

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Гринюк Петро
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Застосування 3D сканування для оцінки деформацій тунелів та виявлення небезпечних зон »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

П. Гринюк, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Ірина Боднарук
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Гринюк Петро

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Застосування 3D сканування для оцінки деформацій тунелів та виявлення небезпечних зон»

керівник роботи: к.т.н. доцент Ірина Боднарук

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Інженерна підготовка проекту
2. 3D лазерні рішення для застосування
3. Результати та аналіз 3D лазерного сканування

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Інженерна підготовка проекту		
2	3D лазерні рішення для застосування		
3	Результати та аналіз 3D лазерного сканування		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Гринюк П.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Боднарук І.***

Анотація

Метою даної бакалаврської роботи є аналіз ефективності застосування технології 3D лазерного сканування для моніторингу геометричних параметрів та виявлення дефектів у процесі будівництва тунельних споруд, зокрема на прикладі Бескидського тунелю.

Актуальність теми:

Контроль геометрії тунелів під час будівництва є складним і відповідальним завданням, що вимагає високої точності та оперативності.

Традиційні методи, зокрема тахеометричні вимірювання, хоча й дають достатню точність, є трудомісткими та потребують значних часових ресурсів.

У цьому контексті впровадження 3D лазерного сканування як засобу автоматизованого та високоточного збору просторових даних є надзвичайно актуальним, особливо з огляду на сучасні вимоги до безпеки та якості будівництва інженерних споруд.

Наукова новизна:

У роботі вперше проведено порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою 3D лазерного сканування та традиційної тахеометрії, у контексті тунельного будівництва.

Досліджено точність виявлення дефектів та відхилень форми тунелю з використанням тривимірних даних, а також встановлено залежність точності результатів від параметрів розміщення сканувальних станцій.

Практична цінність:

Результати роботи можуть бути впроваджені в практику будівництва та експлуатації тунельних об'єктів для підвищення ефективності геометричного контролю.

Методика 3D-сканування дозволяє своєчасно виявляти критичні деформації або дефекти з високою точністю, що сприяє підвищенню безпеки та зниженню ризиків під час спорудження та обслуговування інженерних конструкцій.

Ключові слова:

3D лазерне сканування, тунель, Бескидський тунель, геометричний контроль, просторовий аналіз, деформації, дефекти, тахеометричні вимірювання, інженерна геодезія.

Abstract

The purpose of this bachelor's thesis is to analyze the effectiveness of using 3D laser scanning technology to monitor geometric parameters and detect defects in the process of tunnel construction, in particular, using the example of the Beskydy Tunnel.

Topic relevance:

Controlling the geometry of tunnels during construction is a complex and responsible task that requires high accuracy and efficiency.

Traditional methods, in particular total station measurements, although they provide sufficient accuracy, are laborious and require significant time resources.

In this context, the implementation of 3D laser scanning as a means of automated and high-precision spatial data collection is extremely relevant, especially given the modern requirements for the safety and quality of construction of engineering structures.

Scientific novelty:

The work first conducted a comparative analysis of the results obtained using 3D laser scanning and traditional total station measurements in the context of tunnel construction.

The accuracy of detecting defects and deviations in the shape of the tunnel using three-dimensional data was investigated, and the dependence of the accuracy of the results on the parameters of the placement of scanning stations was established.

Practical value:

The results of the work can be implemented in the practice of construction and operation of tunnel facilities to increase the efficiency of geometric control.

The 3D scanning method allows for timely detection of critical deformations or defects with high accuracy, which contributes to increasing safety and reducing risks during the construction and maintenance of engineering structures.

Keywords:

3D laser scanning, tunnel, Beskydy Tunnel, geometric control, spatial analysis, deformations, defects, tacheometric measurements, engineering geodesy.

Зміст

Вступ

1. Інженерна підготовка проекту

2. 3D лазерні рішення для застосування

2.1 Застосування 3D лазерного сканування

2.1.1 Процес використання 3D лазерного сканування

2.1.2 Тривимірне вимірювання зони лазерного сканування

2.1.3. Розташування станцій 3D лазерного сканування

2.2. Оптимізація опрацювання даних 3D-лазерного сканування

2.2.1. Підвищення точності вимірювань

2.2.2. Оптимізація зашумленості хмари точок

3. Результати та аналіз 3D лазерного сканування

3.1 Оцінка пошкоджень тунелю

3.2. Моніторинг первинного підтримання

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Поверхневі тріщини є невід'ємним наслідком проходки тунелів із застосуванням буропідривних робіт і безпосередньо впливають як на якість, так і на економічну ефективність споруди.

Надмірне збільшення поперечного перерізу тунелю тягне за собою збільшення об'єму вийнятого ґрунту, що, у свою чергу, призводить до підвищення вартості бетонування конструкції.

З іншого боку, якщо тунель вирито на недостатню глибину, висота буде недостатньою, і виникне необхідність додаткового вилучення ґрунту.

Повторне вилучення ґрунту створює нові надмірні земляні роботи, що затримує будівництво і підвищує витрати.

Крім того, значна деформація на ділянці тунелю може негативно позначитися на напруженому стані навколишнього масиву гірських порід та знизити стабільність всієї споруди.

Контроль первинної опорної порожнини відіграє критичну роль у забезпеченні якості обшивки тунелю.

Якщо первинна структура перевищує допустимі параметри вторинного облицювання, можливо зменшення товщини вторинного облицювання, що призводить до втрати необхідної міцності конструкції.

У випадку перевищення первинним облицюванням встановлених лімітів, необхідно застосовувати додаткове тимчасове армування, радіальне цементування або зміну геометрії арки, що суттєво ускладнює процес будівництва і збільшує загальні витрати.

Водночас, якщо зазор між первинними опорами стає надмірно великим, виникає потреба у збільшенні товщини вторинних опор, що підвищує їх жорсткість, але водночас зменшує їх опір на вигин.

Традиційні методи контролю геометрії тунелю передбачають крупнопланове фотографування, тахеометричні вимірювання та візуальний огляд.

У разі застосування фотографічного методу, в тунелі розміщують вимірювальну станцію, проводять контрольні лінії та отримують зображення з трьох різних ракурсів для створення 3D-моделі, яку порівнюють із проектним профілем тунелю.

Використання тахеометра дає змогу визначати профіль тунелю за допомогою точкових вимірювань на окремих ділянках та оцінювати ступінь деформації поверхні тунелю після чергового етапу проходки.

Однак традиційні методи мають суттєві недоліки, зокрема, значне навантаження на фахівців, обмежену кількість точок вимірювання, низьку точність та невисоку ефективність.

Візуальний контроль застосовується як додатковий метод до основного, але є більш суб'єктивним і вимагає значного досвіду у проходці тунелів.

Порівняння 3D лазерного сканування та традиційних методів вимірювання тунельних конструкцій представлено у таблиці 1.

Таблиця 1: Порівняння 3D лазерного та звичайного методів вимірювання

Метод	Ефективність вимірювання	Точність вимірювання	Формат даних	Інтенсивність роботи
3D лазер	Мільйони хмар точок за секунди	Висока точність (мм)	3D хмара точок	Низька
Фотограмметричні методи	Необхідне розташування великої кількості контрольних точок	Менш точний	Зображення високої чіткості	Відносно низька
Тахеометрична зйомка	Повільна швидкість	Велика відстань		Відносно високий

	вимірювання	між точками вибірки, недостатня точність		
--	-------------	---	--	--

1. Інженерна підготовка проекту

Бескидський тунель пролягає межею між Львівською та Закарпатською областями, що робить його стратегічно важливим для України.

Він слугує для транспортування вантажів до західних рубежів держави, обробляючи понад 60% товарів, які йдуть транзитом до країн Центральної та Західної Європи.

Щоб оптимізувати фінансові витрати, спочатку планувалось зведення тунелю одночасно з двох боків, але зрештою вирішили будувати тільки з одного.

Таке рішення дало змогу зменшити обсяг підготовчих робіт та заощадити близько 180 мільйонів гривень.

Бескидський тунель є другим за довжиною серед подібних споруд в Україні.

Його протяжність складає 1764 м, ширина - 10,5 м, а висота досягає 8,5 м.

На 2017 рік через Карпати за добу курсувало лише 42 потяги.

Основні етапи будівництва Бескидського тунелю:

- 2007 рік – Запуск проекту, старт інженерно-геодезичних вишукувань, профінансованих Європейським банком реконструкції та розвитку (ЄБРР).

- 2013 рік – Фінальне затвердження проектної документації та початок основних будівельних робіт.

- Довжина нового тунелю: 1764,5 м, ширина: 10,5 м, висота: 8,5 м;

- Загальна вартість проекту: 102 млн євро.
- Гарантійний термін експлуатації: 100 років.

Водночас, старий одноколіїний тунель у цьому регіоні знаходиться в експлуатації понад 130 років.

Новий Бескидський тунель обладнано найсучаснішими системами безпеки, зокрема, камерами відеоспостереження при вході, виході та всередині споруди, а також спеціальними датчиками для контролю якості повітря.

Встановлені системи витяжної вентиляції забезпечують належну вентиляцію в тунелі.

Через своє стратегічне значення, Бескидський тунель є критичним елементом пан'європейського транспортного коридору, що проходить через Італію, Словенію, Угорщину, Словаччину та Україну.

Географічне розташування Бескидського тунелю представлено на рисунку 1.



Рисунок 1: Розташування Бескидського тунелю.

Загальна площа підземних об'єктів Бескидського тунелю налічує 6 000 квадратних метрів.

Загальна довжина всіх елементів тунельного комплексу досягає 14 998,25 квадратних метрів.

Сполучення між окремими ділянками тунелю забезпечується спеціальними перехідними зонами значної протяжності, що з'єднують подвійні колії на вході та виході з тунелю.

Довжина зони переходу, що розташована на станції, дорівнює 267 метрів.

