток території, дозволить керівництву регіону опрацьовувати варіанти директивних рішень, можливого будівництва нового району міста, автомобільної дороги тощо. При цьому ГІС разом із системою імітаційного моделювання зможе показати проєктантам, як перерозподіляться навантаження, склад і інтенсивність транспортних потоків.

Цей метод, що вважається більш об'єктивним, використовує статистичні інструменти, інтегровані з ГІС для виявлення статистичних взаємозв'язків між місцем розташування відомих зсувів (ідентифікованих під час інвентаризації) і ряд пояснювальних факторів, представлених в картографічній формі (наприклад, рельєф, геологія, гідрологія, використання землі тощо).

Основна мета цієї частини дослідження полягала в оцінці схильності ґрунтів до зсувів з метою запропонувати альтернативну трасу дороги, менш схильну до таких явищ на основі ГІС і розробленого удосконаленого методу Бішоп.

Реалізація запропонованого методу полягає в наступному: 1) інвентаризація зсувів і підготовка інформації про фактори, які можуть бути причиною зсувів (топографія); матеріали: літологія нижніх шарів або поверхневих утворень; землекористування; геоморфологія на основі геологічних карт, супутникових знімків, цифрової моделі місцевості; вимірювання опадів і польові дослідження; аналітичний розрахунок фактора безпеки за удосконаленим методом Бішоп; 2) рівновага різних критеріїв; 3) створення карти схильності місцевості до зсувів.

У третьому розділі наведені числове моделювання з використання методу скінчених елементів та розрахунки стійкості укосів і схилів, з метою обґрунтування доцільності використання армованих геосинтетиками конструкції.

Було виконано лабораторні дослідження ґрунтів з метою встановлення їх фізико-механічних характеристик і використання в розрахунках не довідкових, а реальних даних про ґрунти. Оскільки район дослідження складається із туфів, з метою встановлення механізмів утворення ерозії було виконано геотехнічні випробування, які включали:

1) Відбір проб. Для виділення шарів корінних порід здійснювалося за допомогою геологорозвідувальних свердловин. 2) Гранулометричний аналіз (просіювання для розподілу часток розміром більше або рівним 63 мкм за масою; седиментометрія для розмірного розподілу за масою часток розміром менше 63 мкм).

У ході досліджень також було встановлено геоелектричний профіль (томографія) ділянки розташування автомобільної дороги А1. Томографія питомого електроопору є геоелектричним методом, що дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю за електроопором в двох або три вимірах геологічних формацій. У роботі реалізований профіль електричної томографії (рис. 2), із цією метою провели псевдо-переріз за диполь-дипольною системою. Електричні профілі довжиною 300 метрів і шириною до поля ковзання. Профіль складається з 30 електродів, розташованих на відстані 10 метрів один від одного.

На рисунку 2 показана інтерпретація отриманого диполь-дипольного профілю.

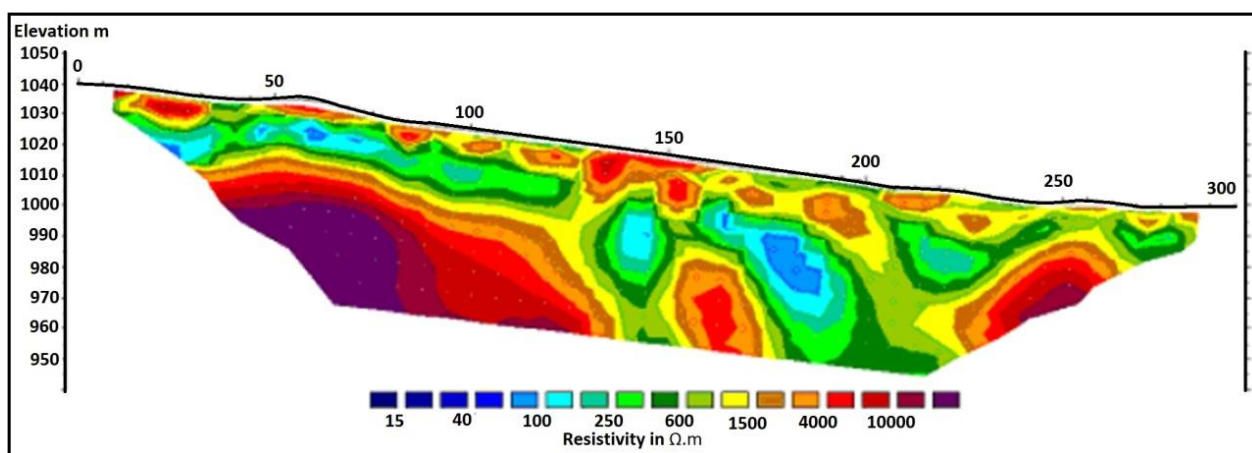


Рисунок 2 – Диполь-дипольний профіль

Результати дослідження властивостей ґрунтів були використані в розрахунках за удосконаленим методом Бішопа, які використовували для розрахунку армоґрунтової конструкції та в реалізації ГІС. Для ГІС також було використано геоелектричний профіль ділянки автомобільної дороги А1.

