

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА ОП
193 «Геодезія та землеустрій», Спеціалізації:
«Геоінформаційні системи та технології»

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Виконала: Бахмач А.Ю.

Керівник: доц. к.т.н. Горковчук Ю.В.



КИЇВ-2024

МЕТА ТА АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Метою дипломної роботи є розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд на основі результатів наземного лазерного сканування. За допомогою отриманих даних (хмара точок) і сучасних методів тривимірного моделювання буде запропоновано ефективні підходи до створення детальних моделей мостових конструкцій.

Актуальність роботи зумовлена нагальною потребою у стандартизації процесів тривимірного моделювання мостових споруд. Відсутність узагальненої методики ускладнює створення точних та надійних моделей, необхідних для планування відновлення і реконструкції таких об'єктів. Це питання набуває особливої гостроти в умовах сучасної України, де значна частина мостів перебуває в аварійному стані, а чимала кількість була зруйнована або пошкоджена внаслідок воєнних дій.

В якості вихідних даних для роботи, будуть результати лазерного сканування (хмара точок) мосту Пфаффендорф у місті Кобленц (Німеччина) та мосту у місті Штутгарт (Німеччина).

ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

1

Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку засобів тривимірного моделювання

2

Огляд інституційних засад тривимірного моделювання мостів

3

Дослідження досвіду впровадження тривимірного моделювання для моделювання мостових споруд

4

Розроблення методики тривимірного моделювання мостових споруд на основі даних наземного лазерного сканування

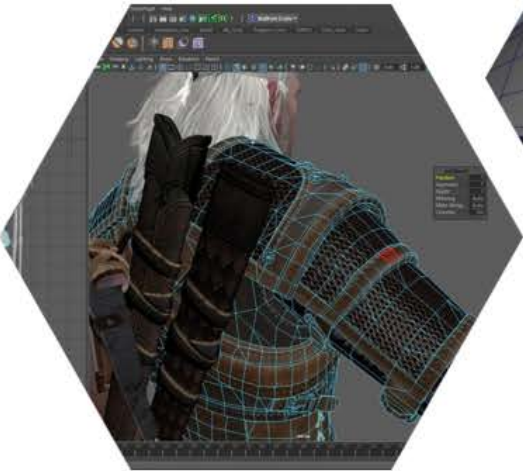
5

Оптимізація методів класифікації елементів мостової конструкції

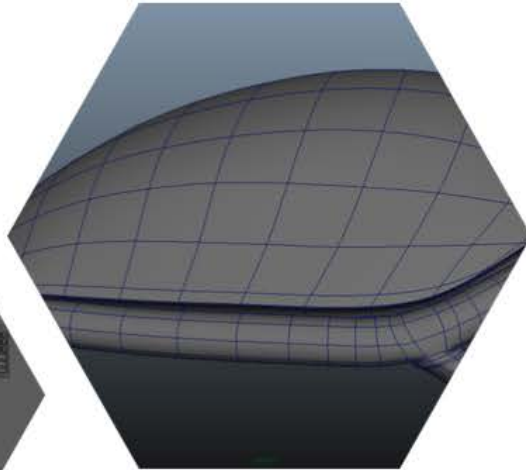
6

Створення тривимірної моделі мостової споруди за даними наземного лазерного сканування. Оцінка результатів відповідно до вимог якості моделювання

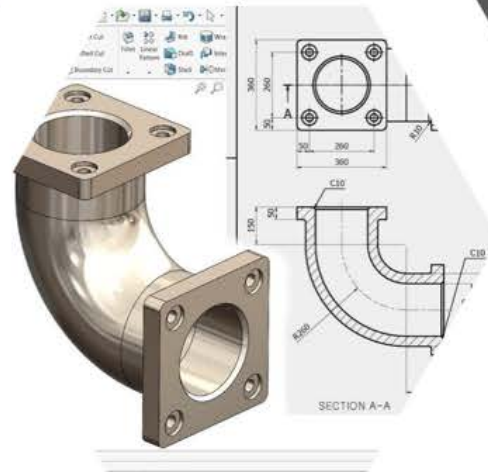
МЕТОДИ СУЧАСНОГО ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ



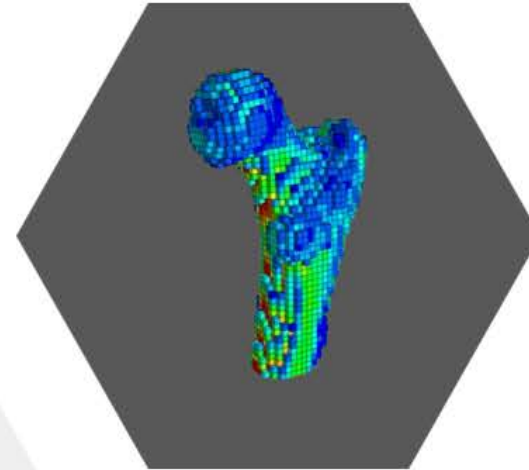
Полігональне



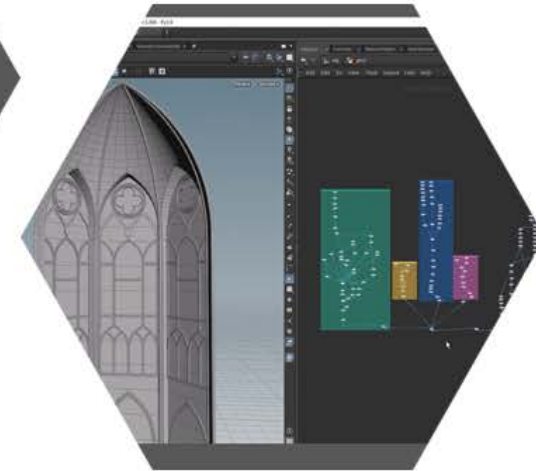
NURBS



Параметричне



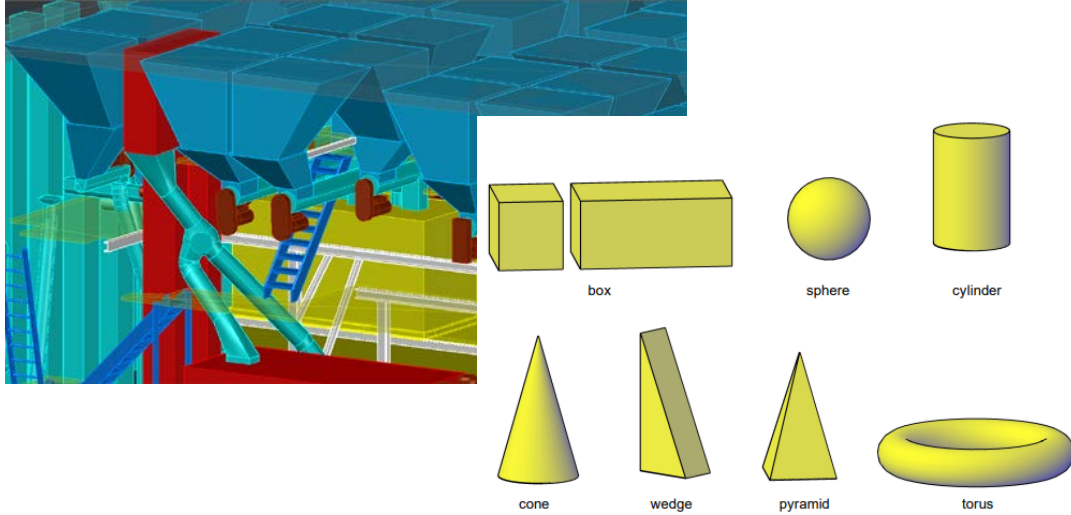
Воксельне



Процедурне

3D МОДЕЛЮВАННЯ

CAD



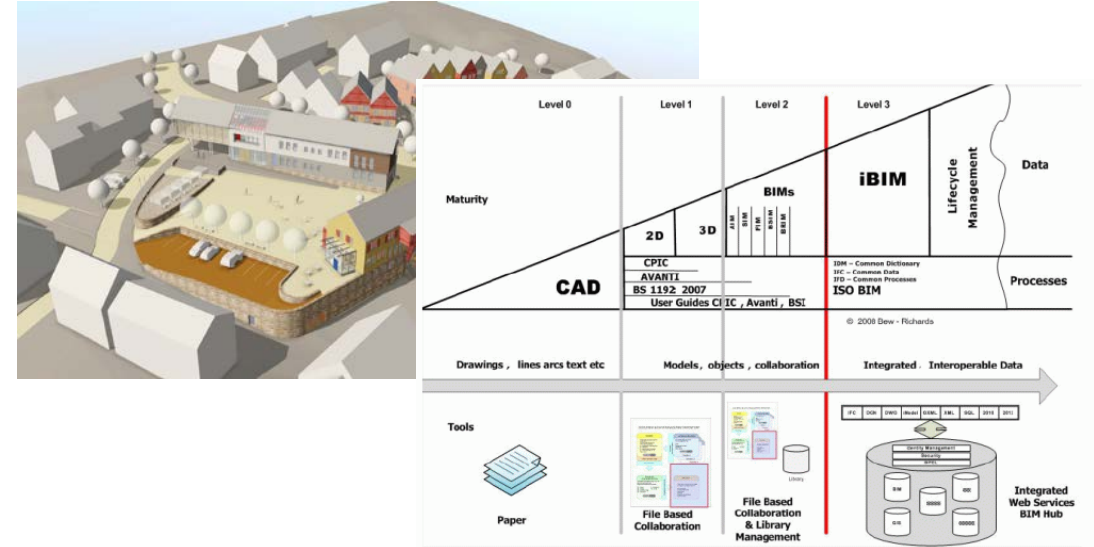
Переваги

- + Висока точність моделювання
- + Велика кількість інструментів моделювання

Недоліки

- Відсутність інформаційного наповнення моделі
- Погано працює з геодезичними координатами
- Обмежена спільна робота

BIM



Переваги

- + Інтеграція всіх учасників проекту
- + Підтримка на всіх етапах життєвого циклу об'єкта – від проектування до експлуатації

Недоліки

- Складність створення об'єктів з деформаціями
- Погано працює з геодезичними координатами
- Необхідність розроблення каталогів чи бібліотек елементів

