

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**
Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування

Бахмач Анна Юріївна

Київ – 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.

“ _____ ” _____ 2024 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування

Виконала студент групи ГСТм-23
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Бахмач А.Ю.

Керівник: Горковчук Ю. В. доц. к.т.н.
Ідентичність підтверджую

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____доцент., к.т.н. Нестеренко О. В.

“ _____ ” _____ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Бахмач Анна Юріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розроблення методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування.

затверджена наказом ректора КНУБА № від « » _____ 2024 року

2. Керівник роботи доц., к.т.н. Горковчук Юлія Вікторівна

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: 19 грудня 2024 р.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Сучасний стан і тенденції розвитку засобів тривимірного моделювання.

Р. 2. Методичні засади тривимірного моделювання мостових споруд.

Р. 3. Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд.

Р. 4. Апробація методики тривимірного моделювання мостових споруд

Висновки

Список використаної літератури

5. Графічний матеріал за розділами

Р. 1. Завдання, структура та обмеження проекту; Порівняння каркасної, поверхневої та об'ємної моделей. Основні методи тривимірного моделювання. Основні геометричні тіла примітиви. Основні операції для створення твердих тіл з лінійних чи площинних об'єктів. Основні операції для редагування твердих тіл. Тривимірна твердотільна модель машинного залу. Приклад моделювання рельєфу за допомогою орографічних ліній. Приклад моделювання доріг за допомогою 3D поліліній. Рівні зрілості BIM (модель Бью-Річардса). Рівні розроблення BIM на прикладі сталевих конструкцій. BIM-модель кварталу в LOD300 та частково в LOD100. BIM-модель в LOD250 та частково в LOD150. BIM-модель пішохідного мосту в LOD300. BIM-модель насосної станції в LOD250. Сучасні технології збору даних. Порівняння інструментів тривимірного моделювання(таблиця).

Р. 2. Загальне креслення мосту. Класифікація мостових споруд. Типи мостів за основною несучою конструкцією. Точність моделювання мостових споруд. Основні вимоги до САД/ВІМ-моделей. Приклади моделювання мостових споруд. Основні цілі використання тривимірних моделей мостів.

Р. 3. Технологічна схема моделювання мосту в САД для оцінки стану та моніторингу. Технологічна схема моделювання мосту в ВІМ для планування реконструкції та модернізації. Перелік шарів для моделі мосту в AutoCAD (таблиця). Перелік категорій та сімейств для моделі мосту в Revit(таблиця).

Р. 4. Хмара точок мосту Пфафендорф у середовищі Rescap. Результати моделювання мосту Пфафендорф. Приклад перевірки моделі. Рендери моделі мосту Пфафендорф. Хмара точок мосту у місті Штутгарт у середовищі Rescap. Приклад створення за допомогою мас (mass) у Revit. Результат моделювання мосту у місті Штутгарт. Порівняння хмари та створеної моделі мосту Пфафендорф в середовищі CloudCompare. Порівняльна хмара мосту у місті Штутгарт в середовищі CloudCompare.

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
Вступ Розділ 1. Сучасний стан і тенденції розвитку засобів тривимірного моделювання 1.1. Методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання 1.2. Порівняльний аналіз інструментів тривимірного моделювання Висновки до розділу 1	30.09.2024
Розділ 2. Методичні засади тривимірного моделювання мостових споруд 2.1. Інституційні засади тривимірного моделювання мостів 2.2. Досвід впровадження тривимірного моделювання для моделювання мостових споруд Висновки до розділу 2	15.10.2024
Розділ 3. Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд 3.1. Розроблення методики тривимірного моделювання мостових споруд на основі даних наземного лазерного сканування 3.2. Оптимізація методів класифікації елементів мостової конструкції Висновки до розділу 3	19.11.2024
Розділ 4. Апробація методики тривимірного моделювання мостових споруд 4.1. Моделювання мостової споруди за даними наземного лазерного сканування 4.2. Оцінка результатів відповідно до вимог якості моделювання Висновки до розділу 4. Загальні	22.11.2024
Остаточне оформлення роботи	25.11.2024
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	26.11.2024
Попередній захист роботи на кафедрі	06.12.2024