Для проведення аналізу за методом скінчених елементів використовували програмний комплекс Plaxis. Для якого була створена цифрова модель і уточнені властивості ґрунтів, сформульовані граничні умови.

Результати цього моделювання дали можливість визначити: загальне переміщення, напруження зсуву, деформації зсуву тощо. Початкові умови: переміщення дорівнюють нулю, а початкові напруження дорівнюють напруженням від власної ваги ґрунту.

Модель складалась із 4344 трикутних елементів з 15 вузлами і 12 точками Гаусса та 5 вузлами лініями і 4 точками Newton-Cote для геосинтетичного матеріалу. Також було враховано три типи параметрів: параметри розрахунку (різні схеми моделювання), фізико-механічні властивості ґрунтів та параметри армуючих елементів.

Результати розрахунку стійкості схилу за різними методами наведені у табл. 1. Перший коефіцієнт безпеки був розрахований за допомогою програмного комплексу Plaxis, з другого по п'ятий за допомогою програмного комплексу

«GEO-STUDIO/SLOPE», шостий і сьомий за запропонованим удосконаленим методом Бішопа.

Як видно з даних табл. 1, врахування впливу землетрусу та порового тиску ґрунтових вод, суттєво зменшують коефіцієнт безпеки. Застосування армування дає можливість забезпечити стійкість цього схилу з урахуванням зазначених вище факторів.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта безпеки для різних класичних методів і методу скінченних елементів (МСЕ)

Ч.ч.°	Метод розрахунку	Коефіцієнт безпеки
1	Зниження Phi (MCE / Plaxis)	$F = 0,890$
2	Morgenstern i Price	$F = 0,934$
3	Jumbu	$F = 0,910$
4	Fellenius	$F = 0,916$
5	Bishop	$F = 0,932$
6	Удосконалений метод Бішопа з урахуванням впливу землетрусу та порового тиску ґрунтових вод	$F = 0,567$
7	Удосконалений метод Бішопа з урахуванням армування геотекстилем	$F = 1,670$

На підставі цифрової моделі було виконано підбір кроку армування геотекстилем та встановлено раціональний крок 0,6 м, коефіцієнт безпеки 1,60 (табл. 2).

Таблиця 2 – Узагальнення результатів на основі МСЕ

Інтервал (м) 10^{-3}	Загальна деформація U_{tot} (м) 10^{-3}	Дотичні напруження σ'_x -ху (кН/м ²)	Відносна деформація %	Коефіцієнт безпеки F
200	06,55	29,21	-2	1,84
400	07,13	71,89	-2	1,71
600	08,17	93,78	-3	1,60
800	19,95	125,68	-3	1,46
1000	47,29	166,18	-5	1,12

Для подальшого моделювання було використано чотири типи укріплень схилу: армоґрунтова конструкція; буронабивні палі; масивні підпірні стінки; попередньо напружені анкери.

У результаті числового моделювання стійкості схилу на ПК 240+847 автомобільної дороги А1 (Алжир) встановлено переваги армоґрунтових споруд та підтверджена гіпотеза доцільності введення в розрахунки для удосконалення методу Бішопа утримуючих зусиль від геосинтетчного матеріалу, як компенсацію зсувних сил, зокрема від дії порового тиску ґрунтових вод і землетрусів.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений практичному впровадженню результатів досліджень.