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Програма	Призначення	Виробник	Можливість моделювання складних форм	Параметричне моделювання	Підтримка BIM	Інтероперабельність	Підтримка колективної роботи	Взаємодія з хмарами точок	Легкість освоєння	Вимоги до системи	Вартість за рік
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AutoCAD	Загальне 2D/3D моделювання	Autodesk	Висока	Базові інструменти	Не підтримує	Відмінна підтримка формату DWG	Доступна за допомогою спільної моделі	Можливість робити вирізки хмари та їх збереження, налаштування кольору хмари, розміру та щільності точок. Якщо хмара велика, може часто вилітати	Інтуїтивний інтерфейс	Середні	\$1,690. Пакетом програм від Autodesk значно дешевше
Revit	BIM моделювання будівель (більше для інженерів)	Autodesk	Середня	Підтримує	Повноцінна підтримка BIM	Сумісність з IFC . Не дозволяє відкривати файли з нових версій у старих версіях програмного забезпечення	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Можливість робити вирізки хмари та їх збереження, налаштування кольору хмари, розміру та щільності точок. Підвисає	Незручний інтерфейс, проте є багато відеоуроків	Високі	\$2,300 Пакетом програм від Autodesk значно дешевше
Archicad	BIM моделювання будівель (для архітекторів)	Graphisoft	Висока з певними обмеженнями	Підтримує	Розширена підтримка BIM	Сумісність з IFC та іншими форматами	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Неможливо налаштувати колір хмари, розмір та щільність точок. Може вилітати чи підвисати тільки якщо проект величезний та дуже щільний	Дружелюбний інтерфейс	Середні	\$2,300
Rhino	Моделювання складних форм	McNeel	Дуже висока	Через плагін Grasshopper	Обмежена підтримка BIM	Інтеграція з іншими інструментами	Можливість роботи через плагіни	Неможливо налаштувати колір хмари, розмір та щільність точок. Доступні інструменти побудови моделі з хмари	Помірно легкий	Середні	\$995
BricsCAD	Загальне 2D/3D та BIM моделювання	Bricsys	Висока	Підтримує	Обмежена підтримка BIM	Відмінна підтримка формату DWG	Колективна робота через хмару	Можливість робити вирізки хмари та їх збереження, налаштування кольору хмари, розміру та щільності точок, проте підрізки не можливо зберігти. Якщо хмара велика, може часто вилітати	Інтуїтивний інтерфейс	Середні	\$680

ІНСТИТУЦІЙНІ ЗАСАДИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТІВ

РЕГУЛЮЮТЬ ПРОЕКТУВАННЯ, БУДІВНИЦТВО ТА ЕКСПЛУАТАЦІЮ МОСТОВИХ СПОРУД

- ДБН В.2.3-22:2009 "Мости та труби. Основні вимоги проектування";
- ДБН В.2.3-14:2006 "Мости та труби. Правила проектування";
- ДБН В.2.3-6:2009 "Мости та труби. Обстеження і випробування";
- ДБН В.2.3-26:2010 "Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування";
- ДБН В.1.2-15:2009 "Мости та труби. Навантаження і впливи"

РЕГУЛЮЮТЬ САД/ВІМ МОДЕЛЮВАННЯ

- Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації»
- ДСТУ ISO/TS 12911:2020 (ISO/TS 12911:2012, IDT) Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM)
- ДСТУ EN ISO 19650-1:2022 (EN ISO 19650-1:2018, IDT; ISO 19650-1:2018, IDT) Організація та оцифрування інформації про будівлі та інженерні споруди, охоплюючи інформаційне моделювання будівель (BIM).
- ДСТУ EN ISO 19650-2:2022 (EN ISO 19650-2:2018, IDT; ISO 19650-2:2018, IDT) Організація та оцифрування інформації про будівлі та цивільні інженерні роботи, охоплюючи інформаційне моделювання будівель (BIM).
- ДСТУ CEN/TR 17654:2022 (CEN/TR 17654:2021, IDT. Настанови щодо впровадження вимог до обміну інформацією (EIR) і планів виконання BIM (BEP) на європейському рівні на основі EN ISO 19650-1 і -2.

ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТІВ ЗА ОСНОВНОЮ НЕСУЧОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

ТИПИ МОСТІВ



АРКОВІ



БАЛКОВІ



КОНСОЛЬНІ



ПІДВІСНІ



ВАНТОВІ



ПІДВІСНО-АРОЧНІ



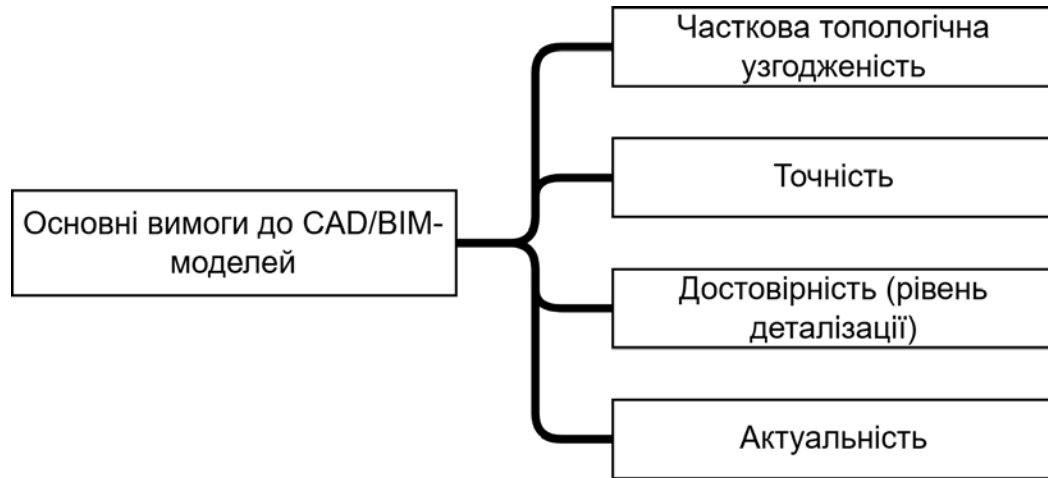
КРОКВЯНІ

ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ

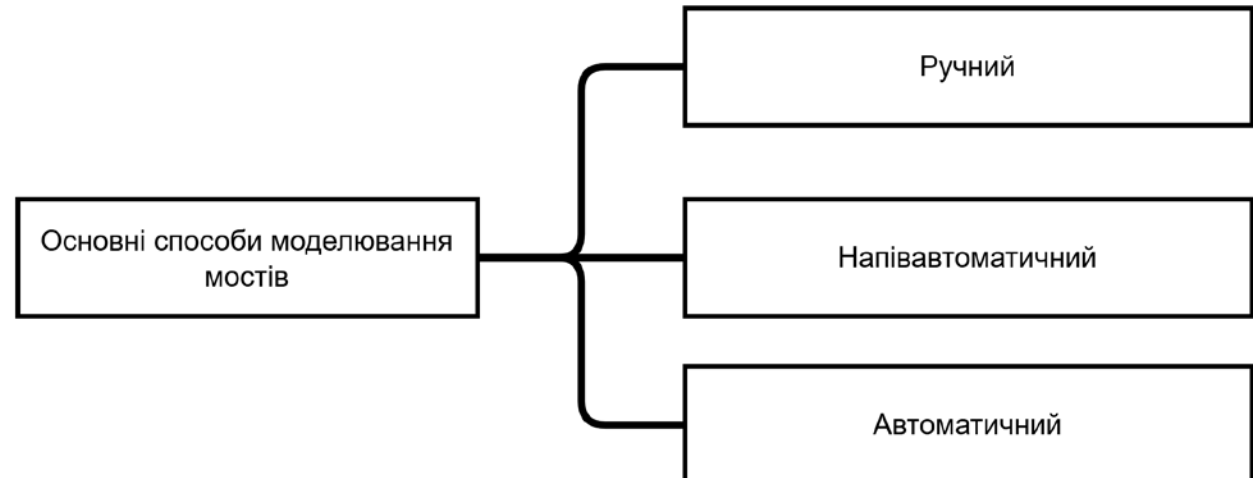
Тип мосту	Габарити (Довжина x Ширина x Висота), м	Основні елементи конструкції	Матеріал	Похибки елементів, мм ($\Delta L/\Delta H/\Delta O/\Delta S$)	Загальний допуск ΔT , мм
Балковий	50 × 10 × 1	Балки	Бетон	5 / 3 / 2 / 4	10
Арковий	100 × 15 × 20	Арка	Бетон	10 / 5 / 5 / 8	15
Консольний	120 × 12 × 2	Консольні балки	Метал	7 / 4 / 3 / 6	10
Підвісний	500 × 20 × 50	Вантова система, палуба	Метал	15 / 7 / 6 / 10	20
Вантовий	300 × 16 × 40	Ванти, палуба	Метал/Бетон	10 / 6 / 5 / 8	15
Підвісно-арочний	400 × 20 × 45	Арки, троси	Метал/ Бетон	15 / 8 / 7 / 12	20
Кроквяний	80 × 10 × 5	Балки, стійки	Метал	5 / 3 / 2 / 4	10

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО МОДЕЛЕЙ



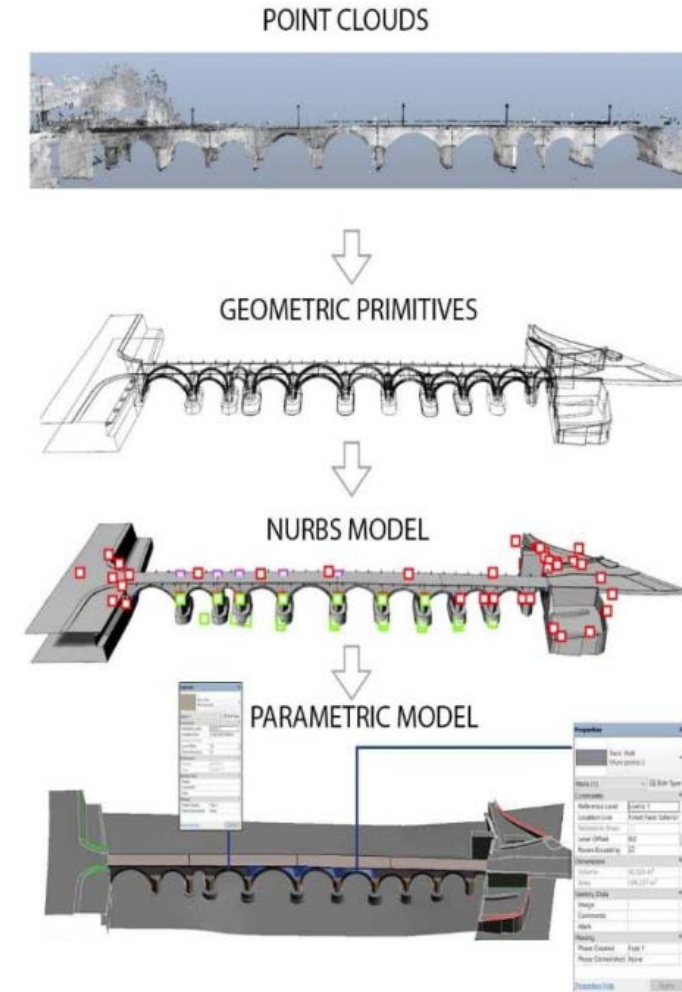
ОСНОВНІ СПОСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТІВ



ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

РУЧНИЙ СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ (МІСТ AZZONE VISCONTE, ІТАЛІЯ)

1. Було виконано 77 сканувань мосту за допомогою Faro Focus 3D, що дозволило отримати хмару точок обсягом 2,5 млрд з точністю реєстрації ± 3 мм.
2. Зібрано понад 500 фотографій для створення ортофото фасадів і арок.
3. Проведено геометричне нівелювання для контролю вертикальних переміщень мосту під час випробувань навантаженням із точністю ± 0.005 мм.
4. Хмару точок класифіковано на структурні елементи, зокрема арки, колони, склепіння та дорожнє покриття.
5. Через складну геометрію середньовічної споруди використано NURBS-моделі для деталізації арок і виступів, що не забезпечувалося стандартними бібліотеками BIM.
6. NURBS-об'єкти інтегровано в Autodesk Revit, де створено BIM-базу з параметрами матеріалів, історичних даних і результатів випробувань.
7. Дані організовано в хмарному репозиторії Autodesk A360 Team, що забезпечило віддалений доступ і спільну роботу фахівців над проектом.