Найбільший переріз тунелю в поперечному розрізі становить 494,4 квадратних метри.

При цьому максимальна ширина сягає 12,7 метрів, а висота - 8,5 метрів.

Розподіл основних груп бескидських тунелів ілюструє Рисунок 2.

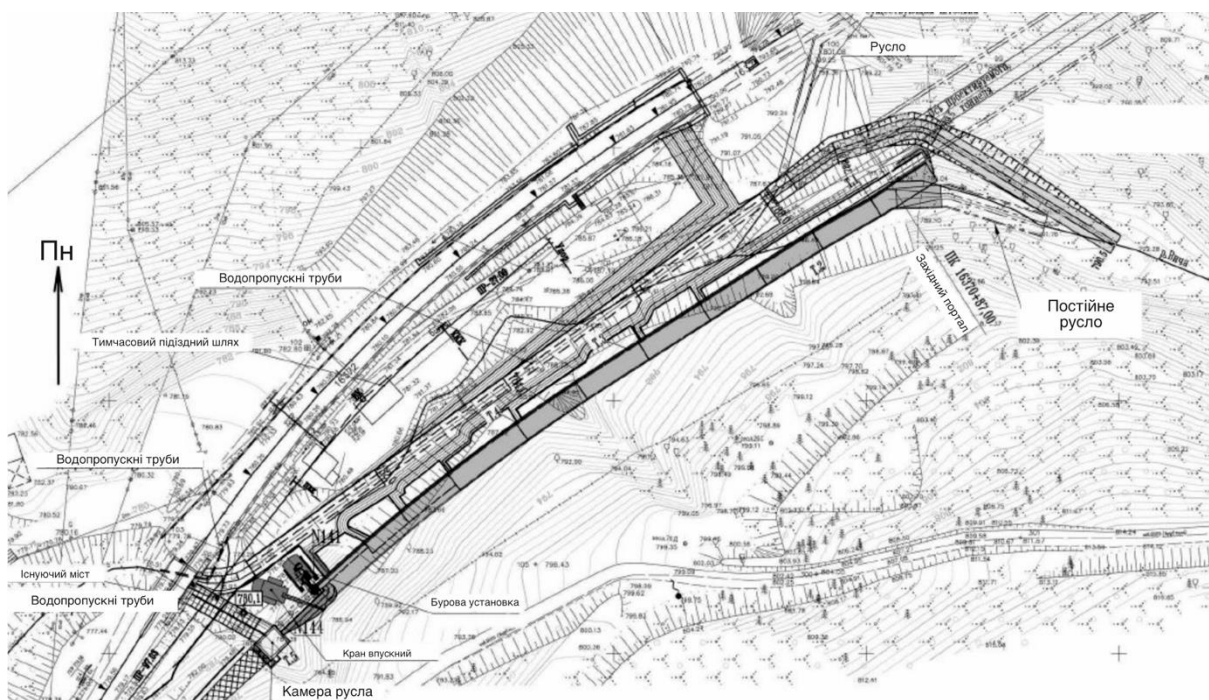


Рисунок 2: Розподіл різних груп Бескидського тунелю.

Перехідна зона тривалої протяжності характеризується слабкою структурою з корінних порід, що суттєво ускладнює процес будівництва.

2. 3D лазерні рішення для застосування

Для дослідження ми застосували 3D лазерний сканер Faro Focus 3D 120.

Він здатний сканувати простір з показником 20 метрів за 3 хвилини, працюючи на відкритому повітрі, та генерує 976 000 точок щосекунди.

На одну станцію вимірювання виділялося від 2 до 5 хвилин, що залежало від особливостей процесу зйомки.

Похибка вимірювань складала 2 мм при 10% відбивної здатності, та 0,6 мм при 90% відбиття.

Діапазон сканування сканера знаходиться в межах від 0,6 до 150 метрів.

Зі збільшенням дистанції та зменшенням щільності хмари точок, точність результатів може зменшуватися.

Частотний діапазон сканування пристрою – 122-976 Гц, а характеристики лазера такі: довжина хвилі – 905 нм, вихідна потужність – 20 мВт, клас лазера – 3R.[4]

Детальну технічну специфікацію сканера можна переглянути в таблиці 2.

Таблиця 2: Індикатори параметрів FARO Focus 3D.

Параметри	Точність	Частота сканування	Горизонтальне поле	Вертикальне поле	Час сканування
Значення	2мм	500Гц	360 ⁰	305 ⁰	2-5 хв.

Система тривимірного лазерного сканування включає такі ключові елементи (див. мал. 3):

- 3D лазерний сканер
- Спеціалізований штатив
- Дві призми сферичної форми
- Чотири кулясті мішені для калібрування та поєднання сканів



Рисунок 3: Обладнання системи лазерного 3D-сканування.

Для локалізації цілі, що має форму кулеподібної призми, застосовуються системи 3D лазерного сканування, які дають змогу інтегрувати дані глобального 3D сканування з даними 3D координатного позиціонування.

Це полегшує подальшу обробку хмари точок, забезпечуючи чітке узгодження та зіставлення з інформацією поперечного перерізу.

Кулясті мішені використовуються як опорні пункти для позиціонування, гарантуючи високу точність, що досягає до 0,1 мм.[4]

2.1 Застосування 3D лазерного сканування

2.1.1 Процес використання 3D лазерного сканування

Виникла змога збирати інформацію з лазерної хмари точок, відображаючи обриси підземних зон, і встановлювати чіткі координати об'єкта.

Ключові характеристики сканування: дистанція між точками сканування – 40 м, період сканування для однієї позиції – від 2 до 5 хвилин.

Здійснено введення абсолютних координат об'єктів території, злиття даних хмари точок тунелю, підготовка та ущільнення інформації з хмари точок підземної частини тунелю.

Також здійснено обробку отриманих даних, яка включала: - побудову карти хмари точок тунелю; - створення карти тунелю; - автоматичне формування звіту.

Результати були проаналізовані за допомогою програмного забезпечення FARO SCENE, високопродуктивного інструменту для роботи з 3D-хмарами точок.[4],[6]

Основні функції FARO SCENE:

- 3D Area stopping - можливість виокремлення окремих фрагментів у вигляді кубів для поглибленого дослідження
- Генерація ортофотопланів – створення масштабованих 2D зображень, які сумісні з більшістю CAD-систем
- Автоматична реєстрація точності – швидке з'єднання окремих хмар точок без необхідності розміщення штучних цілей
- Інтеграція з базою даних проекту – збереження історії проекту та можливість легко повернутися до будь-якої стадії процесу
- 3D стерео відображення – можливість перегляду даних сканування в стереоскопічному режимі для отримання додаткової інформації.



Рисунок 4: Процес застосування 3D лазерного сканування.

2.1.2 Тривимірне вимірювання зони лазерного сканування

Принципове зображення пристрою для 3D-сканування представлено на рисунку 5.[4]

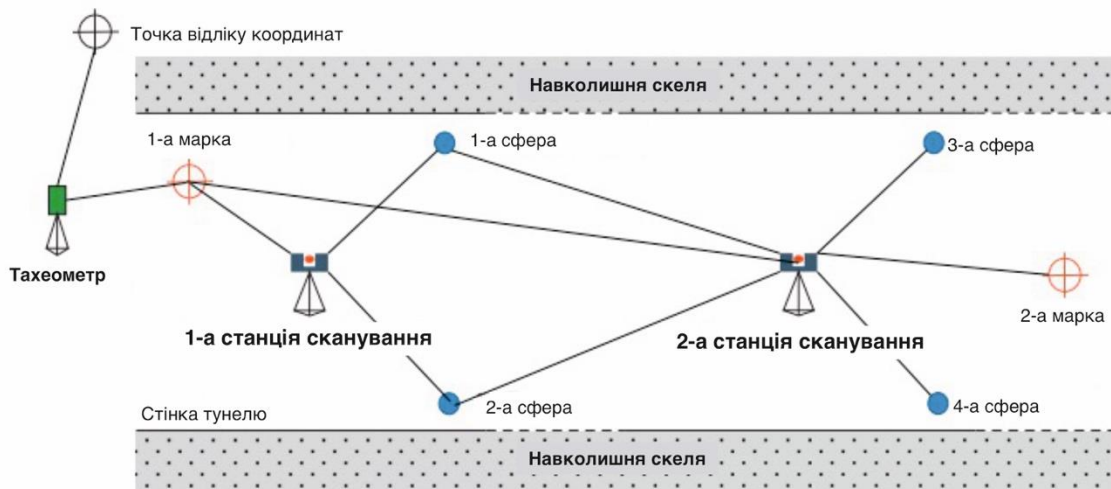


Рисунок 5: Принципова схема станції 3D-сканування.

Не зважаючи на те, що фактичні координати референтної точки відомі, для досягнення точного позиціонування абсолютні координати визначаються згідно з маркером 1, використовуючи інформацію з тахеометра.

Завданням позиціонування цілі є надання точних абсолютних координат для хмари лазерних точок.

Це дозволяє з високою точністю корелювати дані з різних сканувальних позицій, а також реалізовувати їх подальший аналіз та зіставлення з тунельною ділянкою.

Для цього застосовуються глобальні орієнтирні мішені, котрі сприяють швидкій та точній прив'язці даних хмари точок, що були отримані суміжними сканувальними позиціями.

Орієнтирну мітку 1 необхідно розмістити так, щоб було можливе зчитування даних з неї як з позиції сканування 1, так і з позиції сканування 2.[4]

Мітка 2, що використовується для подальшої орієнтації, розташовується після місця сканування 2, а хмара точок, зібрана з позиції 2, дозволяє визначити взаємне розташування міток 1 та 2. На основі цих даних розраховуються абсолютні координати мітки 2.

Вимірювання з використанням 3D лазерного сканера передбачає низку послідовних етапів, кожен з яких вимагає точності для досягнення найвищої якості та надійності зібраної інформації.[4]

Нижче представлений детальний опис процедури вимірювання.