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			

8. Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри _____ Карпінський Ю.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Горковчук Ю.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ Бахмач А.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary) <i>До атестаційної випускної роботи студента:</i>		Бахмач Анна Юріївна	
<i>Назва ВНЗ</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедри</i>	Геоінформатики та фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія та землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи і технології		
<i>Керівник</i>	Горковчук Юлія Вікторівна, к.т.н., доцент		
<i>Обсяг роботи</i>	<i>пояснювальна записка, стор.</i>	<i>розділів</i>	<i>креслень формату А4</i>
	122	4	
<i>Розділ 1</i>	Розглянуто методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання. Досліджено технології та інструменти CAD та BIM моделювання а також сучасні технології збору вихідних даних для моделювання. Проаналізовано інструменти тривимірного моделювання.		
<i>Розділ 2</i>	На основі діючих нормативно-правових актів наведено різні класифікації мостових споруд. Визначено точність моделювання мостових споруд. Наведені вимоги до моделювання. Викладено приклади використання моделей мостових споруд.		
<i>Розділ 3</i>	Розроблені методики моделювання мостових споруд в CAD та BIM за результатами лазерного сканування. Запропоновано система організації моделі за допомогою шарів для CAD та сімейств для BIM.		
<i>Розділ 4</i>	Змодельовані міст Пфаффендорф у CAD та міст у місті Штутгарт у BIM. Шляхом порівняння створених моделей з хмарою, було визначено відхилення, яке не перевищує допустиме.		
<i>Висновки по роботі:</i>	Сучасні технології лазерного сканування та програмні інструменти, такі як AutoCAD і Revit, забезпечують високу ефективність тривимірного моделювання мостових споруд з точністю до 1–1,5 см. Розроблені методики створення CAD і BIM моделей на основі хмар точок забезпечують високу деталізацію та достовірність, що підтверджується мінімальними відхиленнями від реальних об'єктів. Практичне застосування цих підходів, зокрема для моделювання мосту Пфаффендорф у CAD і мосту у Штутгарті в BIM-середовищі, демонструє їхню ефективність для завдань реконструкції, структурного аналізу та модернізації мостових споруд.		
Ключові слова: мостові споруди, мости, тривимірне моделювання, CAD, BIM, наземне лазерне сканування, системи автоматизованого проектування, будівельні інформаційні моделі.			
Keywords: Bridge structures, bridges, 3D modeling, CAD, BIM, Terrestrial laser scanning, Computer-Aided Design Systems, Building Information Models (BIM)			

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	11
1.1. Методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання	12
1.2. Порівняльний аналіз інструментів тривимірного моделювання.....	28
Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД.....	33
2.1 Інституційні засади тривимірного моделювання мостів	34
2.2. Досвід впровадження тривимірного моделювання для моделювання мостових споруд.....	40
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД.....	49
3.1. Розроблення методики тривимірного моделювання мостових споруд на основі даних наземного лазерного сканування.....	50
3.2. Оптимізація методів класифікації елементів мостової конструкції	54
Висновки до розділу 3	58
РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД.....	59
4.1 Моделювання мостових споруд за даними наземного лазерного сканування	60
4.2. Оцінка результатів відповідно до вимог якості моделювання.....	76
Висновки до розділу 4	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	91

ВСТУП

Мостові споруди є ключовими елементами транспортної інфраструктури, що забезпечують безперебійний рух транспорту та з'єднують території, розділені природними або штучними бар'єрами. Ефективне проектування, будівництво та обслуговування мостів мають вирішальне значення для забезпечення їхньої довговічності та безпечної експлуатації.

Технології лазерного сканування є одними з найефективніших інструментів для збору просторових даних про мостові споруди. Це дає змогу отримувати високоточні тривимірні моделі, які можуть бути використані для діагностики стану конструкцій, реконструкції чи планування ремонтних робіт та проведення наукових досліджень. Застосування цієї технології значно спрощує процес аналізу, дозволяючи виявляти потенційні дефекти та оптимізувати процес експлуатації мостів.