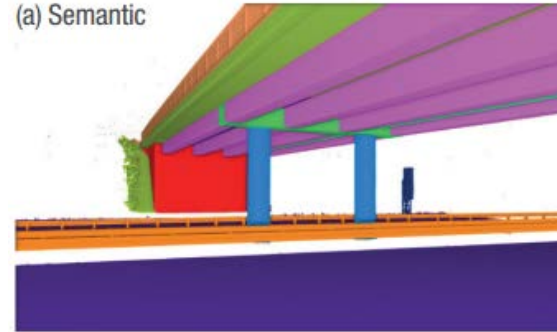


ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

НАПІВАВТОМАТИЧНИЙ СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ

1. Створено хмару точок мостової споруди за допомогою лазерного сканування та фотограмметрії (знімки з дронів).
2. Виконано очищення хмари точок від шумів, зменшення кількості точок (вокселізація), вирівнювання осей та видалення зайвих даних.
3. Хмару класифіковано для розпізнавання елементів мосту (колон, балок, плит) із застосуванням алгоритмів ШІ (PointNet, 3D CNN).
4. Геометричні особливості мосту (профілі балок, опор тощо) параметризовано методами PCA, Hough-трансформації та RANSAC.
5. Дані імпортовано в Dynamo Autodesk, де створено параметричну BIM модель із використанням семантичної інформації.

(a) Semantic



(b) Instances



(a) Colored point cloud

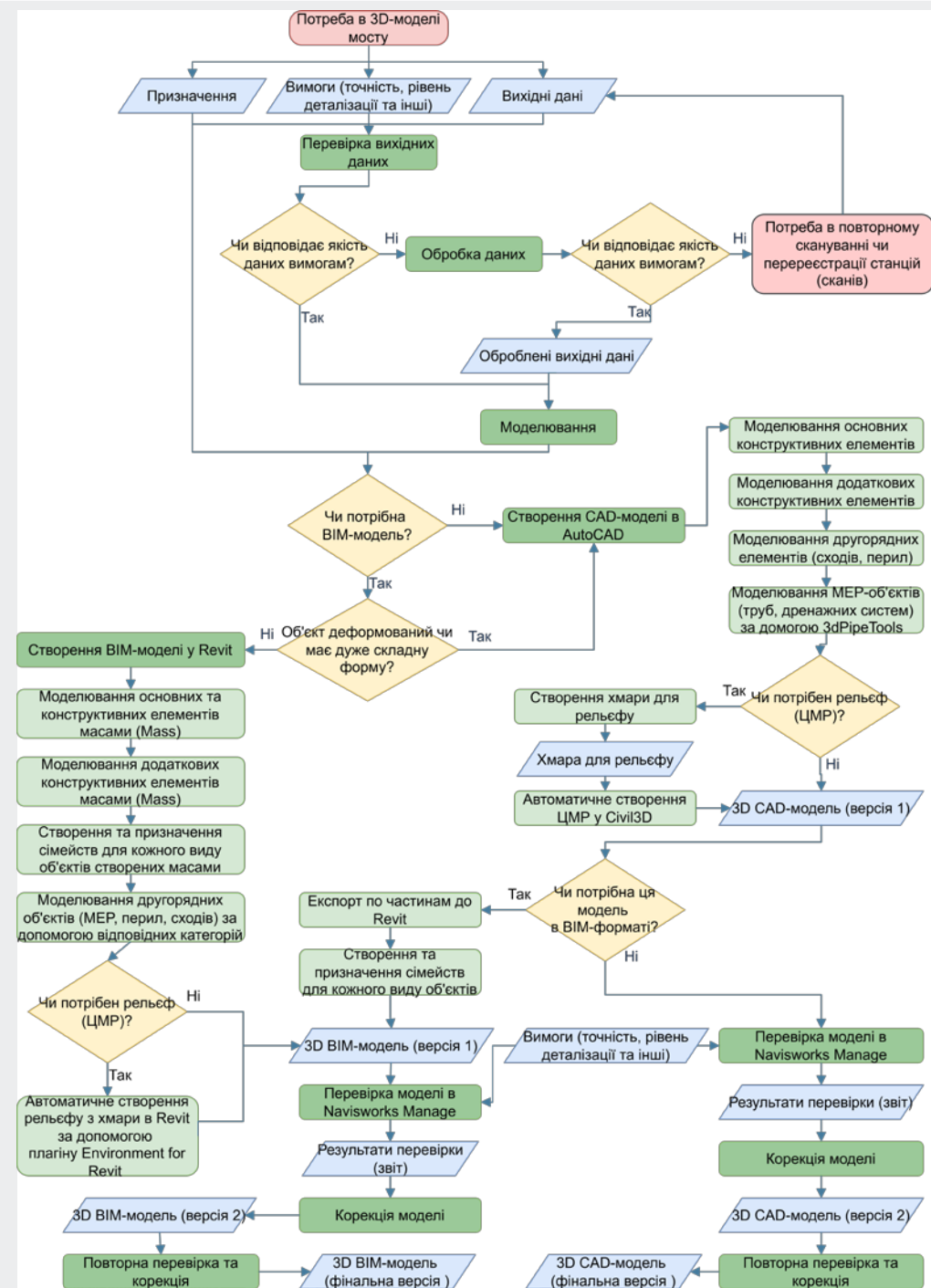


(b) Geometric model

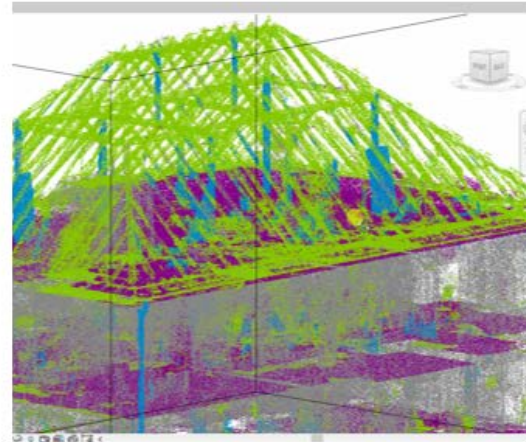


(c) Model and point cloud combined

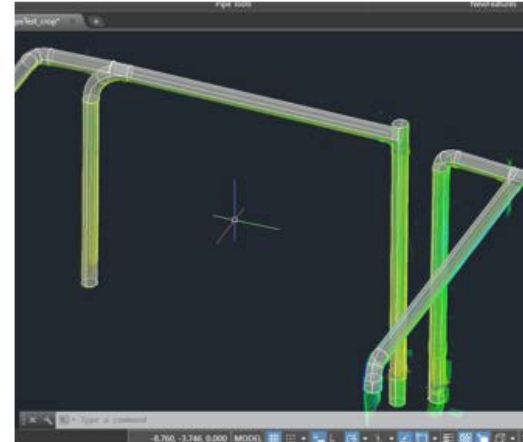
МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД



ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ



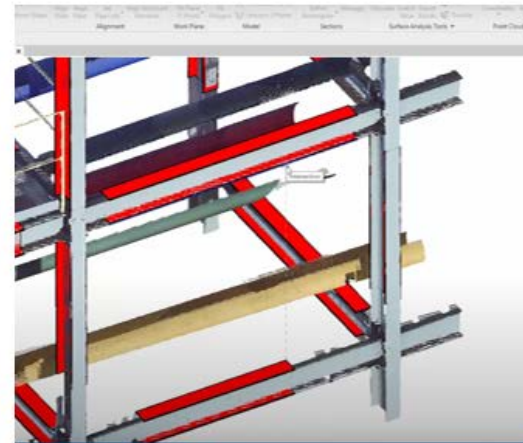
AURIVUS



3D PIPE TOOLS



FARO AS-BUILT FOR AUTOCAD



FARO AS-BUILT FOR REVIT

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

ПЕРЕЛІК ШАРІВ ДЛЯ МОДЕЛІ МОСТУ В AUTOCAD

Назва	Назва шару в AutoCAD
Стіни	Walls
Дах	Roof
Колони	Columns
Бетонні чи кам'яні балки	Beams
Сталеві колони	Steel columns
Сталеві балки	Steel beams
Дренажна система	Drainage system
Труби	Pipes
Сходи	Stairs
Перила	Railings
Декоративні елементи	Decorative elements
Пішохідна частина	Sidewolks
Проїжджа частина	Road
Земля	Ground
Хмара точок	Point cloud

ПЕРЕЛІК КАТЕГОРІЙ ТА СІМЕЙСТВ ДЛЯ МОДЕЛІ МОСТУ В REVIT

Назва	Категорія	Сімейство
Стіни	Walls	Walls
Колони	Mass	Columns
Бетонні чи кам'яні балки	Mass	Beams
Сталеві колони	Mass	Steel columns
Сталеві балки	Mass	Steel beams
Дренажна система	Pipes	Drainage system
Труби	Pipes	Pipes
Сходи	Stairs	Stairs
Перила	Railings	Railings
Декоративні елементи	Mass	Decorative elements
Пішохідна частина	Floor	Sidewolks
Проїжджа частина	Floor	Road
Земля	Surface	Toposolid
Хмара точок	Point cloud	Point cloud

МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ У МІСТІ КОБЛЕНЦ (НІМЕЧЧИНА)