Одним із результатів наукових досліджень є розроблений метод проектування укосів насипів армованих геосинтетичними матеріалами автомобільних доріг з використанням удосконаленого методу Бішопа. На його основі розроблена методика розрахунку армоґрунтових укосів, яка включає такі основні етапи проектування: розрахунок стійкості укосу, визначення мінімального коефіцієнта стійкості і радіусу кривої ковзання; розрахунок загального армуючого зусилля, яке необхідне для забезпечення заданої внутрішньої стійкості укосу; розрахунок необхідної кількості армуючих геосинтетичних прошарків; розрахунок відстані між армуючими прошарками; розрахунок довжини анкерування армуючого прошарку в стійку частину насипу; розрахунок довжини геосинтетических прошарку в призмі обвалення; розрахунок загальної довжини армування для кожного геосинтетических прошарку; перевірка необхідної кількості армуючих шарів за умови виключення проковзування ґрунту над (під) або між армуючими елементами в активній зоні насипу; оцінка зовнішньої стійкості укосу; підбір потрібного типу геосинтетика; при необхідності, коригування отриманого конструктивного рішення.

Було виконано перевірку достовірності розробленого методу шляхом співставленням результатів, отриманих за розробленим методом і відповідною методикою, із результатами (вихідні дані однакові, дію сейсмічних сил і поровий тиск води не враховували) отриманими за уже діючою нормованою й апробованою методикою в Україні; за допомогою числового моделювання, а також коректністю отриманої формули удосконаленого методу Бішопа.

У ході реалізації дисертаційної роботи запропонований метод у якому вдалось поєднати розроблений удосконалений метод Бішопа з традиційними ГІС технологіями, що дозволило побудувати карту зсувів в районі проходження траси автомобільної дороги А1 (провінція Буйра, Алжир).

На першому етапі виконання робіт крім ґрунтово-геологічних досліджень були зібрані матеріали про ландшафт, наявні місця зсувів, експозицію схилів, стан ґрунтів, наявність тріщин в районі дослідження тощо. Результати наведені на рис. 3-5.

Розрахована нова траєкторія траси (рис. 7) з врахуванням і обробленням даних ГІС і отриманого коефіцієнта безпеки за розробленим удосконаленим методом Бішопа (рис. 6) дозволили значно знизити ризики (до 30 %) при зміні траєкторії траси в обхід районів з найбільш високими ймовірностями зсувів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в проєкті на проектування автомобільної дороги А1 від ПК 235 до ПК 245 місто Ханіф, провінції Буйра (Алжир). У навчальний процес на кафедрі наук про Землю (інститут архітектури та наук про Землю) університету Ферхата Аббаса СЕТИФ 1 (Алжир). У навчальний процес Національного транспортного університету при викладанні дисципліни «Механіка земляного полотна» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