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.

Використання лазерного сканування, як основи для розробки методології моделювання, забезпечує високоточну і детальну візуалізацію об'єктів. Це дозволяє значно підвищити ефективність аналізу стану споруд, зменшити ризики під час реконструкції та сприяти довготривалій експлуатації відновлених об'єктів. Запропонована методика має потенціал стати важливим інструментом у вирішенні критичних завдань у галузі транспортної інфраструктури та сприяти її інтеграції з сучасними підходами до цифровізації будівництва і управління об'єктами.

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. Для досягнення цієї мети сформульовано наступні основні завдання:

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.
7. Оцінка результатів відповідно до вимог якості моделювання.

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

Наукова новизна роботи полягає в розробці та обґрунтуванні унікальної методики тривимірного моделювання мостових споруд на основі даних наземного лазерного сканування. Запропоновані підходи інтегрують сучасні технології BIM і CAD, дозволяючи створювати високоточні моделі з урахуванням специфіки конструктивних елементів мостів та їх подальшого використання для моніторингу, реконструкції та планування модернізацій. Особливу увагу приділено оптимізації класифікації елементів мостових конструкцій, що забезпечує ефективну організацію даних у середовищах моделювання.

Практична цінність роботи полягає в можливості широкого застосування розробленої методики для оцінки технічного стану мостів, що є критично важливим для транспортної інфраструктури України, особливо в умовах відновлення пошкоджених об'єктів. Використання лазерного сканування значно

скорочує час і витрати на польові роботи, тоді як інтеграція BIM-технологій сприяє створенню детальних інформаційних моделей для подальшого аналізу та планування реконструктивних заходів. Результати дослідження мають потенціал бути впровадженими в реальні проекти та освітні програми для підготовки фахівців у галузі геоінформатики.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Виконала</i>		Бахмач А.Ю.			Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Консульт.</i>							11	122
<i>Керівник</i>		Горковчук Ю.В.				КНУБА, ГІСУТ, ГСТМ-23		
<i>Зав.каф.</i>		Карпінський Ю.О.						

1.1. Методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання

Термін «3D-моделювання» означає процес створення тривимірного зображення об'єкта за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це представлення, яке називається 3D-моделлю, може передати розмір, форму та текстуру об'єкта. [1]

За останні десятиліття тривимірне моделювання стало одним з ключових інструментів в інженерії, зокрема у сфері проектування мостів, будівель та інших інфраструктурних об'єктів. Воно дозволяє інженерам та архітекторам візуалізувати складні конструкції, аналізувати їх характеристики та взаємодію з навколишнім середовищем ще до етапу будівництва, що значно підвищує точність і ефективність проектування.

Історія тривимірного моделювання починається з середини ХХ століття, коли перші комп'ютерні програми для проектування почали використовуватися в інженерії та наукових дослідженнях. Перші спроби створення тривимірних моделей були обмежені простою графікою та низькою обчислювальною потужністю комп'ютерів того часу. Однак з розвитком обчислювальних технологій, збільшенням обсягів оперативної пам'яті та вдосконаленням програмного забезпечення тривимірне моделювання зазнало значного прогресу. Сьогодні ці технології є важливою частиною інженерних процесів у всьому світі.

Основою для моделювання є вихідні дані, що можуть бути зібрані різними способами: від ручного вимірювання та моделювання до використання лазерного сканування, фотограмметрії, аерофотозйомки, супутникових технологій та інших методів збору інформації.

Переважну більшість 3D моделей можна поділити на три типи:

- Каркасні (дротяні) (англ. wire-frame model) моделі відображають лише контури об'єкта за допомогою набору ліній та точок, не надаючи інформації про поверхні чи об'єми.
- Поверхневі (англ. surface model): надають дані про зовнішні поверхні об'єкта, але не описують внутрішню структуру.

- Об'ємні (тверді тіла, суцільні) (англ. solid model): найбільш деталізовані моделі, що описують не лише зовнішній вигляд, але й внутрішні об'єми та властивості матеріалів.