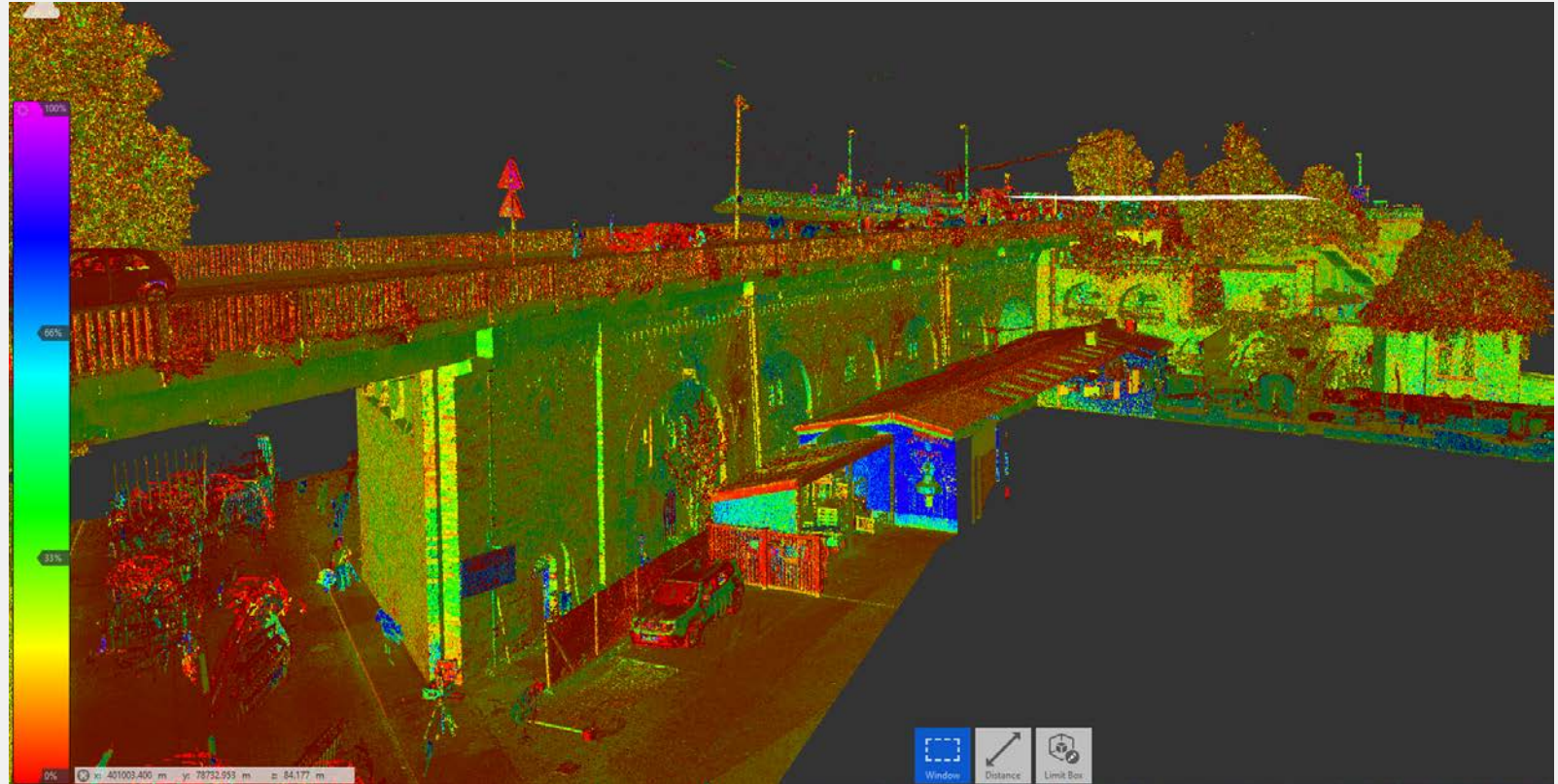
Габарити мосту: 160x13x15 м.

Тип: балковий міст із частинами попереднього мосту (віадуку).

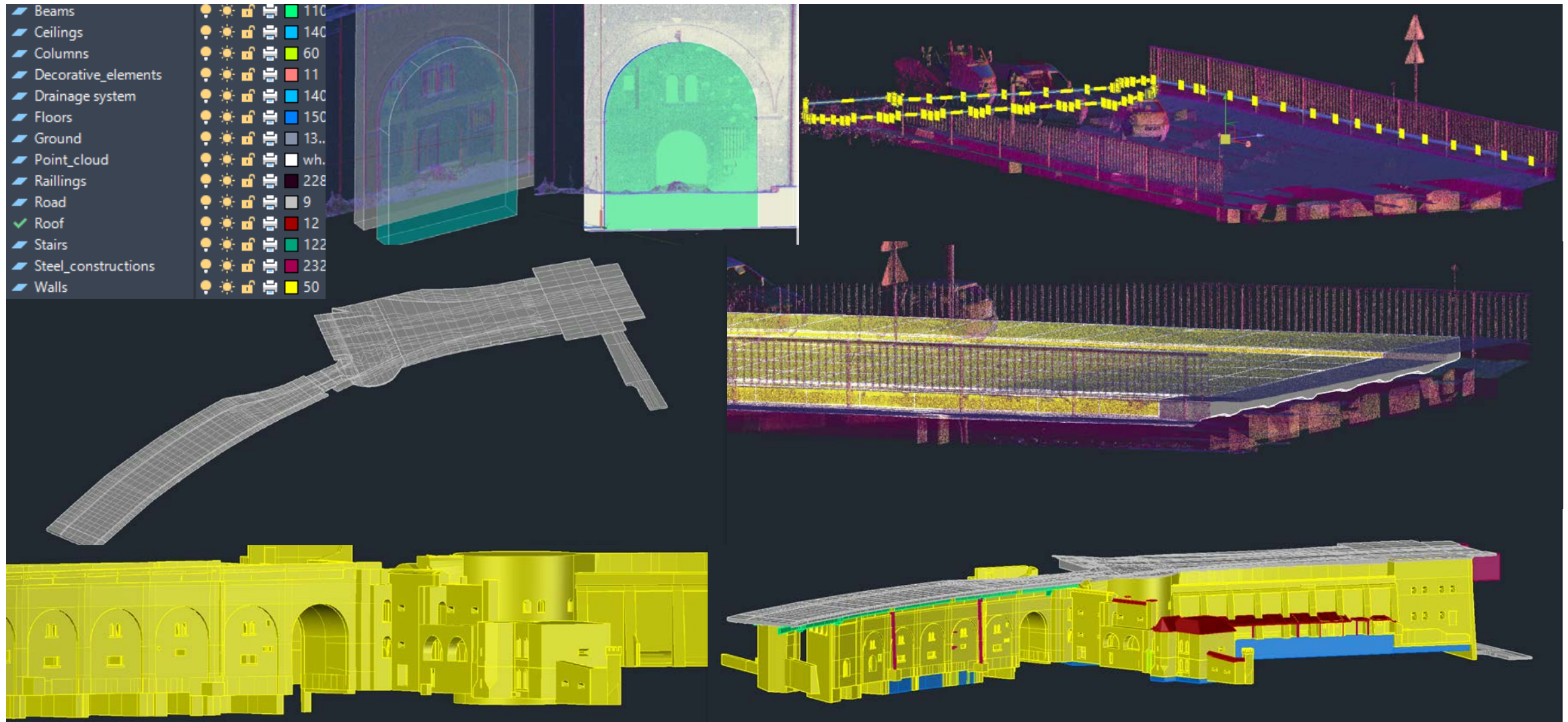
Стан: аварійний.

Призначення: оцінка деформацій.

Точність моделювання: 1 см для балкової частини та до 1,5 см для віадуку.

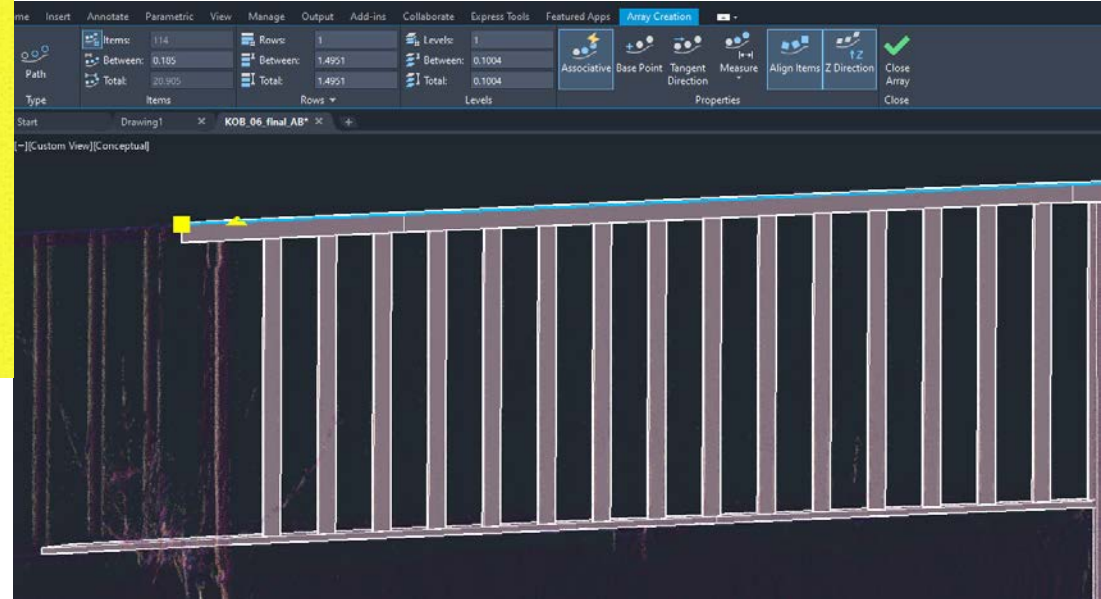
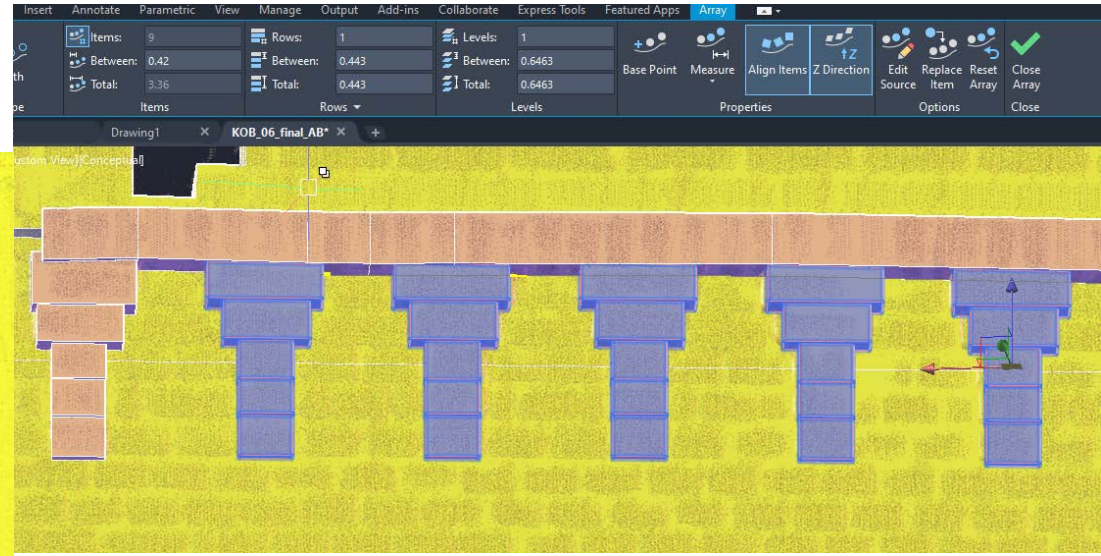
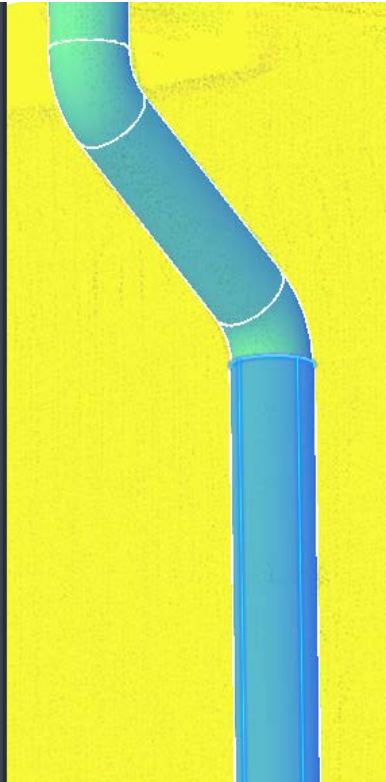


МОДЕЛЮВАННЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

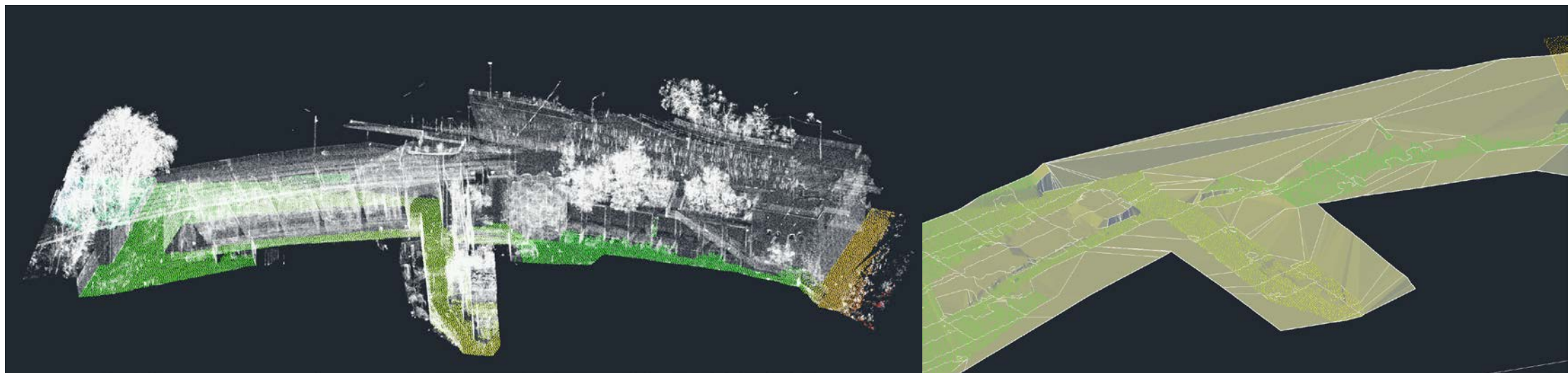
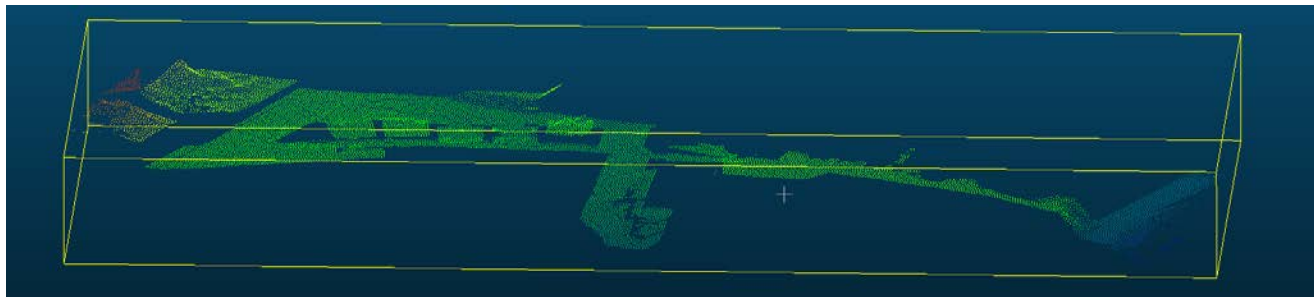


МОДЕЛЮВАННЯ ДРУГОРЯДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

Linetype	ByLayer
Linetype scale	1
Plot style	ByColor
Lineweight	ByLayer
Transparency	ByLayer
Hyperlink	
3D Visualization	
Material	ByLayer
Geometry	
Solid type	Cylinder
Position X	5.248
Position Y	6.2612
Position Z	-2.1897
Elliptical	No
Radius	0.04
Height	1.7151
Solid History	
History	None
Show History	No



МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ДЛЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

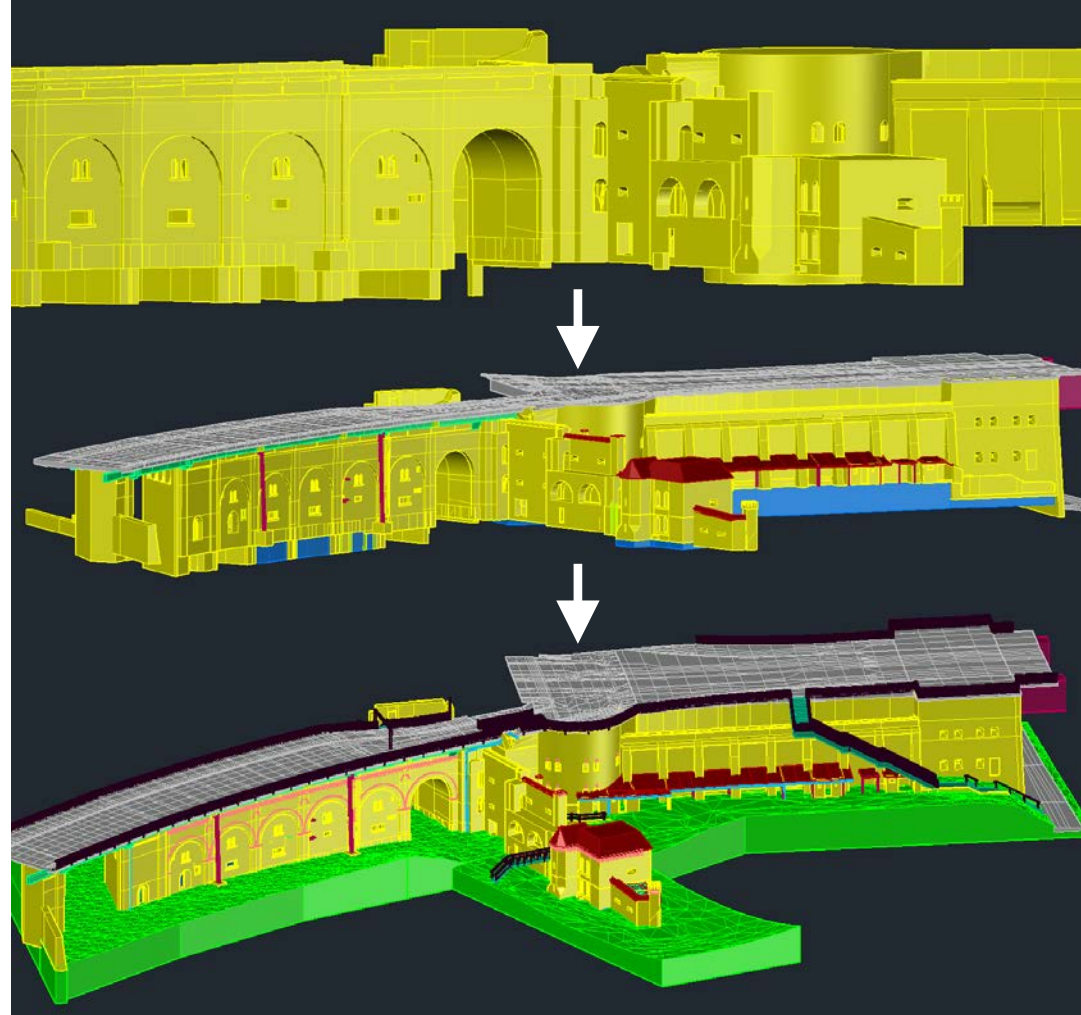


ПРОЦЕС МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

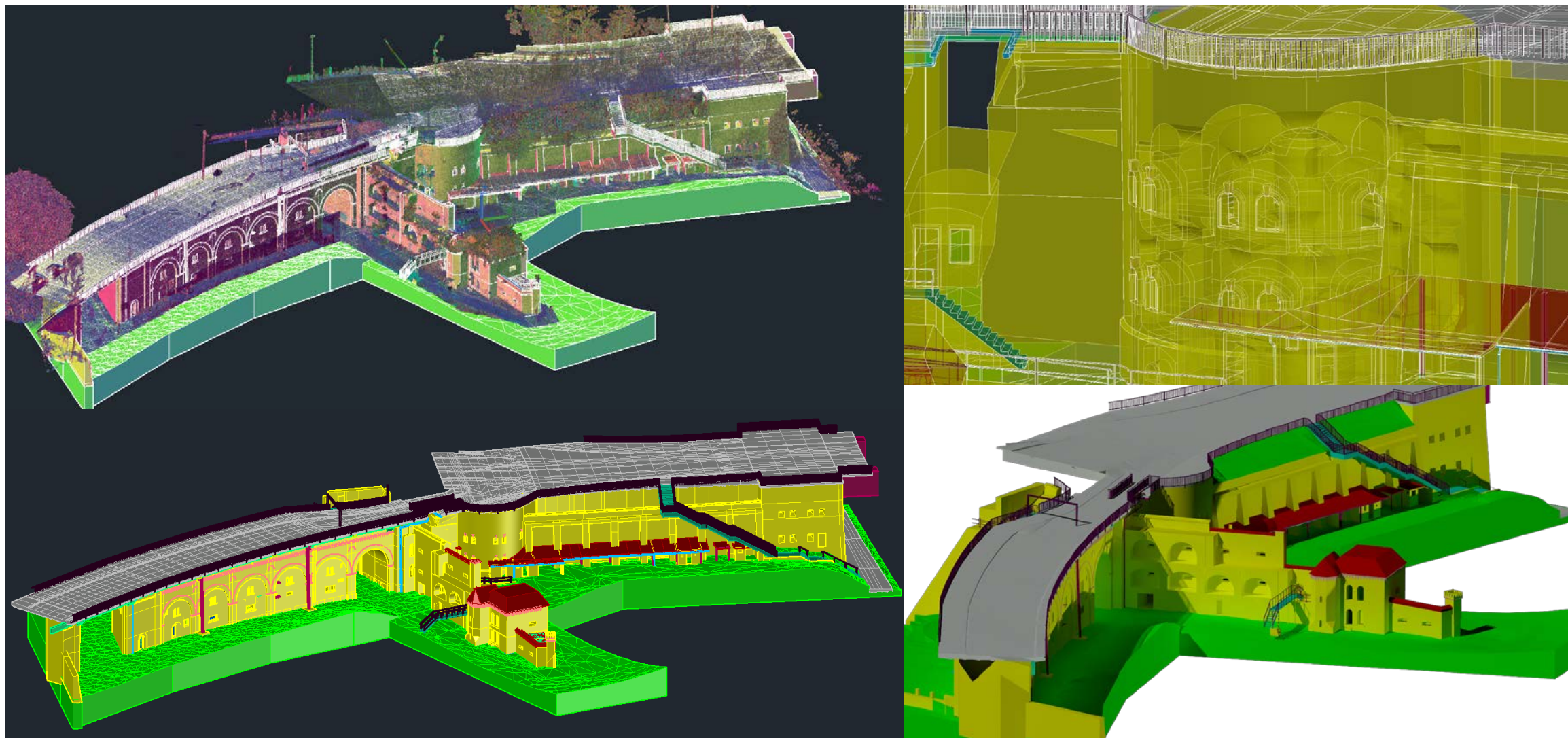
1. МОДЕЛЮВАННЯ
ОСНОВНИХ
КОНСТРУКТИВНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ