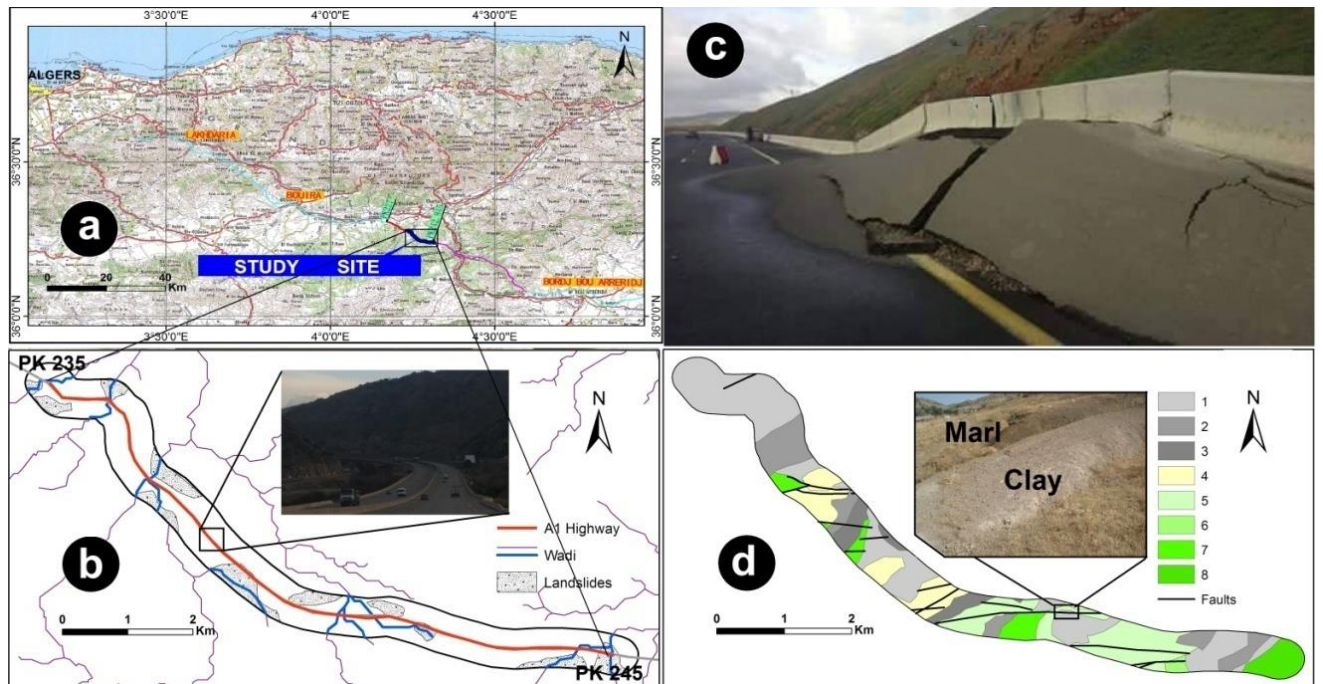


Рисунок 3 – Географічне розташування району дослідження (а, б); с) зсув на ділянці дороги; д) геологічна карта області дослідження

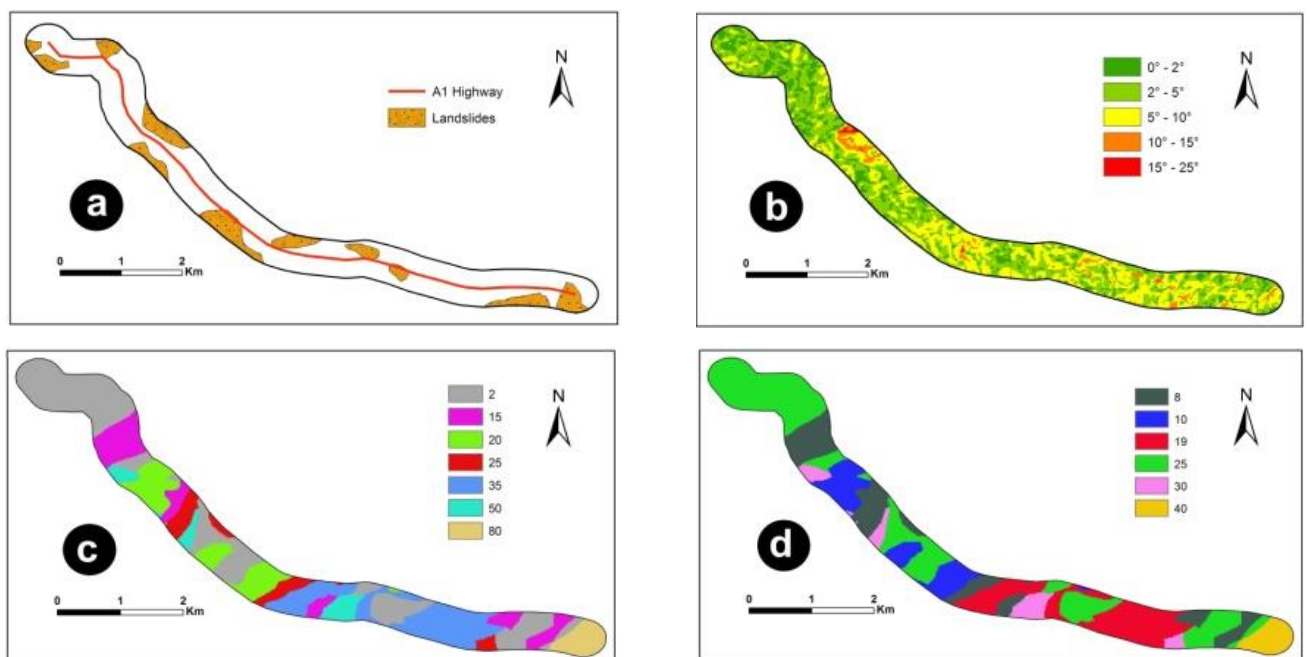


Рисунок 4 – а) карта зсувів; б) карта схилів; с) карта розподілу зчеплення ґрунту; д) карта розподілу кута внутрішнього тертя