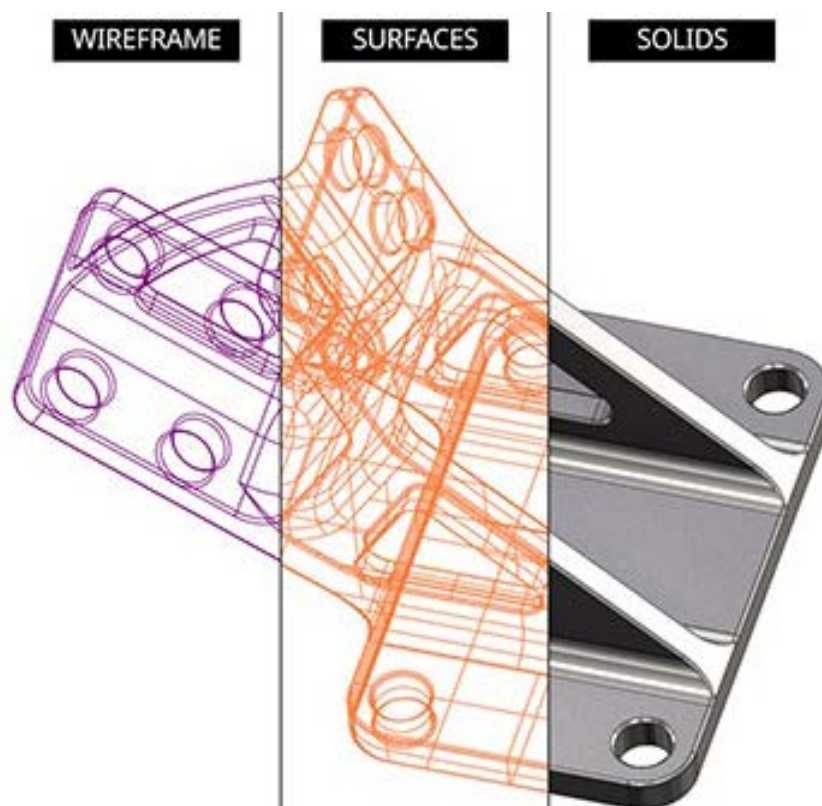


Рис.1.1. Порівняння каркасної, поверхневої та об'ємної моделей[3]

Розвиток сучасних технологій дозволив використовувати різноманітні методи для створення 3D-моделей, кожен з яких має свої переваги та застосування залежно від вимог проекту.

Наразі існує декілька методів тривимірного моделювання.

- Полігональне моделювання: базується на використанні сітки з полігонів, що дозволяє створювати складні поверхні з високим рівнем деталізації. Полігональне моделювання є ефективним для візуалізації та анімації, однак часто потребує великої кількості ресурсів для точної репрезентації об'єкта.
- НУРБС-моделювання (NURBS): використовує криві та поверхні на основі математичних функцій. Цей метод є особливо ефективним для моделювання складних вигнутих поверхонь, наприклад, у проектуванні автомобілів чи літаків, а також архітектурних об'єктів.

- Параметричне моделювання: дозволяє створювати моделі на основі параметрів, які можуть змінюватися під час проектування. Цей підхід є дуже зручним у проектуванні архітектурних і будівельних об'єктів, оскільки дозволяє легко вносити зміни та адаптувати модель до нових вимог.
- Воксельне моделювання: засноване на використанні тривимірних пікселів (вокселів), що створюють об'єкт з високою точністю. Цей метод часто використовується в медицині, геології та симуляціях природних явищ.
- Процедурне моделювання: створення об'єктів на основі певних алгоритмів чи правил. Це дає змогу автоматизувати процес генерації складних структур, таких як ландшафти, мости, будівлі тощо.