1. Підготовчий етап.

Першим кроком є розміщення позиційної мітки 1 в межах території об'єкта, що підлягає вимірюванню.

Це забезпечує формування лінії візування від опорної точки координат до мітки.

Далі визначаються абсолютні координати цієї мітки для забезпечення точності подальших вимірювань.

2. Початкове налаштування станції сканування.

Встановіть станцію сканування 1 на відстані приблизно 20 метрів від об'єкта вимірювання в напрямку розташування мітки.

Для точного зведення даних сканера та хмари точок розмістіть сфери позиціонування FARO Focus 3D 1 та 2 з обох боків, на відстані 40 метрів одна від одної в напрямку вимірювання, на фіксованій висоті.

Для полегшення ідентифікації та збільшення точності подальших вимірювань необхідно забезпечити певну різницю у висоті між цими сферами.[6]

3. Сканування та збереження даних.

Після встановлення станції та налаштування обладнання, ввімкніть лазерний сканер і розпочніть процес вимірювання.

Лазерний сканер здійснює кругове сканування (360° по горизонталі) для отримання детальної хмари точок.

Після завершення сканування на екрані відображається карта хмари точок, що відповідає поточній позиції станції.

Збереження даних є ключовим етапом, який закладає фундамент для майбутнього аналізу.

4. Після завершення вимірювань на першій станції, лазерний сканер переміщується на 40 метрів до наступної точки.

Сфери позиціонування 3 та 4 використовуються для подальшого з'єднання масивів даних та знаходяться на відстані 20 метрів від місця вимірювання.

Сфери позиціонування 1 та 2 залишаються нерухомими та дозволяють продовжити вимірювання з точним зв'язуванням з попередніми отриманими даними.

5. Після переміщення станції, увімкніть лазерний сканер та продовжуйте процес вимірювання.

Проаналізуйте карту хмари точок для кожної станції та зіставте її з попередніми результатами, щоб контролювати точність вимірювань.

6. Дії, описані у пунктах 4 та 5, повторюються для кожної наступної секції станції до повного сканування всіх внутрішніх контурів тунелю або станції та їх запису в хмару точок.

Таким чином, використовуючи декілька станцій сканування та точне позиціонування, можна створити детальну та коректну модель тунелю.

Цей процес забезпечує отримання точних даних для подальшого аналізу та моделювання, що є особливо важливим для точних інженерних розрахунків та будівельних проєктів.[4]

2.1.3. Розташування станцій 3D лазерного сканування.

Оскільки тунелі є вузькими та замкнутими просторами, при здійсненні сканування поперечних перерізів за допомогою 3D лазерного

сканера, варто брати до уваги той факт, що розподіл хмар точок зазнає зсуву через просторове положення пристрою.

Це здатне вплинути на точність даних, отриманих в процесі сканування, тому життєво важливо ретельно спланувати розташування станцій з метою мінімізації цього впливу.

Грамотне розміщення станцій сканування може пом'якшити наслідки нерівномірного розподілу хмар точок.

Наприклад, деякі області тунелю можуть бути відображені на мапі недостатньо чітко через обмежене покриття, яке забезпечує кожна станція.

Проте, існують й інші аспекти, які варто врахувати, серед яких — експлуатаційні витрати та точність станцій, а також час, затрачений на налаштування та вимірювання.

Усі ці чинники відіграють значну роль для досягнення ефективності та економічної доцільності процесу днопоглиблення.

Для оптимізації розміщення станцій в тунелі було прийнято рішення розділити його на 20 зон для проведення вимірювань.[4]

Загалом, було встановлено 38 вимірювальних станцій для забезпечення сканування всього тунелю.

Кожна станція була розташована в центрі відповідної зони сканування, для забезпечення найбільшого покриття території сканування з одночасним досягненням максимальної точності зібраних даних.

Розподіл зон сканування в тунелі проілюстровано на рисунку 6.[4]

Такий підхід допомагає уникнути проблем, пов'язаних з недостатнім покриттям або обмеженою видимістю певних ділянок тунелю, та гарантує рівномірне й точне сканування всієї площі.

Цей підхід до планування обстеження забезпечує баланс між економічною обґрунтованістю та високою якістю отриманих даних, що призначені для подальшого аналізу та проектування.

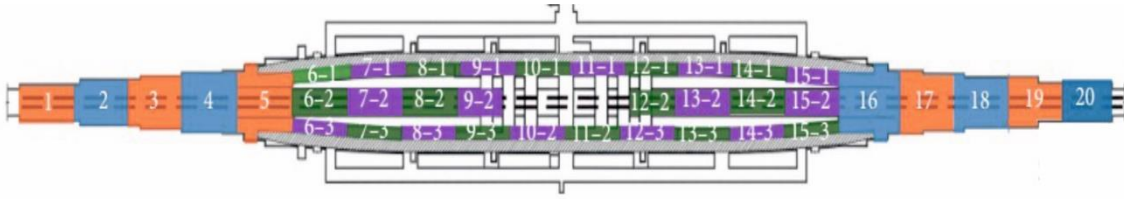


Рисунок 6: Схема зони сканування

Під час лазерного 3D-сканування тунелів на точність впливає сукупність факторів, таких як розподільча здатність, місце розташування сканера та тривалість сканування; застосовуючи 3D-сканер у режимі високої роздільності, ми досягаємо точності вимірювання 2 мм на дистанції 20 м.

Цей показник відповідає мінімально необхідним стандартам точності для проектування підземних споруд, включно з тунелями.[7]

Загальна довжина L вимірювальної ділянки складає 40 м, що вважається оптимальним значенням для ефективного охоплення території.

Ширина H сканованої області визначається параметрами конкретної зони.

У Зоні 1 передбачається ширина ділянки тунелю в 15 м, а в Зоні 6 – 8 м.

Для зони 7 прогнозується ширина тунелю в 10 м.

Це гарантує рівномірне покриття кожної ділянки тунелю, завдяки адаптації параметрів сканування до особливостей тунелю.

Мінімальна точність вимірювань на станції 1 становить 2 мм, що забезпечує відповідність проектним вимогам та критеріям точності.

Розрахункова точність вимірювань у зоні 6 дорівнює 3 мм, що підтверджує ефективність обраної методики сканування, оскільки вона відповідає вимогам проектування тунелю.[4]

2.2. Оптимізація опрацювання даних 3D-лазерного сканування

Програмний продукт FARO SCENE автоматизує процес опрацювання значних обсягів даних, отриманих з 3D хмар точок, суттєво прискорюючи виконання цього завдання.

За допомогою програмного забезпечення можливо виконати опрацювання даних, виділених для однієї станції, менше ніж за 20 хвилин, що дає змогу швидко згенерувати зображення, отримані шляхом лазерного сканування, а також підготувати точні звіти кількісного аналізу.

Завдяки цьому оператор отримує змогу оперативно оцінити поточний стан тунелю та внести відповідні зміни, якщо в цьому є необхідність.

2.2.1. Підвищення точності вимірювань

Підвищення точності вимірювань є критичним етапом у процесі 3D-сканування, який залежить від декількох ключових аспектів:

1. Кутова роздільна здатність (ϕ): Цей параметр визначає густоту лазерних точок у хмарі даних на певній дистанції.

Чим більша кутова роздільна здатність, тим щільніша хмара точок на конкретній відстані, що безпосередньо впливає на точність результатів вимірювання.

Тому необхідно використовувати високу кутову роздільну здатність на важливих ділянках тунелю для забезпечення максимальної точності.

2. Розмір області сканування (A): Розмір області вимірювання визначається довжиною (L) та шириною (H) цієї області.

Ці параметри визначають кут падіння (α) лазерного променя та відстань вимірювання (S) від сканера до точки вимірювання.[4]

Правильний вибір розміру області сканування сприяє підвищенню точності сканування в тунелі та мінімізує вплив відстані на результати.

3. Діаметр лазерної плями (D): Розмір лазерної плями збільшується зі збільшенням відстані вимірювання.

Чим більша відстань, тим більша площа дії лазера, що може знижувати точність вимірювань.

Цей фактор необхідно враховувати при виборі відстані до об'єкта та місця розташування скануючої станції.

Для забезпечення оптимального покриття області сканування сканер, як правило, встановлюють у центрі кожної області вимірювання (Див. Рис. 7).[4]

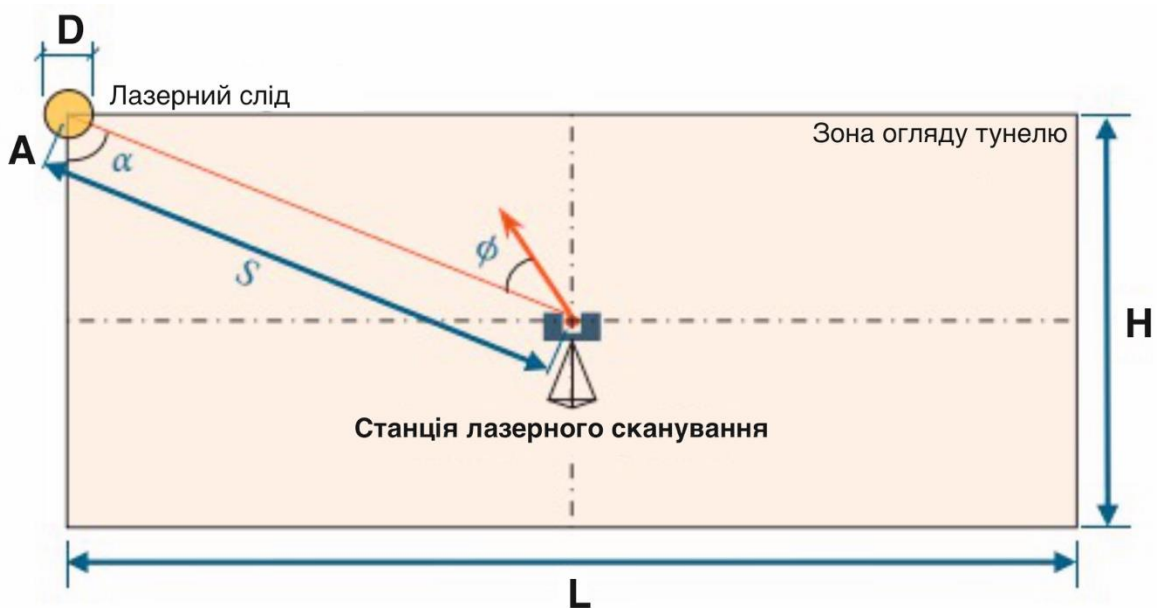


Рисунок 7: Схематична діаграма точності вимірювання сканера

Найменша точність зазвичай спостерігається у кутових точках області, проте цю проблему можна вирішити шляхом ретельного планування та підбору відповідної роздільної здатності.