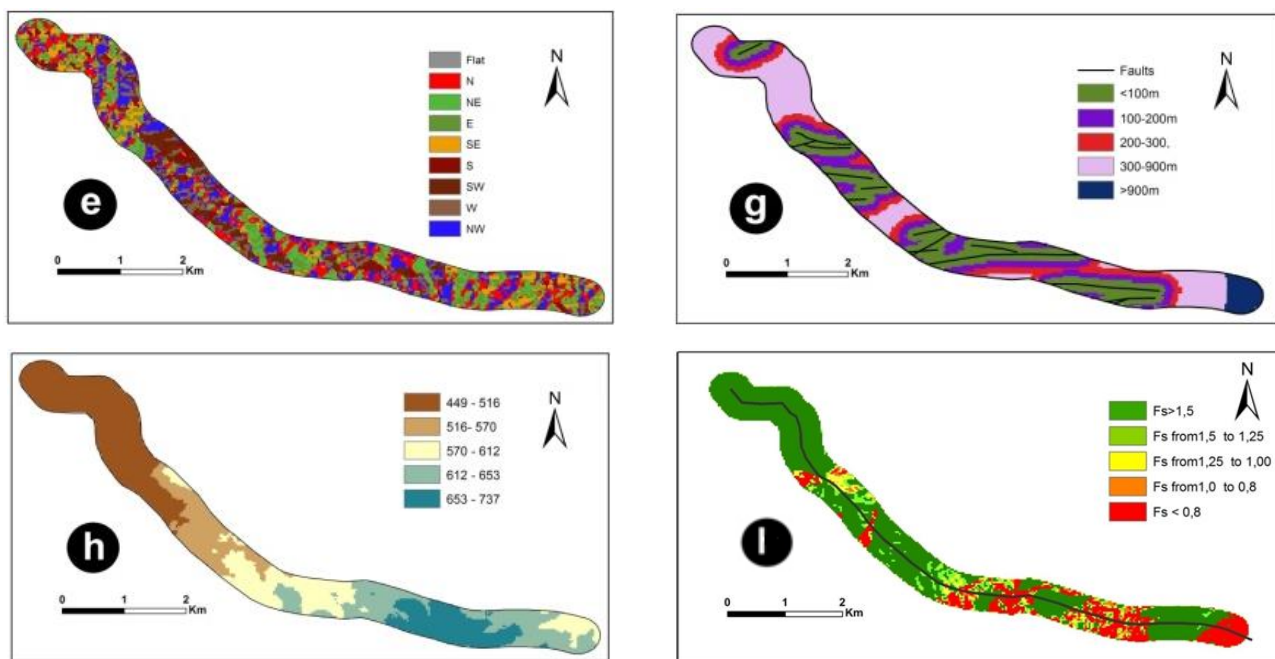


Рисунок 5 – е) карта експозиції схилів; г) карта тріщин; h) карта перевищень; і) карта коефіцієнтів безпеки (удосконалений метод Бішопа)

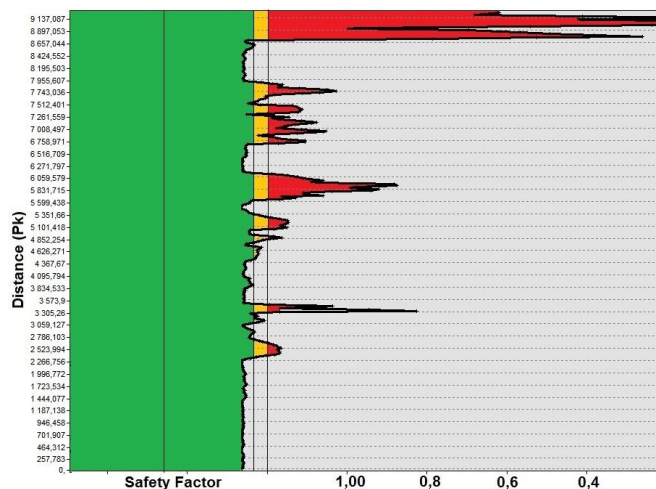


Рисунок 6 – Розподіл коефіцієнта безпеки вздовж ділянки автомобільної дороги A1 (удосконалений метод Бішопа)

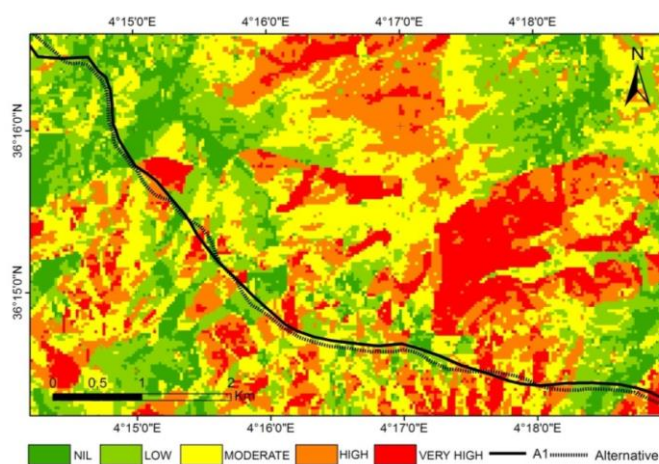


Рисунок 7 – Карта проходження траси автомобільної дороги A1 і альтернативний (запропонований) варіант