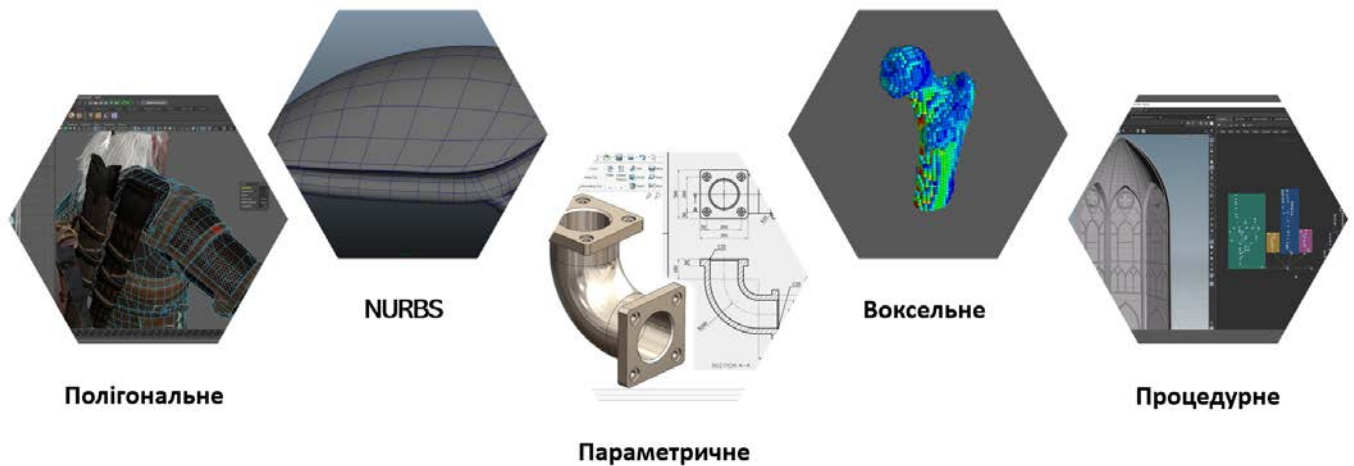


Рис.1.2. Основні методи тривимірного моделювання

Сучасне тривимірне моделювання неможливе без застосування алгоритмів, які оптимізують і прискорюють процес створення моделей. Серед найважливіших алгоритмів:

- Алгоритми рендерингу: забезпечують реалістичне відображення тривимірних моделей, включаючи тіні, освітлення та текстури.
- Алгоритми згладжування: використовуються для створення плавних поверхонь, що особливо важливо для складних архітектурних форм чи природних ландшафтів.

- Алгоритми декомпозиції: розбивають об'єкт на простіші частини, що дозволяє зменшити складність моделі й підвищити ефективність обчислень.
- Алгоритми оптимізації геометрії: дозволяють зменшити кількість полігонів, зберігаючи при цьому точність моделі, що є критично важливим для інтерактивних застосувань або моделювання великих об'єктів, таких як мости.

Основними технологіями, що використовуються для створення тривимірних моделей в інженерії та будівництві є BIM (Building Information Modeling) та CAD (Computer-Aided Design), через свою здатність забезпечувати точне проектування, аналіз і візуалізацію об'єктів.

Як САПР (англ. CAD) зазвичай розуміють графічні системи, за допомогою яких здійснюється автоматизоване моделювання, підготовка виробництва та конструювання, а також управління інженерними даними. САПР – це комплекс програм для креслення двовимірних та тривимірних об'єктів, створення конструкторської і технологічної документації. За створеною моделлю можлива регенерація креслеників виробу та їх супровід.[8]

Перші системи автоматизованого проектування з'явилися в 1960-х роках у відповідь на зростаючу складність інженерних і проєктних завдань. З розвитком комп'ютерних технологій стало можливим автоматизувати процеси проектування, що раніше виконувалися вручну. Перші CAD були створені для заміни традиційних інструментів креслення — кульманів, рейсшин і олівців — на цифрові аналоги, такі як монітори, мишки і графічні системи. Цей перехід дозволив значно підвищити ефективність роботи інженерів і зробив можливим швидке створення складних креслень і проєктів.

Типові програми CAD можна розділити на дві групи. Системи автоматизованої розробки креслень допомагають проєктувальникові реалізувати свої ідеї в двовимірному просторі. Системи геометричного моделювання дозволяють працювати з формами в тривимірному просторі.[2]

У CAD-моделюванні використовуються різні методи для побудови тривимірних моделей залежно від типу проєкту та вимог.