Для мінімізації помилок та отримання максимально точних даних, які будуть використовуватися для аналізу, проектування та подальшої обробки, ці фактори необхідно ретельно враховувати при розташуванні скануючих станцій.

Помилка вимірювання в конкретному місці зазнає змін згідно з певним, передбачуваним алгоритмом, при цьому є критична межа, яку ця помилка не має права переступати.

У випадку, коли кут, під яким падає лазерний промінь, лишається незмінним, похибка в точці зростає прямо пропорційно до збільшення дистанції вимірювання.[4]

Коли ж відстань до об'єкта стабільна, і враховано вплив кута падіння на точність отриманих даних, похибка в точці визначається за певним розрахунком.

$$\overline{\sigma_p} = \frac{\sigma_p}{\cos\alpha} \quad (1)$$

де α – кут падіння сканування;

$\overline{\sigma_p}$ – похибка в хмарі точок при куті падіння α ;

σ_p – похибка в хмарі точок при куті падіння 0.

Припустимо, що проекція тунелю на земну поверхню — це прямокутник, а лазерний сканер FARO знаходиться на перетині центральної осі тунелю. Тоді, точка з найбільшим кутом падіння — це кутова точка А.

Максимальний кут падіння в робочій зоні вимірювальної станції залежить від багатьох речей: форми тунелю, розташування сканера та відстані до найбільш віддаленої точки, яку потрібно виміряти.

Щоб з'ясувати найбільший кут падіння, треба взяти до уваги:

1. Відстань від лазерного сканера до кутової точки А.
2. Габарити частини тунелю.
3. Як кут падіння змінюється залежно від положення точки сканування відносно тунелю.

Максимальний кут падіння обчислюється визначенням кута між лазерним променем і поверхнею тунелю в точці найбільшого відхилення. Для цього використовуються тригонометричні функції.

$$\alpha_{max} = \arctan\left(\frac{L}{H}\right) \quad (2)$$

де

α_{max} – максимальний кут падіння сканування в межах дальності цієї станції;

L - довжина проекції профілю тунелю, яка називається довжиною станції;

H - ширина проекції профілю тунелю.

Що більша здатність лазерного променя відбиватися, то більшу кількість лазерних імпульсів реєструє сканер. У результаті цього отримуємо чіткіші та детальніші відомості, які значно покращують точність вимірювання.

Для прикладу, якщо коефіцієнт відбиття сягає 90 відсотків, точність вимірювань суттєво зростає, порівняно з коефіцієнтом відбиття, що становить лише 10 відсотків.

На рисунку 8(а) продемонстровано тривимірне зображення хмари точок, зібране лазерним сканером.

Ця візуалізація чітко показує зміни у щільності та загальній якості отриманих даних при різному рівні відбиття.

Підвищення коефіцієнту відбиття сприяє збільшенню обсягу даних про поверхню тунелю, які сканер здатен отримати, що, в свою чергу, забезпечує більш точні вимірювання і формує коректну хмару точок.[4]

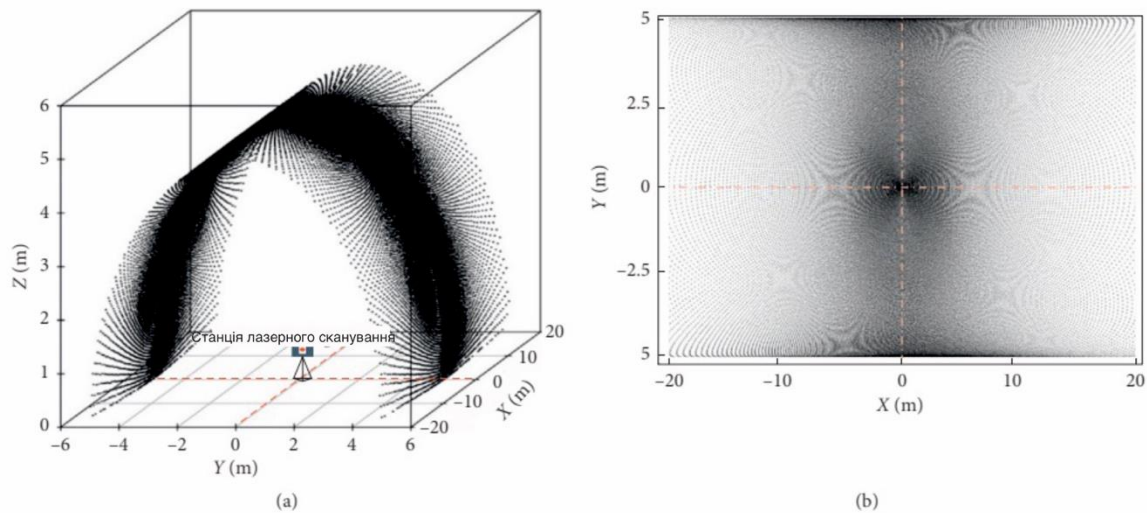


Рисунок 8: Розподіл хмари точок лазерного сканування.

(a) Тривимірний вигляд

(b) Розгорнутий вигляд

На малюнку 8(b) зображено розподіл скупчення лазерних даних, отриманих вздовж центральної осі тунелю.

Перетин тунелю має форму кола, а 3D-лазерний сканер розташовано вздовж центральної лінії.

За допомогою цифрових даних, які представляють різні віддалі, помітно, що щільність хмари точок розподілена неоднорідно в межах 20 метрів від точки сканування.

Найбільша концентрація точок спостерігається безпосередньо поруч зі сканером, натомість щільність знижується на більшій відстані (у кутах тунелю).

Враховуючи, що відстань L між пунктами вимірювання дорівнює H та беручи до уваги рівняння (2), обчислюється, що кут падіння α складає 45° . [4]

Як демонструє малюнок 9(a), щоб забезпечити необхідну точність вимірювань, дистанцію між точкою вимірювання та лазерним сканером у складних умовах (наприклад, якщо коефіцієнт відбиття становить 10%) треба обмежити до 25 м.

Це служить запорукою того, що точність сканування зберігається в допустимих рамках.

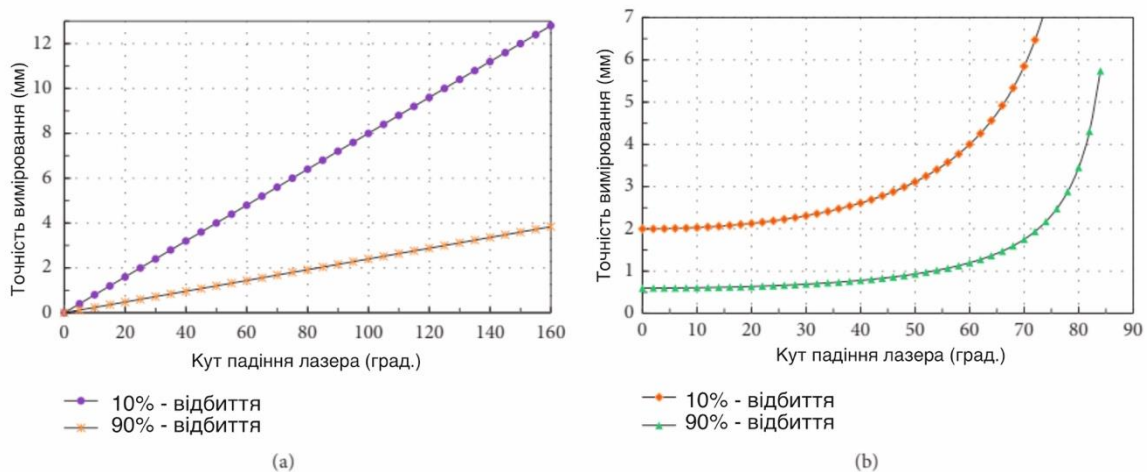


Рисунок 9: Залежність точності вимірювань від дистанції й кута світла.

(a) Точність вимірювання на різних відстанях вимірювання.

(b) Точність вимірювання при різних кутах падіння лазера.

Відповідно до формули (2) та інформації з рисунка 9(б), похибка вимірювання демонструє стрімке збільшення, коли кут падіння перевищує 65° .

При $\alpha = 65^\circ$ довжина L у 2,1 раза перевершує діаметр лазерної мітки D .

Враховуючи специфіку спорудження тунелів, розміщення лазерного сканера безпосередньо на центральній осі тунелю є практично неможливим.

Таким чином, для забезпечення прийнятної точності вимірювань рекомендується обчислювати відстань між точками спостереження в діапазоні $L = (1 \sim 2)D$.

Це дозволить зберегти необхідну точність вимірювань, беручи до уваги технічні обмеження та конструктивні особливості тунельної системи.[5]

2.2.2. Оптимізація зашумленості хмари точок

Природні фактори, такі як забруднене повітря, висока концентрація пилу, наявність великих частинок всередині тунелю, а також присутність робітників та техніки, здатні негативно впливати на процес лазерного сканування. Крім того, і саме обладнання, наприклад, 3D лазерні сканери, може ставати джерелом похибок при зборі даних.