2. МОДЕЛЮВАННЯ
ДОДАТКОВИХ
КОНСТРУКТИВНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ

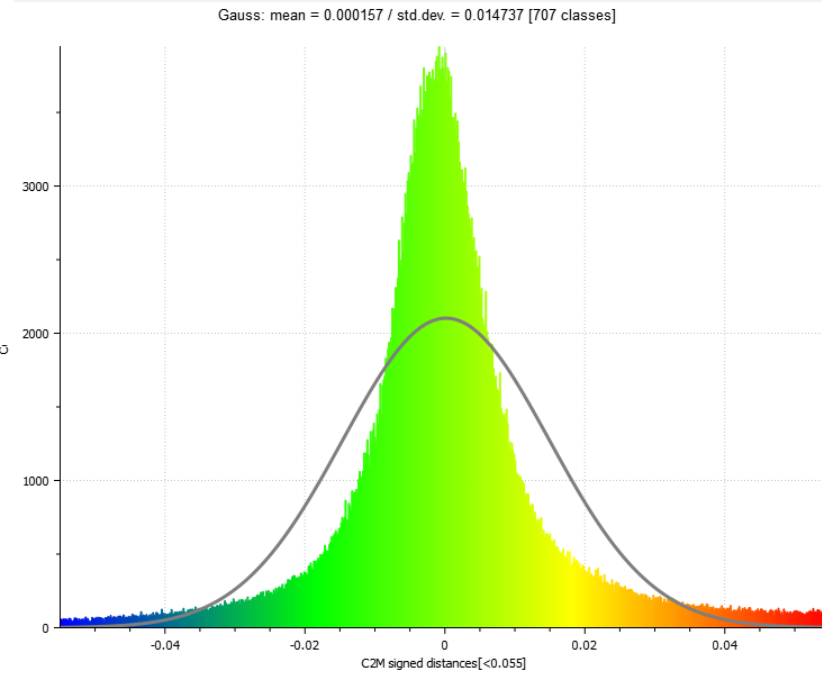
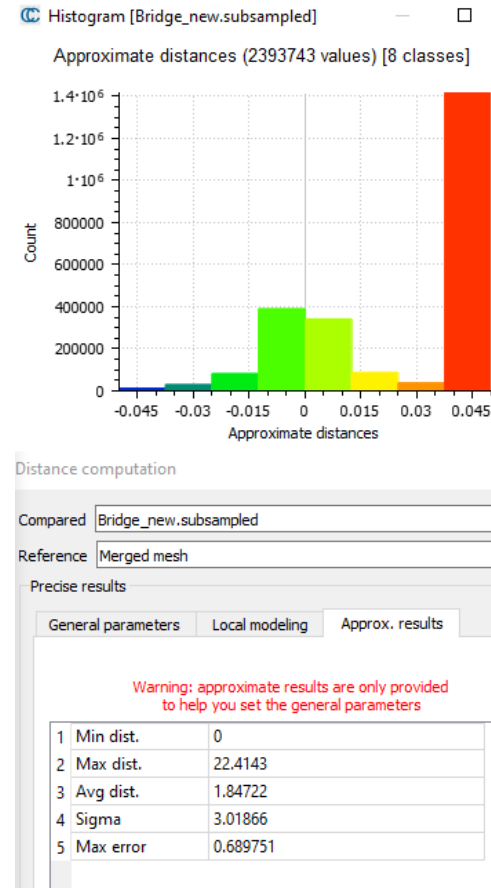
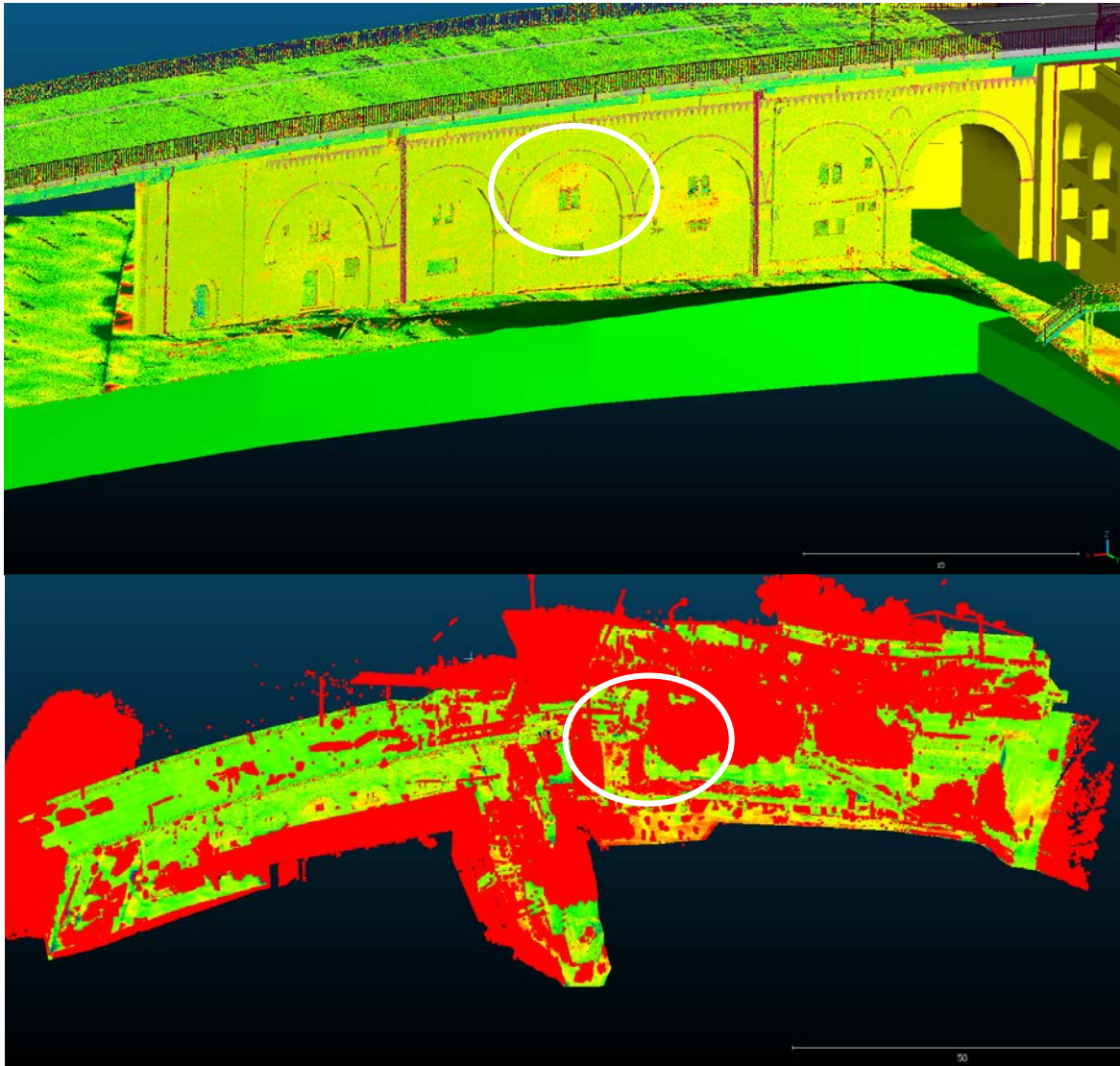
3. МОДЕЛЮВАННЯ
ДРУГОРЯДНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ТА
РЕЛЬСФУ



РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ



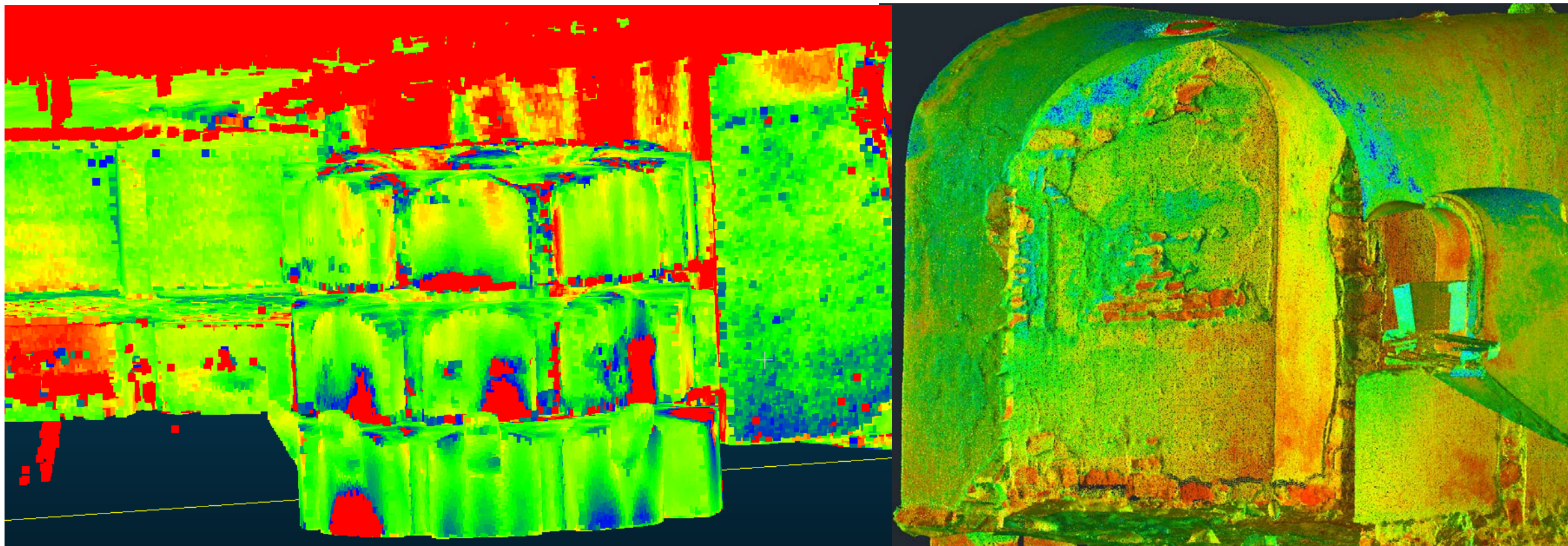
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ



Як видно з рисунків та гістограм, в більшості відхилення моделі від хмари не перевищує допустиме (1,5 см для аркових мостів і 1 см для балкових).