Твердотільне моделювання є одним із основних методів у САД. Воно дозволяє створювати тривимірні об'єкти з точними геометричними характеристиками та обсягами. Це особливо важливо для розробки деталей машин або будівельних компонентів, де точність вимірів є критичною.

Моделі часто починають створювати з одного чи кількох базових примітивів, які потім можна змінювати чи рекомбінувати.

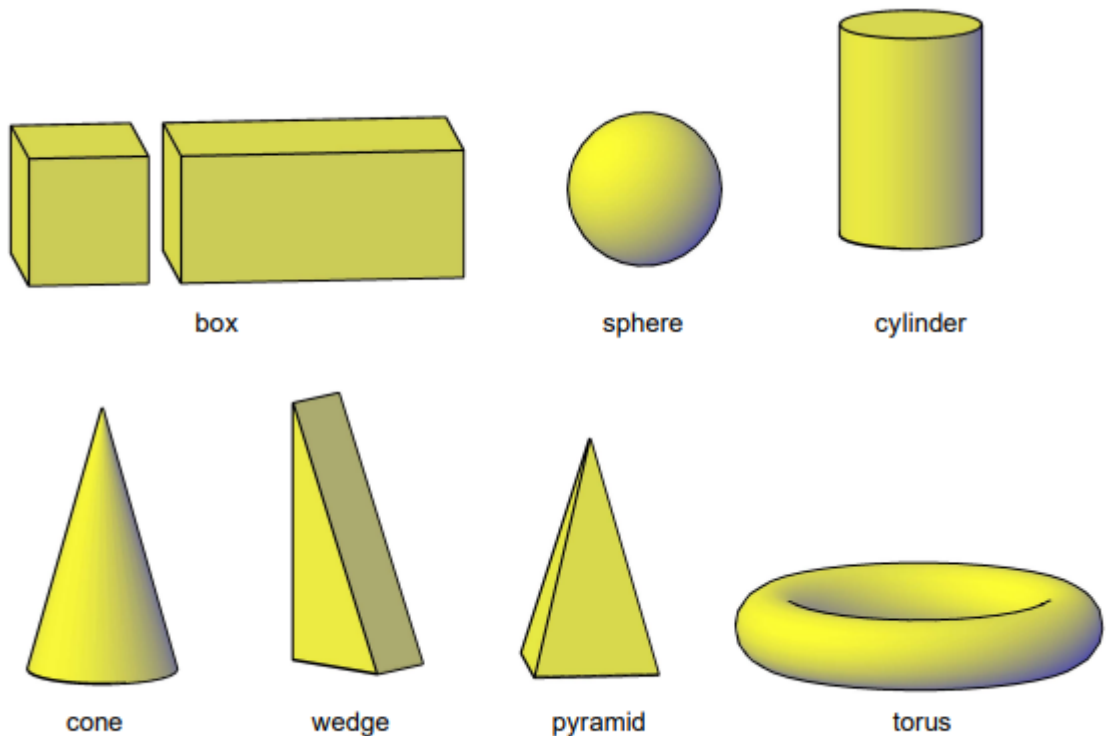


Рис.1.3. Основні геометричні тіла примітиви

Також в САД-моделюванні доступні булеві операції. Це базовий метод, що дозволяє створювати нові форми шляхом об'єднання (union), перетину(intersect) або вирізання(substract) тривимірних об'єктів. Наприклад можна взяти дві прості геометричні форми (куб і циліндр) і застосувати до них булеву операцію для створення складної деталі.(див. рис.1.4)