В результаті збирання, формується хмара точок, що часто містить як необхідні дані, так і зайві або зашумлені точки.

Ці надлишкові елементи та шум не лише збільшують загальний обсяг даних хмари точок, але й суттєво впливають на подальший етап обробки та точність кінцевого результату.

З метою зменшення шкідливого впливу зашумлених точок та покращення процесу збору та обробки даних, було проведено серію досліджень, спрямованих на видалення шуму з хмар точок.

Основою для цих досліджень стали методи топології та пошуку околиць:

1. Топологічний аналіз та методи пошуку околиць: Зокрема, використання методу евклідових околиць, базуючись на обчисленні

евклідової відстані, та методу k-найближчих сусідів, для визначення k найближчих сусідів.

Перший з методів оптимальний для кластерів точок, де спостерігається рівномірний розподіл даних; другий метод, тобто, структура k-найближчих сусідів, виявляється більш ефективною у випадку кластерів з нерівномірною щільністю даних, наприклад, поздовжніх кластерів точок.

Основний принцип методу k-найближчих сусідів полягає у обчисленні відстані від кожної точки до всіх інших точок у хмарі, та наступному ранжуванні цих точок за їхньою віддаленістю.

Далі, обираються k точок з найменшою відстанню, як точки-сусіди.

Такий підхід дозволяє ефективно розділити хмару точок для подальшої обробки.[4]

Для пришвидшення обчислень варто вдатися до методів прискорення, наприклад, застосовувати метод швидкої класифікації.

Він передбачає розміщення вимірних значень у кореневий вузол, після чого розподіл інших точок відбувається відповідно до менших значень того ж самого виміру.

2. Застосування лазерного методу дозволяє зменшити вплив шумів на картографічні зображення, сформовані хмарами точок.

Під час фільтрації шуму в таких даних критично важливим етапом є впорядкування хмари точок з подальшим виявленням k найближчих сусідів кожної з них.

Наступний крок передбачає фільтрування шумових точок, ґрунтуючись на статистичному аналізі відстаней між ізольованими шумоподібними точками та їхніми k-найближчими "сусідами".

В основі цього методу лежить припущення про нормальний розподіл медіанної відстані між k-найближчими сусідніми точками у конкретній хмарі.[4]

Згідно з цим припущенням, близько 99,73% всіх точок мають знаходитися в рамках певного діапазону.

Отже, використовуючи цей метод, досягається ефективне усунення аномальних та зашумлених точок, забезпечуючи отримання більш очищених даних.

Це, у свою чергу, сприяє підвищенню точності результатів подальших етапів обробки інформації.

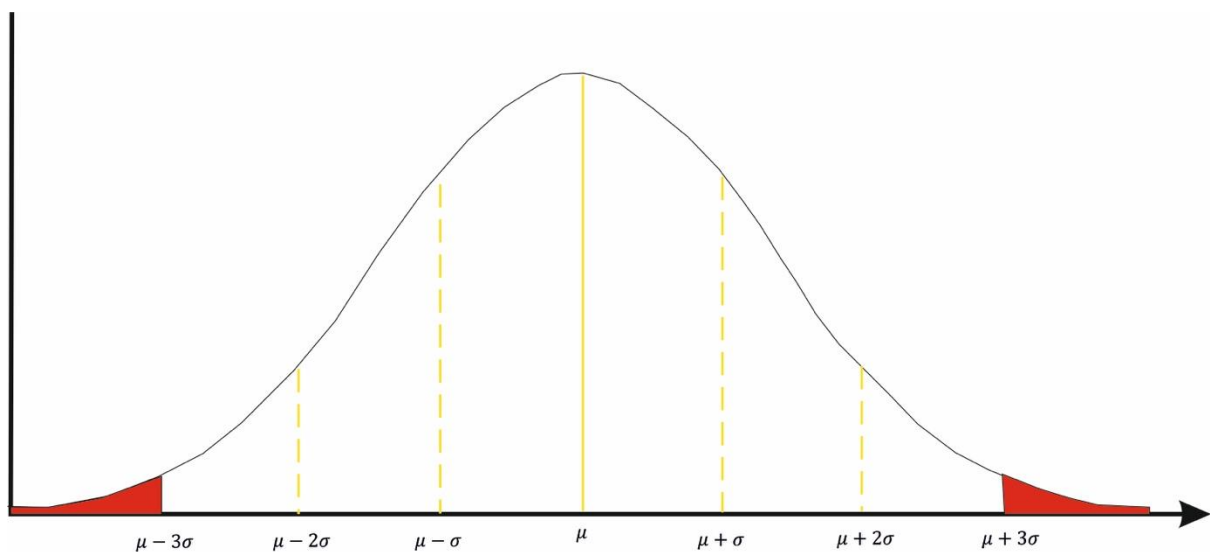


Рисунок 10: Схематичне зображення кривої нормального розподілу

Точки, що потрапляють у заданий інтервал, класифікуються як надійні.

Ті небагато з них, котрі не відповідають вимогам та виходять за межі цього діапазону, визнаються як шумовий елемент і вилучаються.

Межу для виокремлення шумових даних автоматично обчислюють, орієнтуючись на об'єм даних, без потреби в ручному регулюванні.

Це відчутно прискорює процес обробки інформації та збільшує його ефективність.

Якщо середня відстань DD для кожної лазерної точки i до найближчої точки контакту k дорівнює:

$$\mu = \sum_{i=1}^n D_i \quad (3)$$

Стандартне відхилення s є

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(D_i - \mu)^2}{n}} \quad (4)$$

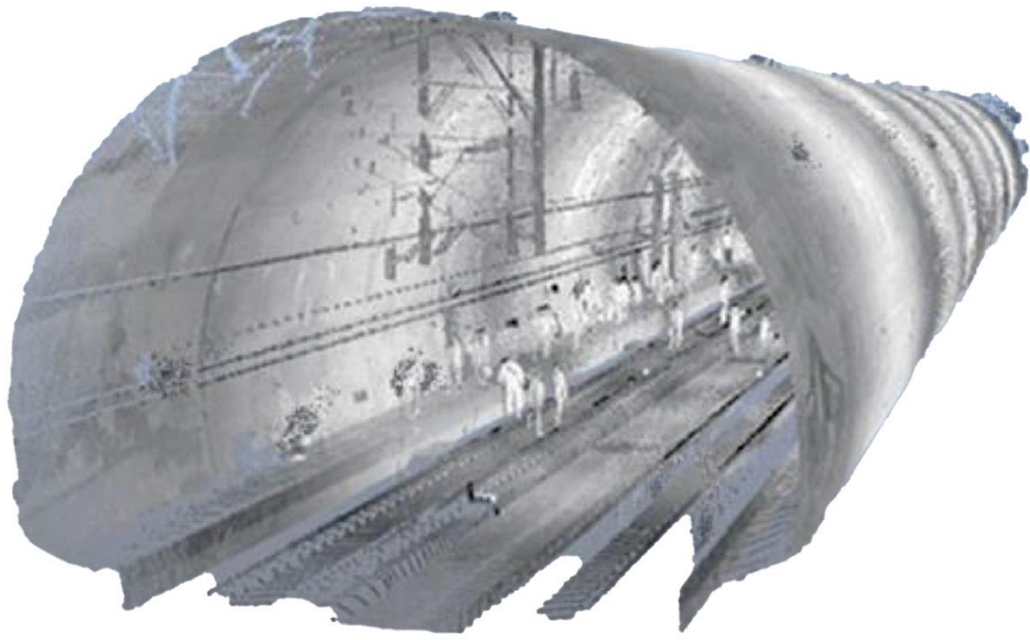
Якщо дистанція D_i кожної точки у хмарі точок відповідає критерію $|\mu - 3\sigma| \leq D_i \leq \mu + 3\sigma$, то така точка вважається валідною лазерною точкою.

В протилежному випадку, коли дистанція виходить за межі цього діапазону, точка класифікується як ізольований шум та автоматично виключається з розгляду.

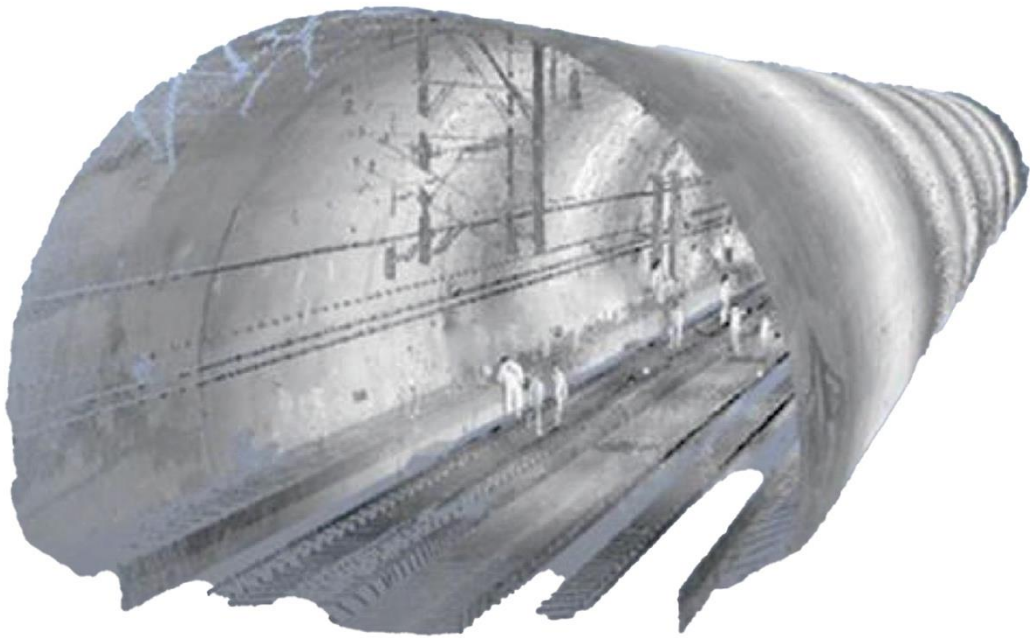
3. Вплив оптимізації очищення від шуму.