ВИСНОВКИ

У результаті виконаної дисертаційної роботи здійснено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні методу Бішопа для розрахунку стійкості укосів земляного полотна

автомобільних доріг та схилів. Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1) виконаний аналіз існуючих методів розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів в результаті якого встановлено, що біля 80 % країн Західної Європи і Африки використовують спрощений метод Бішопа. Цей метод не враховує сейсмічний вплив, поровий тиск ґрунтових вод, армування, що обумовило подальший напрямок наукових досліджень;

2) удосконалено метод розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів на основі удосконалення спрощеного метода Бішопа за рахунок врахування сил сейсмічного та порового впливу ґрунтових вод та армування геосинтетичними матеріалами;

3) Розроблено метод розрахунку армування геосинтетичними матеріалами укосів насипів і виїмок автомобільних доріг і схилів, який дав можливість розробити інженерну методику розрахунку армування, що дозволяє встановлювати параметри армування та визначати потрібні характеристики армуючих матеріалів. Відхилення отриманих коефіцієнтів безпеки за розробленим методом і Plaxis становить 5,3 %;

4) на підставі результатів числового моделювання за допомогою методу скінченних елементів обґрунтовано доцільність використання армоґрунтових конструкцій, зокрема для автомобільної дороги А1 (Алжир) встановлено раціональний крок армування (0,6 м) при якому коефіцієнт безпеки складає 1,6;

5) на основі розробленого удосконаленого методу Бішопа та геоінформаційних систем розроблений метод аналізу даних, який дозволяє приймати більш точні проектні рішення при проектуванні трас автомобільних доріг, зокрема в гірських умовах Алжиру. Отримана карта зсувонебезпечних схилів в районі проходження траси автомобільної дороги А1 (провінція Буйра, Алжир), яка дозволила розрахувати нову траєкторію траси, що значно знижує ризики (до 30 %) при обході районів з найбільш високими ймовірностями виникнення зсувів;

6) Результати дисертаційної роботи впроваджені в проєкті на проєктування автомобільної дороги А1 від ПК 235 до ПК 245 місто Ханіф, провінції Буйра (Алжир). У навчальний процес на кафедрі наук про Землю (інститут архітектури та наук про Землю) університету Ферхата Аббаса СЄТИФ 1 (Алжир). У навчальний процес Національного транспортного університету при викладанні дисципліни «Механіка земляного полотна» та в дипломному проєктуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Dahoua L., Usychenko O., Savenko V., Hadji R. Mathematical approach for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments during an earthquake. *Mining Science*. 2018. Vol. 25. P. 207-217. (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.5277/msc182501>
2. Savenko V., Dahoua L., Hadji R., Zahri F., Ossitchenko E. Application of geochemical, mineralogical and geotechnical methods to site characterization for road construction purposes at A1 highway Northeastern Algeria. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol.7, No 4. P. 3909-3913. (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.12331>
3. Dahoua L., Savenko V., Hadji R. GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-West highway, North Algeria. *Mining Science*. 2017. Vol. 24. P. 117-127. (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.5277/msc172407>
4. Dahoua L., Savenko V., Ossitchenko E., Hadji H. Approche mathématique sur la méthode de BISHOP - rôle des géosynthétiques dans la stabilisation du talus du PK (240+847) de l'autoroute A1 (N-E Algérie) mathematical approach on the BISHOP method, role of geosynthetics in slope stabilization, of PK (240 + 847)/A1 highway. *ALGÉRIE ÉQUIPEMENT*. 2019. N°60. P. 06-12.