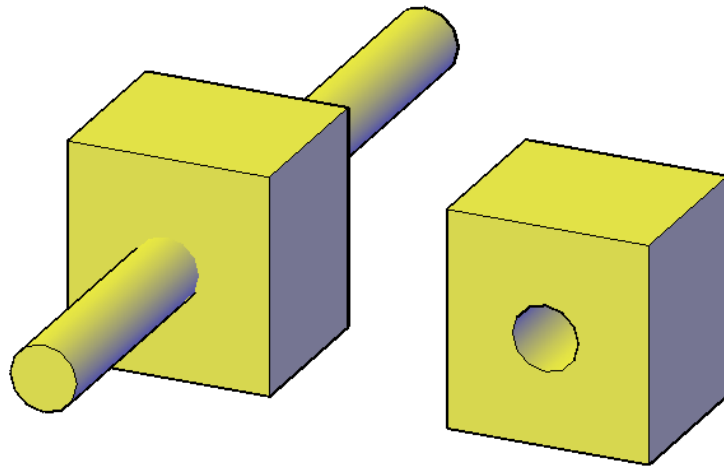


Рис.1.4. Приклад булевої операції вирізання(subtract)

Тверді тіла можна створювати з інших об'єктів наприклад поліліній. Існує декілька основних операцій:

- Extrusion (витягування) – процес, коли двовимірна фігура (контур) витягується перпендикулярно до її площини, щоб створити тривимірну форму.
- Sweep – процес, коли контур витягується вздовж траєкторії (полілінії) створюючи тривимірну форму.
- Loft полягає в побудові тривимірної форми на основі кількох перерізів (профілів).
- Revolve(обертання) дозволяє створювати тривимірний об'єкт шляхом обертання двовимірного контуру навколо осі.

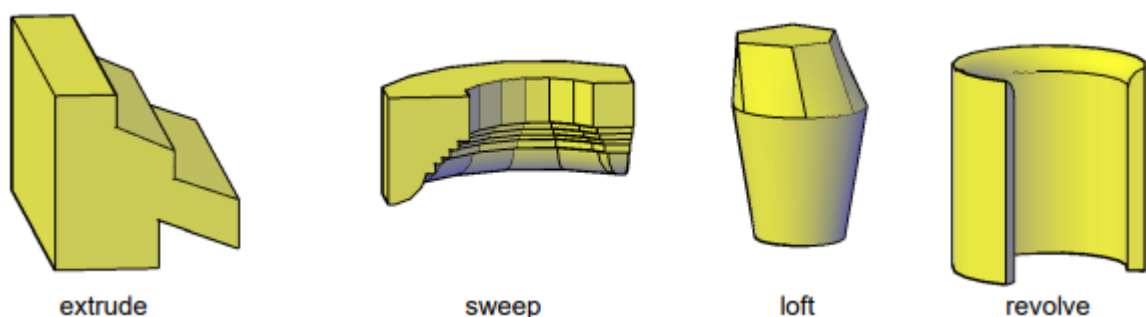


Рис.1.5. Основні операції для створення твердих тіл з лінійних чи площинних об'єктів

Крім того, для твердих тіл доступні інструменти редагування:

- Delete/extrude/move faces – інструменти для видалення, зміщення і т.д. граней.
- Shell видаляє матеріал зсередини об'єкта, залишаючи тільки зовнішні стінки певної товщини.
- Fillet/chamfer edge дозволяє скруглити чи зрізати ребро моделі.