На рисунку 11 показано 3D-візуалізацію хмари точок досліджуваного тунелю.[4]

Після застосування методу оптимізації для видалення шумів, кількість точок, які містять шум, значно зменшилася, що позитивно вплинуло на якість отриманих даних та точність подальшого їх аналізу.



a



b

Рисунок 11: Ефект обробки шуму.

(a) Оригінальна карта хмар.

(b) Карта хмари зменшення шуму

Рисунок 11(a) демонструє вихідне 3D-скановане зображення, представлене у вигляді хмари точок, тоді як малюнок 11(б) представляє цю ж хмару після застосування процедури шумоочищення.

Поява шуму на початковому зображенні хмари точок виникає внаслідок дії різноманітних чинників, які негативно позначаються на точності лазерного сканування.

Серед них можна виділити випадкове сміття, залишки будівельних матеріалів, нерівності дорожнього покриття, а також спотворення, пов'язані з контурами дорожнього полотна.

Проведений порівняльний аналіз зображень до та після фільтрації свідчить про успішне усунення практично всіх шумів, асоційованих з лініями контуру тунелю.

Окрім цього, було повністю ліквідовано шум, викликаний будівельними роботами, а також значною мірою знижено рівень шуму в зонах, прилеглих до колій біля нижньої плити.

Важливо відзначити, що в процесі обробки даних не відбулося випадкового видалення жодної значущої точки в області контурів тунелю, що дозволило продовжити подальшу роботу з даними, не зазнаючи значних втрат в точності кінцевого результату.

3. Результати та аналіз 3D лазерного сканування

3.1 Оцінка пошкоджень тунелю

Застосування 3D лазерного сканування забезпечує детальну оцінку затоплення та виявлених ушкоджень тунелю, а також дозволяє з високою точністю визначити обсяги вийнятого ґрунту, обсяги переливу матеріалів, та обсяги робіт з використанням вибухівки.

Досягнута точність вимірювань може сягати міліметрів, що гарантує високий рівень контролю на кожному етапі будівництва.

Точні статистичні дані, здобуті в процесі аналізу робіт з проходження тунелю, складають фундамент для планування подальших земляних робіт та робіт з використанням вибухових речовин.

Це дозволяє ефективно контролювати обсяги вийнятого ґрунту, уникаючи як надмірного, так і недостатнього вилучення.

Разом з тим, збір інформації в тісних тунелях може ускладнюватись низкою факторів, наприклад, обмеженим доступом до ділянок, які важко сканувати.

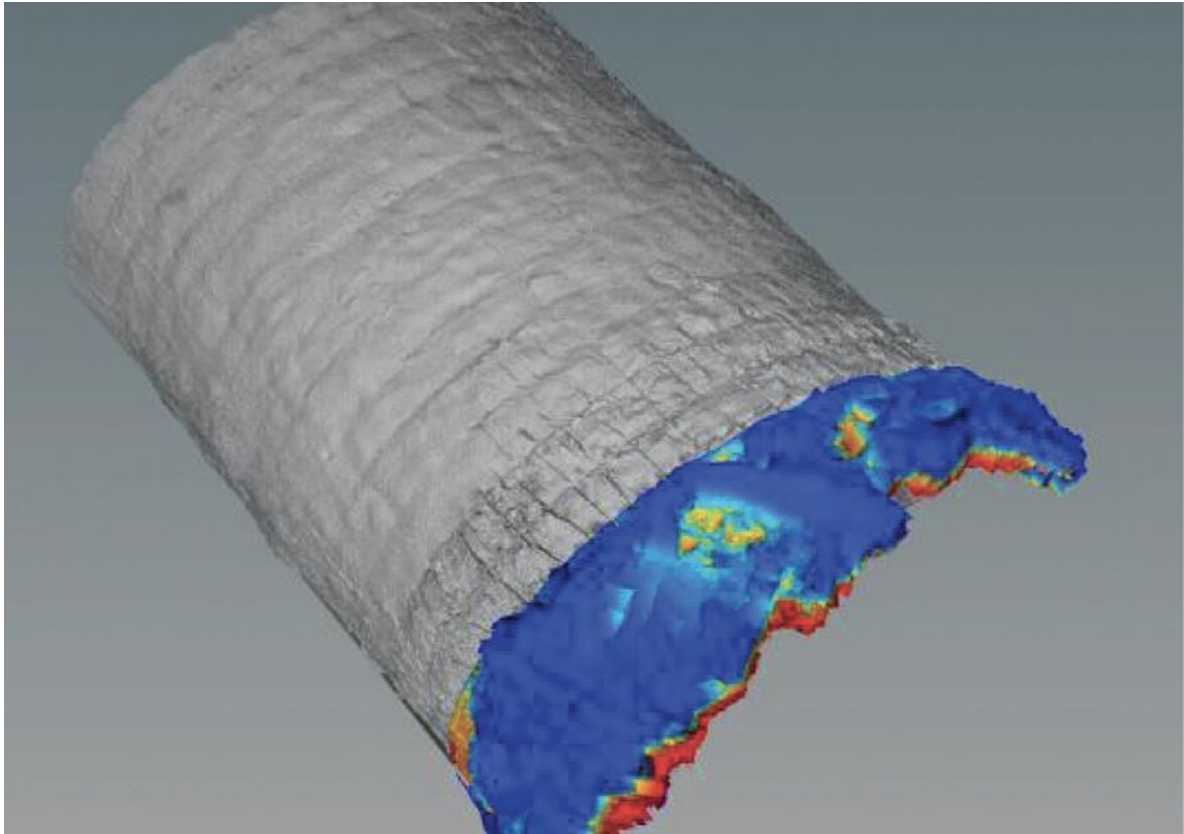
Проведення лазерного сканування в запилених тунелях суттєво погіршує якість отриманих хмар точок, оскільки сканери чутливі до пилу та вологи, що впливає на їхню довговічність.[4]

Отже, задля забезпечення максимальної точності сканування, тунель повинен бути ретельно очищений, особливо після вибухових робіт, механізованого видалення шлаку та ручного прибирання.

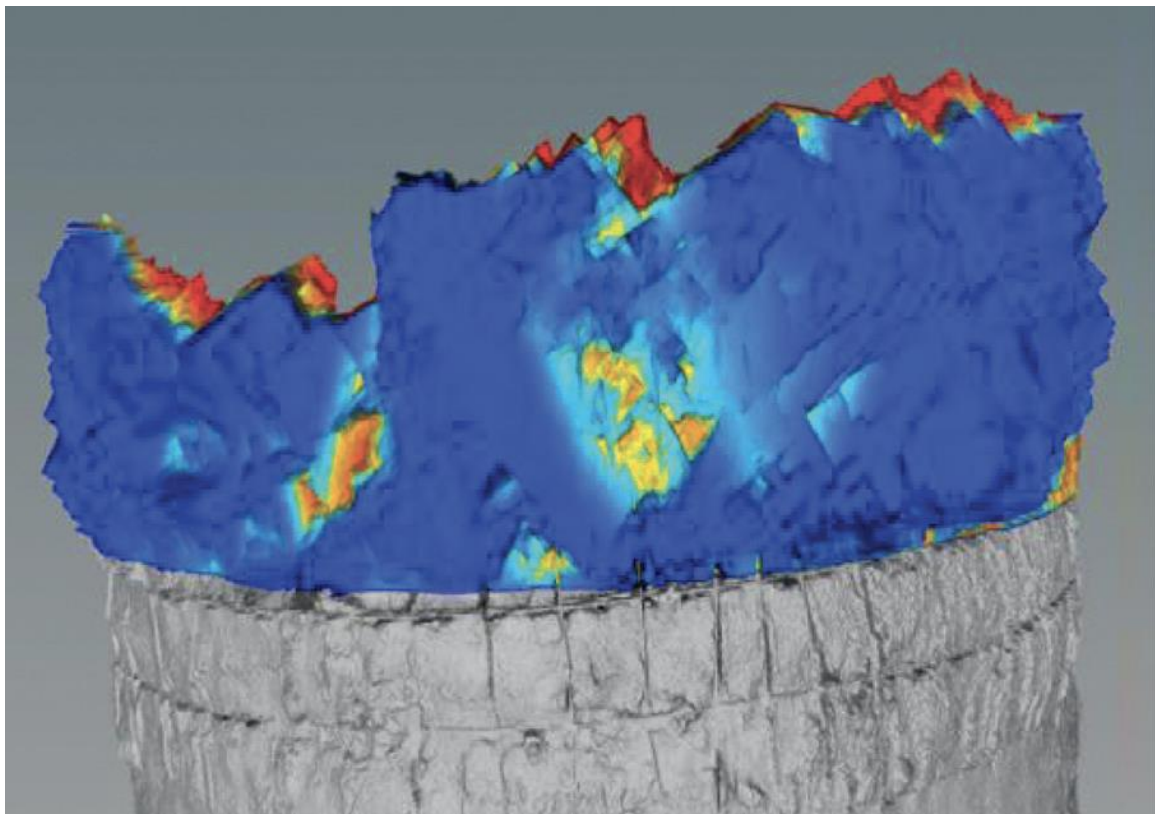
В рамках нашого дослідження дані, отримані шляхом 3D лазерного сканування хмар точок, зіставлялись з проектними даними виїмки для аналізу відповідності та коригування форми тунелю. Був проведений детальний аналіз фактичного обсягу виїнятого ґрунту в порівнянні з проектним, з метою виявлення надмірного чи недостатнього виїмання.

Коли контур тунелю, передбачений проектом, розташований за межами або в межах базової лінії, його зіставляють з даними, отриманими шляхом сканування.