Статті у фахових виданнях:

5. Dahoua L., Savenko V., Hadji R. Mathematical approach to estimation of the stabilizing effect of geosynthetic floats for the stability of hands. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2020. Вип. 107. С. 23-33.
6. Дахуа Л. Проектування укосів насипів автомобільних доріг армованих геосинтетичними матеріалами з використанням удосконаленого методу Бішоп. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 106. С. 24-30.
7. Савенко В.Я., Дахуа Л. Определение наиболее эффективного метода расчета устойчивости откосов. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017. Вип. 101. С. 116-127.
8. Савенко В.Я., Хаджі Р., Дахуа Л. Исследование устойчивости откосов на методами предельного равновесия и конечных элементов. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017. Вип. 100. С. 284-295.
9. Савенко В.Я., Хаджи Р., Дахуа Л. Обоснование методов определения грунтово-геологических характеристик откосов сооружений. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. Вип. 97. С. 196-206.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. Dahoua L., Savenko V., Hadji R., Zahri F. Landslide Susceptibility Mapping Using Analytic Hierarchy Process Method in BBA-Bouira Region, Case Study of East-West Highway, NE Algeria. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*. Springer International Publishing AG 2018. P. 1837-1840. (Scopus). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_532

11. Дахуа Л., Ласкорунський С.В. Геосинтетика в дорожньому будівництві. *LXXI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2015. С. 141.

12. Дахуа Л. Натурные и лабораторные исследования физико-механических характеристик грунтового массива на участке автомагистрали «Восток-Запад» Алжира для определения коэффициента устойчивости откоса. *LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2016. С. 123-124.

АНОТАЦІЯ

Дахуа Ламрі. Удосконалення методу розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів (на прикладі Алжиру). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

У результаті виконаної дисертаційної роботи здійснено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні методу Бішопа для розрахунку стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів для умов Алжиру. Актуальність теми підтверджується передумовами (зсуви, оповзні, наслідки землетрусів), які виникають на дорожній мережі Алжиру. Також актуальність підтверджується тим, що в умовах Алжиру не існує простого інженерного методу розрахунку стійкості схилів і укосів виїмок чи насипів із комплексним врахуванням сил від дії землетрусів, ґрунтових вод та утримуючих сил від армування.

Суть удосконалення методу полягає у введенні значень змінних (c') і (φ') в критерій руйнування Кулона-Мора з метою врахування втрати ґрунту, параметр (F^s) для врахування впливу сейсмічних зусиль, силу (r) для врахування частини води, що просочилася, і армуючої сили від шарів геосинтетиків (G_{eo}) у багатокутник сил Бішопа, який повинен бути в рівновазі.

На основі розробленого методу у дисертаційній роботі розроблена методика розрахунку армованих геосинтетичними матеріалами укосів земляного

полотна автомобільних доріг, яка дозволяє робити інженерні розрахунки стійкості укосів земляного полотна автомобільних доріг та схилів.

У роботі також було виконане математичне та числове моделювання стійкості укосів і схилів та перевірка адекватності розробленого методу.

Ще однією із задач досліджень було розроблення методу застосування геоінформаційних систем (ГІС) для прокладання трас нових автомобільних доріг в умовах гірського Алжиру з врахуванням оцінки стійкості схилів. Розроблений метод аналізу даних ГІС дозволив побудувати карту зсувів на автомобільній дорозі А1 провінція Буйра. Розрахована нова траєкторія траси значно знижує ризики (до 30 %) і втрати дорожньої галузі при зміні траєкторії всього лише в 21 % при обході районів з найбільш високою ймовірністю виникнення зсувів.

Ключові слова: автомобільна дорога, армування, Бішоп, геосинтетичний матеріал, землетрус, земляне полотно, коефіцієнт безпеки, стійкість, схил, укіс.

АННОТАЦИЯ

Дахуа Ламри. Совершенствование метода расчета устойчивости откосов земляного полотна автомобильных дорог и склонов (на примере Алжира). - Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы» (192 – Строительство и гражданская инженерия). – Национальный транспортный университет, Киев, 2021.

В результате выполненной диссертационной работы осуществлено теоретическое обобщение и новое решение научно-прикладной задачи, которая заключается в совершенствовании метода Бишопа для расчета устойчивости откосов земляного полотна автомобильных дорог и склонов для условий Алжира. Актуальность темы подтверждается предпосылками (оползни, последствия землетрясений), которые возникают на дорожной сети Алжира. Также актуальность подтверждается тем, что в условиях Алжира не существует простого инженерного метода расчета устойчивости склонов и откосов выемок или насыпей с комплексным учетом сил от действия землетрясений, грунтовых вод и сил от армирования.

Суть усовершенствования метода заключается во введении значений переменных (c') и (ϕ') в критерий разрушения Кулона-Мора с целью учета усталости грунта, параметр (F^s) для учета влияния сейсмических усилий, силу (r) для учета части воды, просочившейся и армирующей силы от слоев геосинтетиков (G_{eo}) в многоугольник сил Бишопа, который должен быть в равновесии.