Проте є деякі місця, які змодельовані недостатньо точно. Це стосується деяких стін під арками та вежі.

ПРОБЛЕМНІ МІСЦЯ МОДЕЛІ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ



МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ (НІМЕЧЧИНА)

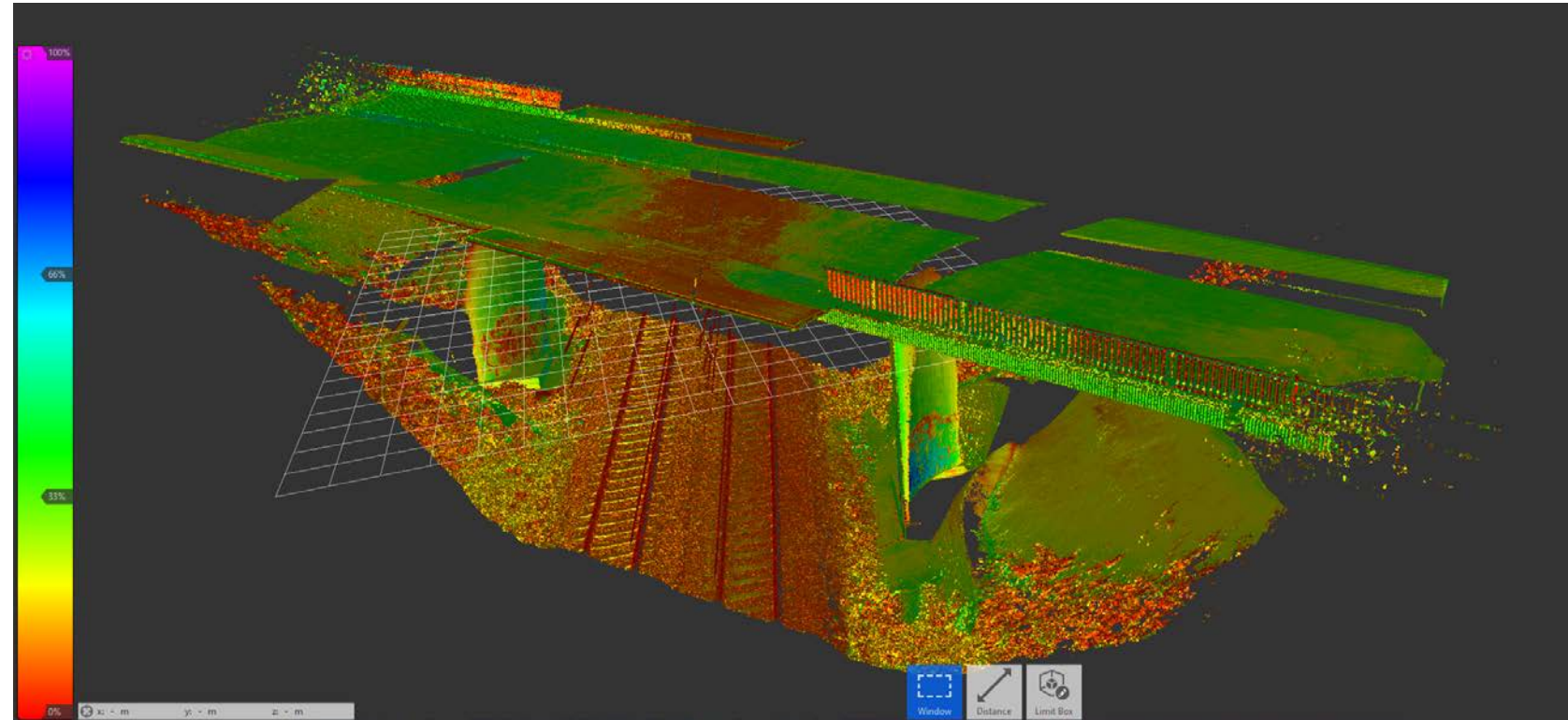
Габарити мосту: 50x10x8 м

Тип: балковий міст.

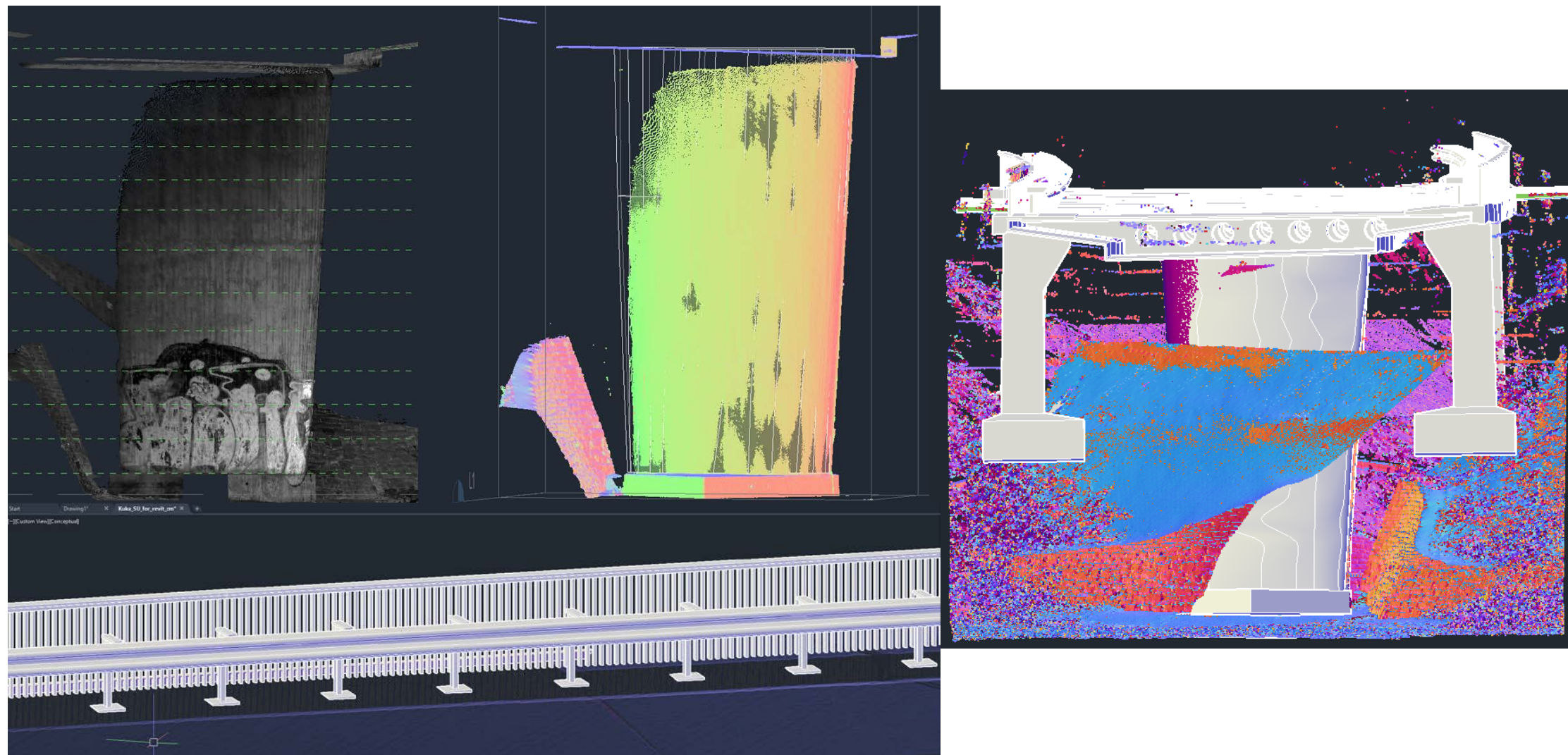
Стан: задовільний

Призначення моделі: для прокладання комунікацій.

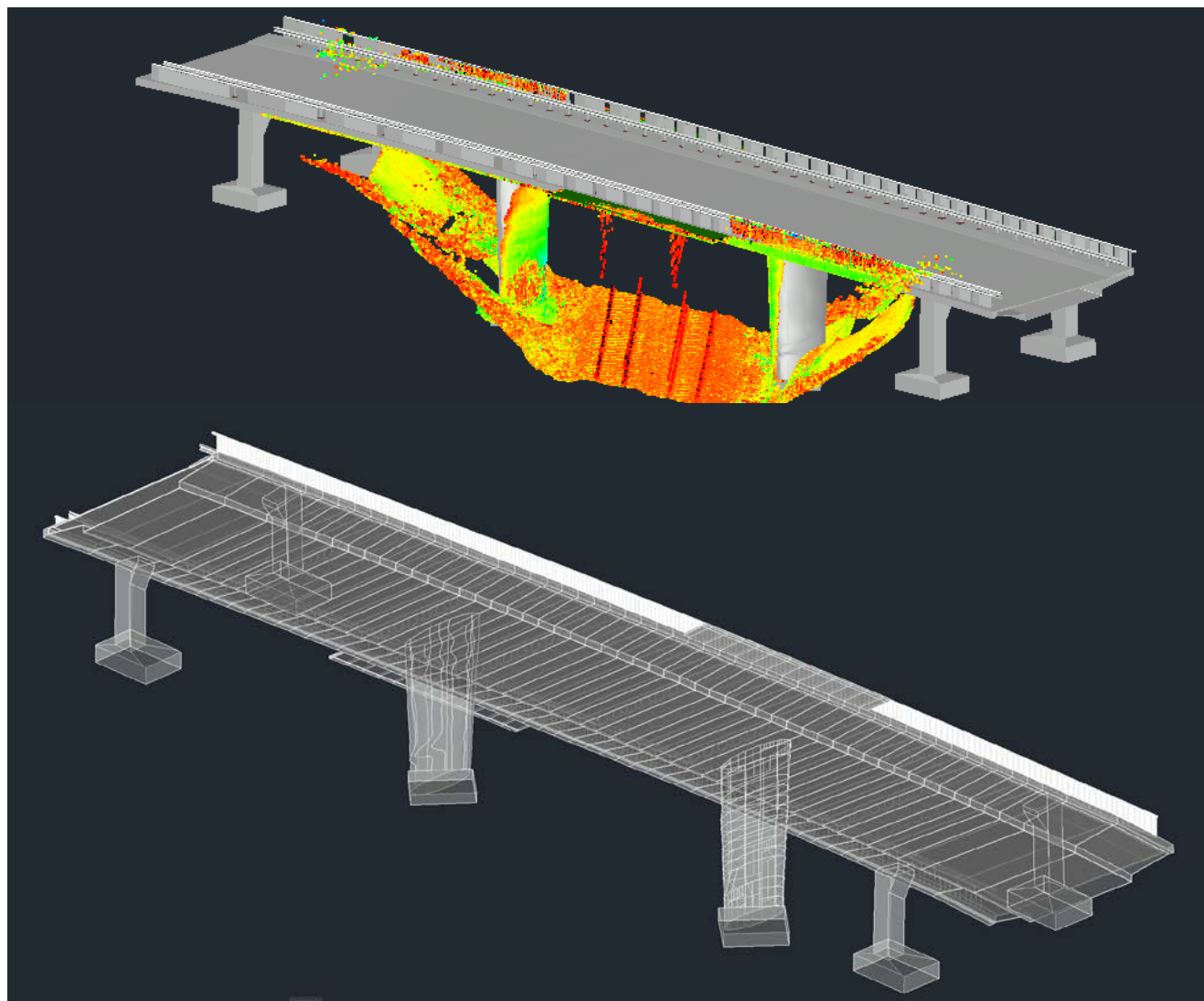
Точність моделювання: 1 см.