На рисунку 12 наведено візуалізацію хмари точок, що відображає відсканований профіль виїмки тунелю для конкретної ділянки, яка знаходиться між позначками ПК 68+455 та ПК 68+459.[4]



а



б

Рисунок 12: Сканування деформації тунелю

(а) Вид збоку.

(б) Вид спереду

Додатні величини (виділені синім) сигналізують про надмірне виймання ґрунту, отже, про перевищення проєктних параметрів, натомість від'ємні величини (показані червоним) свідчать про недовиймку ґрунту, тобто, що фактично вилучено менше ґрунту, ніж було передбачено проєктом.

На рисунку 13 візуалізується, що тунель перетинає лінії виїмки ґрунту, причому розриви та недокопані ділянки зафіксовано на максимальній глибині 150 мм.

У центральній частині отвору тунелю виявлено незначну тріщину на глибині приблизно 50 мм.[4]

Отримані дані дозволяють припустити можливі труднощі під час проведення земляних і вибухових робіт, у зв'язку з чим для відповідності проєктним вимогам, ймовірно, буде потрібне впровадження додаткових коригувальних заходів.

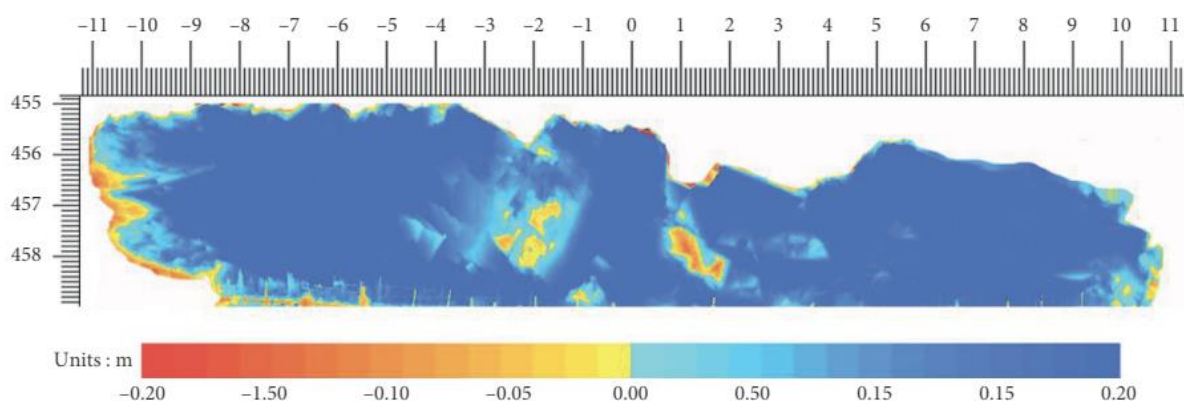


Рисунок 13: Збільшене скановане зображення верхнього та нижнього тунельних проходів

Переважна частина обрисів тунелю виявляє перерви, що вказує на повторне розроблення цих зон.

Найбільша глибина вилучення сягнула 200 мм, що є відчутним відступом від запланованих норм.

Отримані дані можуть бути наслідком неконтрольованих впливів під час земельних та підривних операцій, що потребує додаткового дослідження та впровадження коригувальних дій для забезпечення необхідної точності при спорудженні тунелю.[5]

3.2. Моніторинг первинного підтримання

Коли первинне закріплення змонтоване на заданій відстані (зазвичай 40 метрів), виконується сканування і візуальний огляд тунелю.

Проаналізувавши дані хмари точок, формується контурна карта хмари точок поверхні первинних кріплень.

Зіставляючи контур поверхні хмари точок з проектним перетином основного об'єкта та беручи до уваги зареєстровані величини деформацій, генерується карта хмари порожнин основного об'єкта.

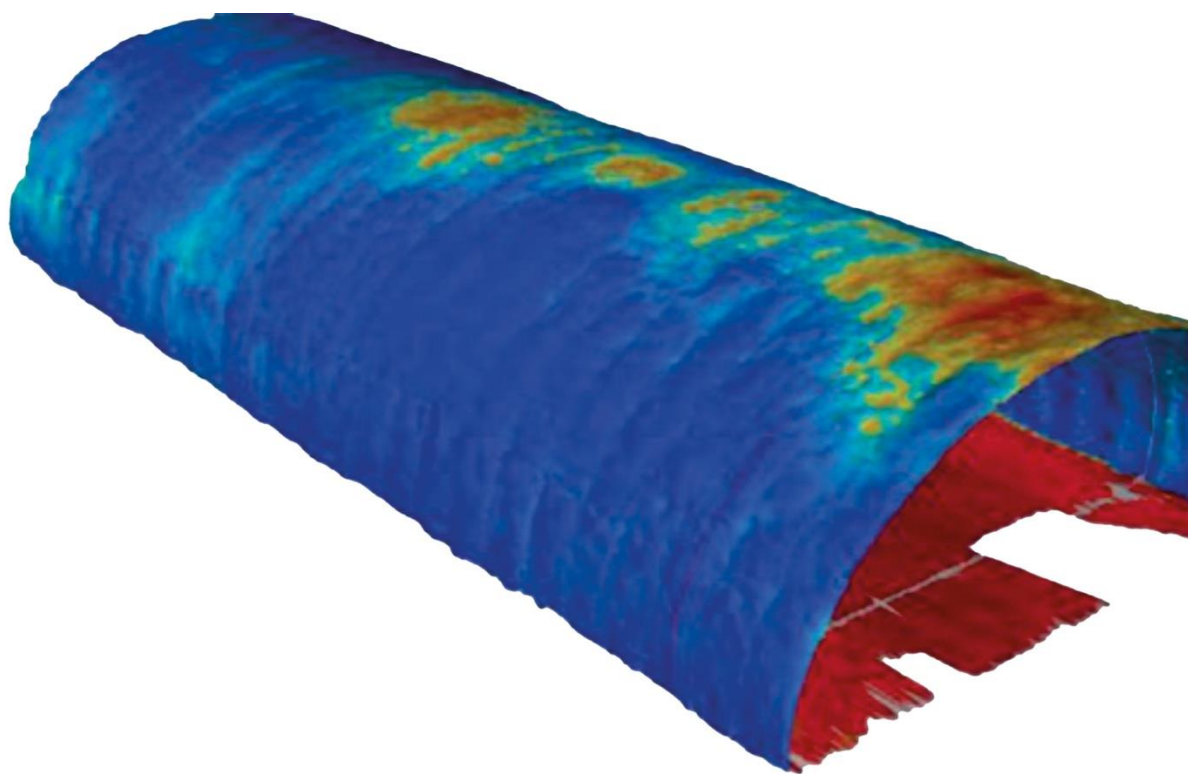
Позитивне значення зазору свідчить, що профіль хмари точок відповідає проектному перетину первинного кріплення та не перевищує проектні параметри.

Негативні величини зазорів сигналізують, що профіль хмари точок виходить за межі проектного перерізу основної опори.

На рисунку 14 представлено результати 3D-сканування зазору первинного кріплення на відрізку між ПК68+409 та ПК68+449, що надає можливість оцінити точність дослідження та відхилення від проектних параметрів.[4]



a



b

Рисунок 14: Карта тунелю на основі хмарного сканування

(a) Хмара точок 3D лазерного сканування.

(b) Карта сканування допусків первинної підтримки.

Дані про хмари точок, що згенеровані після 3D лазерного сканування, зображені на рисунку 14(a), в той час, як ключові референсні відстані, згідно з планом, демонструються на рисунку 14(б).

Отже, фактичні дані сканування стають об'єктом порівняння з проєктною інформацією, що дозволяє ідентифікувати потенційні невідповідності.

На рисунку 15 представлено збільшене зображення карти хмари сканування, яке стосується початкової роздільної здатності опор.[4]

Цей огляд сприяє детальнішому вивченню точності дослідження, шляхом зіставлення фактичних параметрів з проєктними габаритами, а також дає можливість підтвердити відповідність профілю тунелю проєкту.[6]

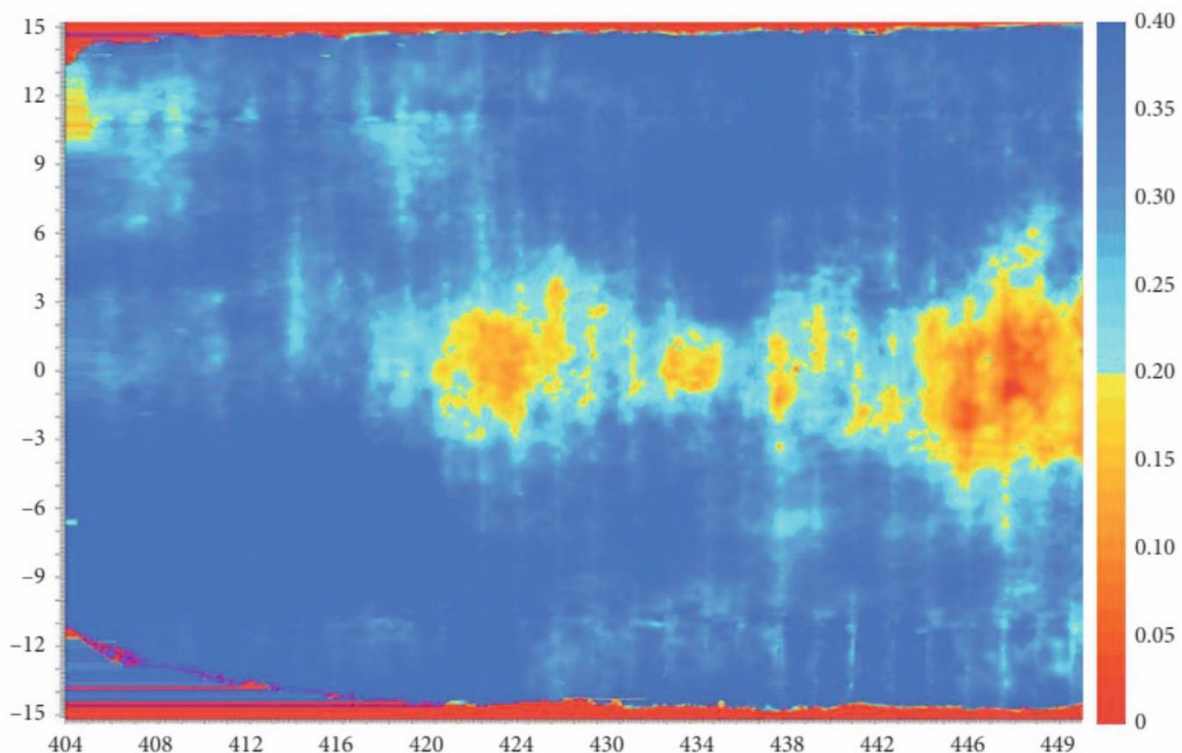


Рисунок 15: Розгорнута інформація на основі хмарного сканування.