На основе разработанного метода в диссертационной работе разработана методика расчета армированных геосинтетических материалов откосов земляного полотна автомобильных дорог, которая позволяет проводить инженерные расчеты устойчивости откосов земляного полотна автомобильных дорог и склонов.

В работе также было выполнено математическое и численное моделирование устойчивости откосов и склонов и проверка адекватности разработанного метода.

Еще одной из задач исследований была разработка метода применения географических информационных систем (ГИС) для оценки устойчивости склонов в горных районах Алжира. Разработанный метод анализа данных ГИС позволил построить карту оползней на автомобильной дороге А1 провинция Буйра. Рассчитана новая траектория трассы значительно снижает риски (до 30 %) и потери дорожной отрасли при изменении траектории всего лишь в 21 % при обходе районов с наиболее высокой вероятностью возникновения оползней.

Ключевые слова: автомобильная дорога, армирование, Бишоп, геосинтетический материал, землетрясение, земляное полотно, коэффициент безопасности, устойчивость, склон, откос.

ABSTRACT

Dahua Lamri. Improvement of the method for calculating the stability of the escarpments of the road subgrade and slopes (on the example of Algeria). – Qualification scientific paper as a manuscript.

Thesis for the candidate degree of Technical Sciences in specialty 05.22.11 "Highways and airfields" (192 - Construction and civil engineering). - National Transport University, Kyiv, 2021.

As a result of the Thesis, a theoretical generalization and a new solution of the scientific-applied issue, which is to improve the Bishop's method for calculating the stability of the road subgrade escarpments and slopes for the conditions of Algeria was carried out. The relevance of the topic is confirmed by the preconditions (shifts, landslides, consequences of earthquakes) that occur on the road network of Algeria. As in all Mediterranean countries, Algeria is severely affected by unforeseen shifts. In recent years, these shifts have tended to increase, leading to large losses in many sectors of the economy and, in particular, in road infrastructure.

The relevance is also confirmed by the fact that in Algeria there is no simple engineering method for calculating the stability of escarpments and slopes of excavations or embankments, taking into account the forces of earthquakes, groundwater and restraining forces of reinforcement.

The essence of improving the method is to enter the values of variables (c') and (ϕ') in the Coulomb-Mohr failure criterion to take into account soil fatigue, parameter (F_s) to take into account the impact of seismic forces, force (r) to take into account part of the leaked water, and the forces (G_{eo}) occur from the inclusion of geosynthetic layers in the polygon of Bishop's forces, which must be in equilibrium.

The action of groundwater on the state of the shifting slope is manifested in different ways, causing a change in the stress state of the array and the physical and mechanical properties of soils, as well as causing the development of filtration deformations. Its influence is taken into account by the calculation of pore pressure and

the corresponding coefficient of pore pressure, which was once proposed by Bishop and Morgenstern.

The impact of earthquakes was taken into account by the introduction of additional forces acting in the horizontal and vertical directions. In our method the assumption that the filtration and seismic forces are shear forces is accepted, ie directed parallel to the base of the compartment.

As a result, we obtained a new engineering method for calculating the stability of escarpments and slopes;

On the basis of the developed method in the dissertation work the technique of calculation of the geotextile-reinforced slopes of road subgrade which allows making engineering calculations of stability of escarpments of the road subgrade and slopes is developed;

Mathematical and numerical modeling of the stability of escarpments and slopes and verification of the adequacy of the developed method were also performed in the work.

Four variants of retaining structures for the slope of PC 240 + 847 of the motorway A1 were investigated. Numerical calculation with the use of the finite element method shows that the strengthening of slopes by geosynthetic layers gives better stability compared to other proposals.

Another task of the research was to develop a method of using geographic information systems (GIS) to evaluate the stability of slopes in the mountainous areas of Algeria. The main purpose of this part of the study was to evaluate the predisposition of soils in the Hanifa area to landslides in order to suggest an alternative road route that is less prone to such phenomena based on geographic information systems and the developed improved Bishop's method.

A method of GIS data analysis has been developed, on the basis of which a map of landslides in Algeria on the highway A1 in the Buirae district has been constructed. This method allows making more accurate design decisions when designing highways in the mountainous conditions of Algeria. In particular, the calculated new trajectory of the route significantly reduces the risks (up to 30%) and losses of the road industry when changing the trajectory of only 21% when bypassing the areas with the highest risks of landslides.

Keywords: road, reinforcement, Bishop, geosynthetic material, earthquake, subgrade, safety factor, stability, slope, escarpments.