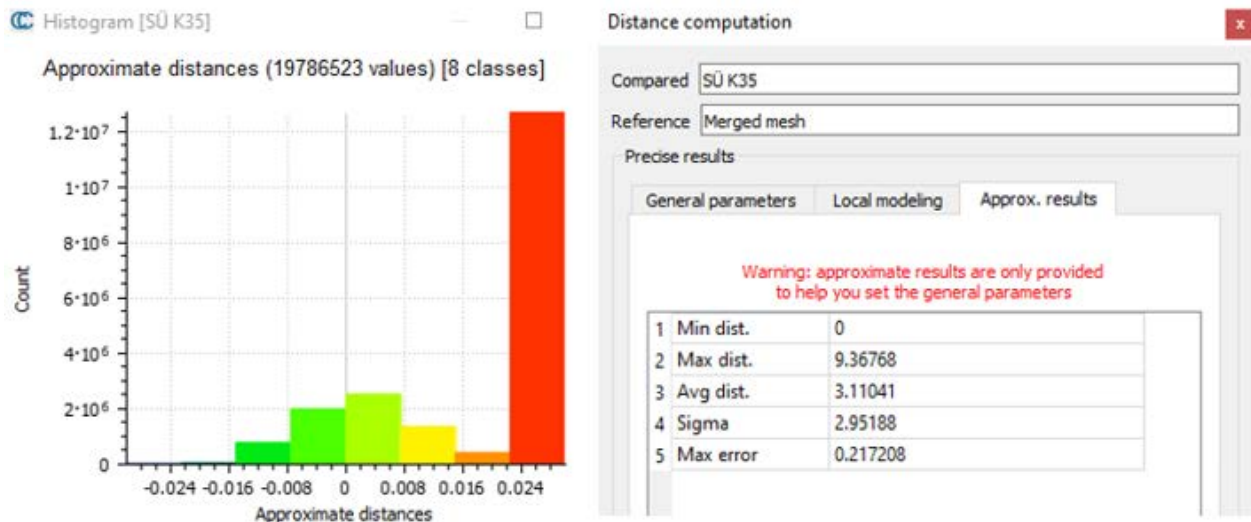
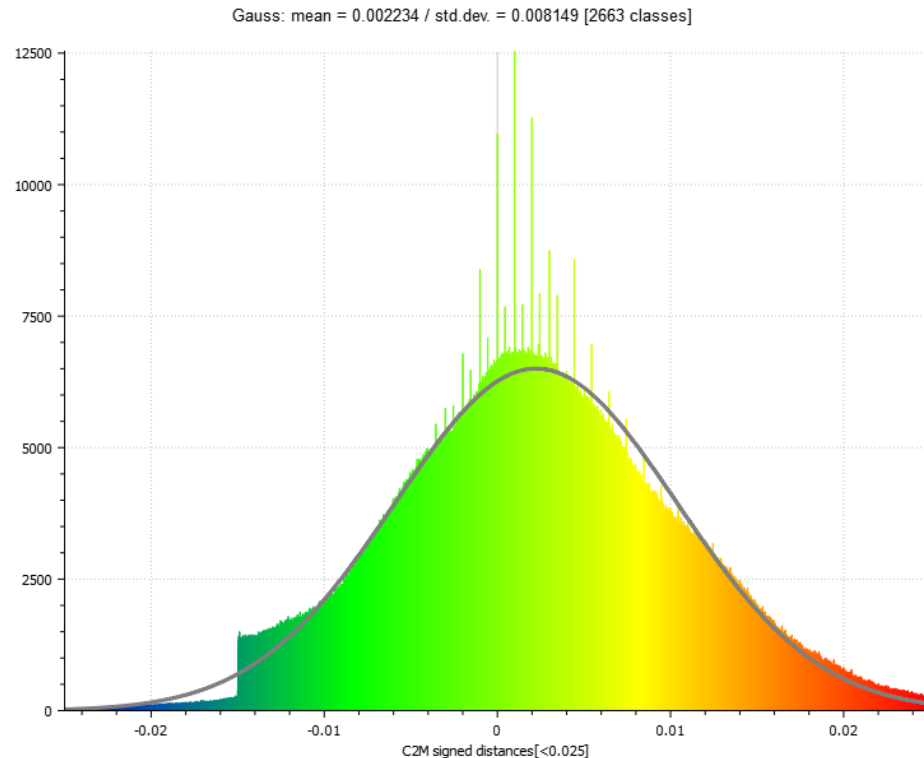
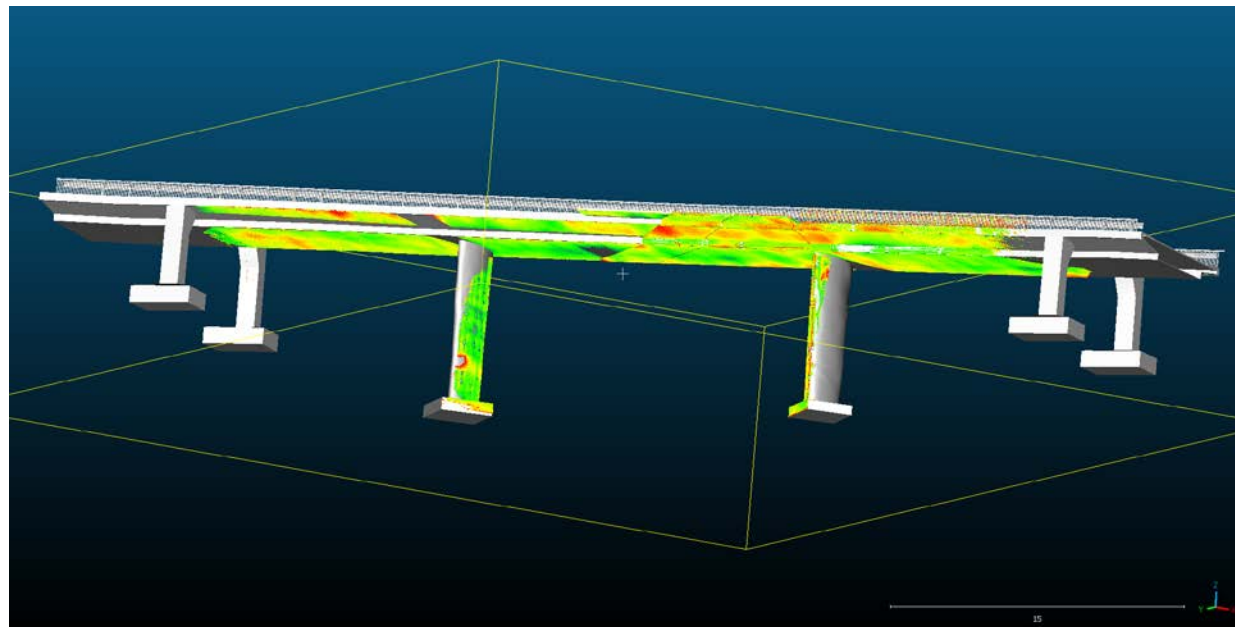
МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ (НІМЕЧЧИНА)



РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ



ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ



Як видно з рисунку та гістограми, в більшості відхилення моделі від хмари не перевищує допустиме (1 см для балкових мостів).

ВИСНОВКИ

У цій роботі були вирішені такі завдання:

1. Розглянуто методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання, основні з яких представлені у вигляді схеми.
2. Досліджено технології та інструменти для CAD та BIM моделювання, а також сучасні методи збору вихідних даних, зокрема лазерного сканування.
3. Проведено аналіз інструментів для тривимірного моделювання. Найбільш відповідними виявилися AutoCAD, Archicad, Rhino та BricsCAD, що обґрунтовано в порівняльній таблиці. Для моделювання було обрано AutoCAD і Revit.
4. На основі діючих нормативно-правових актів наведено різні класифікації мостових споруд, серед яких в рамках роботи важливою є класифікація за основною несучою конструкцією.
5. Точність тривимірного моделювання мостових споруд ґрунтується на вимогах до точності геодезичних робіт та точності проектування та складає 1 см для балкових мостів та 1,5 см – для аркових. Окрім точності, обов'язковими вимогами до моделювання є достовірність, актуальність та часткова топологічна узгодженість.
6. Аналіз досвіду впровадження свідчить про актуальність тривимірного моделювання для моніторингу, аналізу та симуляції навантажень та планування модернізації чи реконструкції мостових споруд, що підкреслює актуальність магістерського дослідження.
7. На основі досліджень були розроблені методики моделювання мостових споруд в CAD та BIM за результатами лазерного сканування. Методики представлені у вигляді блок-схеми.
8. Для підвищення ефективності моделювання була запропонована система організації моделі за допомогою шарів для CAD та сімейств для BIM.
9. За створеними алгоритмами в розділі 3, були змодельовані міст Пфаффендорф у CAD та міст у місті Штутгарт у BIM.
10. Шляхом порівняння створених моделей з хмарою, було визначено відхилення, яке не перевищує допустиме. Це свідчить про високий рівень точності моделювання та ефективність застосованої методики.

Таким чином, результати роботи демонструють високу ефективність використання наземного лазерного сканування для створення тривимірних моделей мостових споруд, що має вагомое значення для сучасної інженерної практики.