Згідно з зображенням 15, профіль хмари точок розташовано в середині обчисленого перетину головної опори (позитивний зазор).

Це доводить, що у центрі склепіння проектні розміри не переважають.

Показники зазорів у склепінні варіюються від 0 до 15 мм, що вказує на їх відповідність допустимим нормам.

Але у бокових стінах первинної опори пустоти зростають, досягаючи 35-40 мм.[4]

Це вимагає вирівнювання та посилення стін за допомогою нанесення вторинного торкретування.

Наземна ділянка тунелю не потрапляє до зони спостереження і, відповідно, виходить за межі даного аналізу.

Для моніторингу конструкції тунелю безпосередньо на будівельному майданчику були встановлені вимірювальні точки з інтервалом 10 м на поверхні головної тунельної опори.

Кожна зона моніторингу має п'ять вимірювальних точок, симетрично розміщених у ключових місцях: вершина арки, ліва основа арки, права основа арки та ліва і права поверхні стіни.

Результати вимірювань у робочому діапазоні від ПК68+410 до ПК68+449 наведено на рисунку 16.[4]

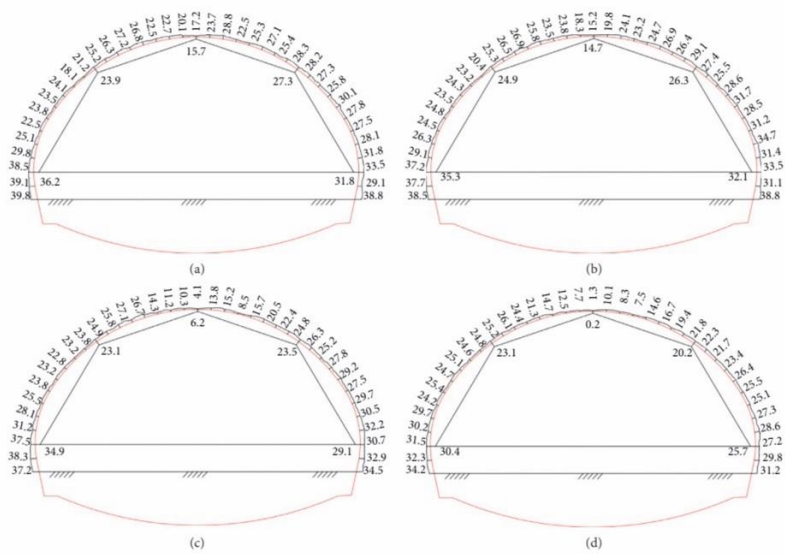


Рисунок 16: 3D лазерне сканування та порівняння даних вимірювань

- a) ПК68 + 415.
- b) ПК68 + 425.
- c) ПК68 + 435.
- d) ПК68 + 445.

3D лазерне сканування дозволяє отримати значно точнішу оцінку наявної геометрії споруди.

Це зумовлено отриманням цілісного перетину контуру тунелю, на відміну від тахеометричних вимірювань, котрі обмежені фіксацією лише окремих точок.

Отримані показники просвіту тунелю, які базуються на даних лазерного сканування, є позитивними.

Це свідчить про те, що загальна конфігурація тунелю не виходить за межі проектного перетину вторинного облицювання.

Розміри отворів демонструють певну варіативність в залежності від розташування.

Найменші показники зафіксовані у склепінні, дещо більші - в аркових опорах, розташованих по обидва боки, а найбільші значення спостерігаються на бічних стінах первинних опор.

Згідно з даними Таблиці 3, різниця у значеннях прольотів, вимірених за допомогою 3D лазерного сканування та тахеометра, не перевищує 3 мм.

Таблиця 3: Статистична таблиця деформацій опори тунелю.

Тунельний просвіт (мм)						
Пункти спостереження	Права арка			Ліва арка		
	3D лазер	Тахеометр	Значення різниці	3D лазер	Тахеометр	Значення різниці
ПК 45+417	16.2	14.6	1.6	24.4	22.9	1.5
ПК 68+422	15.5	13.5	2.0	26.4	25.3	1.1
ПК 68+433	4.7	7.9	-3.2	24.7	23.2	1.5
ПК 68+444	1.2	0.4	0.8	25.7	24.4	1.3

Найбільша похибка спостерігається на лівій стіні, де абсолютне значення різниці сягає 2,6 мм, а найменша похибка - на правій стіні, де абсолютне значення становить 0,4 мм.

У більшості випадків, значення порожнин, отримані за допомогою 3D лазерного сканування, перевищують ті, що були отримані при використанні тахеометра.

Ці розбіжності у даних здебільшого виникають через відмінності у застосованих способах вимірювання.

3D лазерне сканування дозволяє створити надзвичайно детальну 3D "хмару точок", яка точно відображає контур тунелю одразу у трьох вимірах.

Це забезпечує високу ступінь точності при вимірюваннях.

Водночас, деякі чинники, як-от пил чи висока вологість, можуть призводити до незначних похибок точності, особливо в умовах поганої видимості.

Тахеометри, у певних обставинах, забезпечують більшу точність вимірювання та можуть досягати надзвичайно високих показників в окремих, чітко визначених точках.[4]

Проте, обмежена кількість точок вимірювання, що властива тахеометрам, не завжди дозволяє отримати цілісну картину.

Точність може знижуватися на ділянках між виконаними замірами.

До того ж, інтервал між двома етапами робіт, погодні умови та зміни в процесі будівництва також впливають на зафіксовані відмінності в показниках.

Таким чином, для досягнення найточнішої оцінки стану тунелю потрібно впроваджувати комплексний моніторинг, який враховує всі згадані вище фактори та комбінує обидва методи вимірювання.

Це дозволить зібрати найбільш повну та коректну інформацію про поточний стан об'єкта.[7]

Висновки

У цій бакалаврській роботі ми провели дослідження застосування 3D лазерного сканування у сфері моніторингу будівельних робіт при спорудженні тунелів, зокрема, для виявлення деформацій під час створення тунельних комплексів.

З огляду на лінійний, витягнутий характер тунельних споруд, було приділено особливу увагу стратегії розташування станцій лазерного сканування, зважаючи на їх протяжність та кут сканування, з метою забезпечення необхідного рівня точності вимірювань.

Для мінімізації потенційних похибок сканування рекомендовано скоротити дистанцію сканування кожної станції.

Оптимально, відстань між сусідніми станціями повинна складати приблизно 40 метрів, а радіус сканування кожної станції – 20 метрів.

Мінімально допустима точність зони вимірювання становить 6 міліметрів, при цьому точність у 3 міліметри є достатньою для відповідності вимогам до точності при тунелебудуванні.

Для досягнення оптимальних результатів зйомки відстань між станціями має визначатися за наступною формулою, де D – діаметр тунелю.

Формування геометрії тунельного проходу здійснювалося шляхом порівняння даних 3D-сканування з проектними параметрами поперечного перерізу тунелю.

Отримані результати свідчать, що поперечний переріз тунелю, по суті, являє собою переривчасту поверхню, з площею переходу від 6,22 м² до 8,17 м², та не містить істотних дефектів.

Визначено, що площа руйнування тунелю є незначною.

Сканування ділянки первинної опори тунелю дозволило створити детальну карту контурів поверхні первинної опори, а також хмарну модель для виявлення порожнеч у конструкції тунелю.

Аналіз показав, що первинна опора не виходить за межі проектного перерізу з порожнечами розміром від 0 до 15 мм у верхній частині арки та від 35 до 40 мм у бічних стінках.

Порівняння даних 3D лазерного сканування з результатами тахеометричних вимірювань показало розбіжність значень у межах 3 мм, що відповідає допустимій похибці.

Найбільшу похибку виявлено у лівій стіні (2,6 мм), а найменшу – у лівій кутовій опорі (0,4 мм).

Наведені дані підтверджують високу точність та ефективність 3D лазерного сканування як методу моніторингу стану та деформацій тунельних споруд.

Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю

193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарєва, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

4. Pinpin, Li & Wenge, Qiu & Yunjian, Cheng & Lu, Feng. (2021). Application of 3D Laser Scanning in Underground Station Cavity Clusters. *Advances in Civil Engineering*. 2021. 1-12. 10.1155/2021/8896363

5. В. Бо, Л. Тяньбінь, Х. Чуань та ін., «Модельне випробування впливу стоншення облицювання на несучу здатність конструкції тунелю», Журнал Китайського залізничного товариства, т. 35, № 2, с. 106–114, 2013.

6. Ц. Цінъ та Х. Лян, «Метод та значення визначення зазору поперечного перерізу перед облицюванням стінки арки тунелю», Журнал закордонних автомагістралей, т. 1, с. 125–128, 2007.

7. Ф. Цзімен та К. Венге, «Модельне випробування впливу жорсткості облицювання тунелю на довговічність конструкції», Журнал Центрального Південного університету (Наука і технології), т. 44, № 9, с. 3884–3890, 2013.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Застосування 3D сканування для оцінки деформацій тунелів та виявлення небезпечних зон »

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)