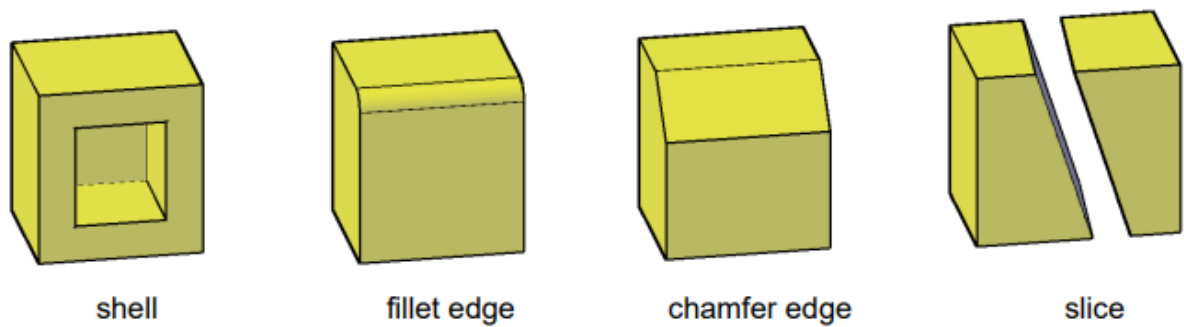


Рис.1.6. Основні операції для редагування твердих тіл

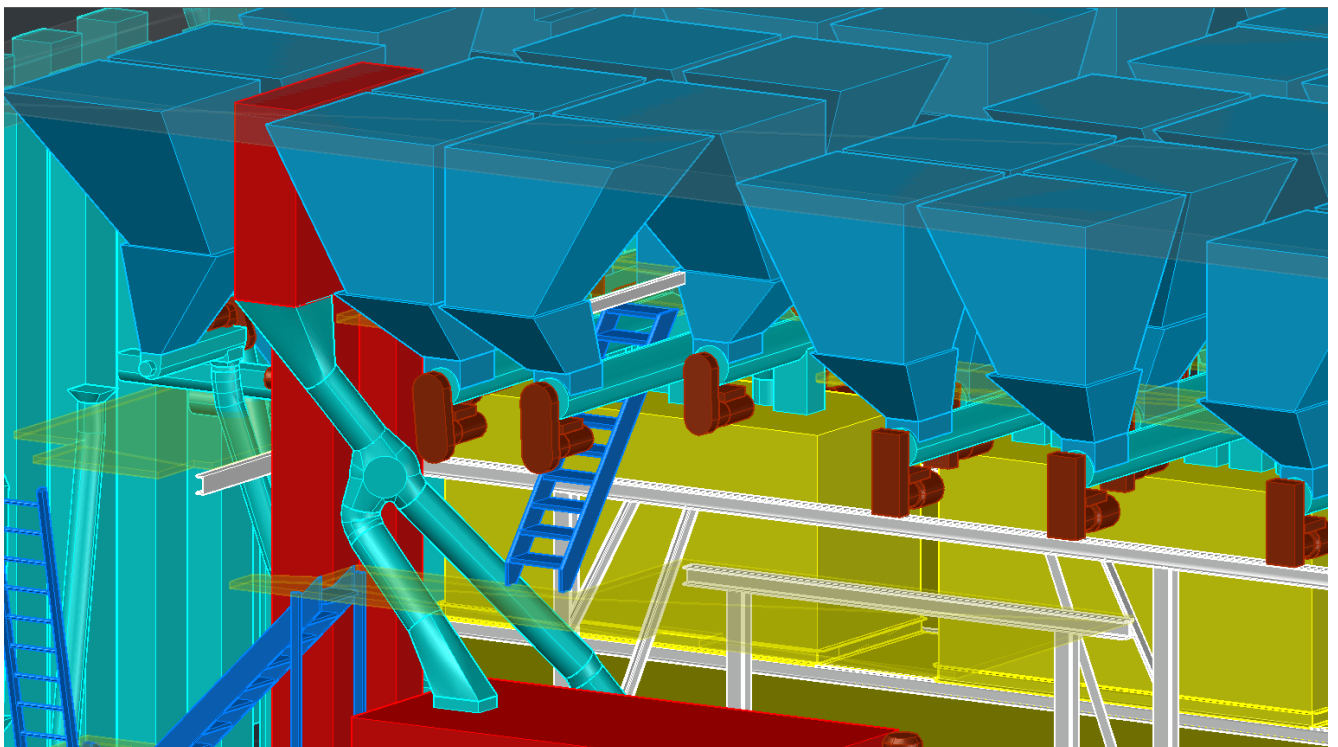


Рис.1.7. Тривимірний твердотільний моделювальний машинний зал

Моделювання поверхонь також використовують в будівництві та інженерії, хоч і не так часто як твердотіле моделювання. Найчастіше його використовують для:

- Моделювання рельєфу за допомогою орографічних ліній;
- Моделювання складної форми, яку спочатку моделюють поверхнями, яким потім задають товщину, після чого вона стає твердим тілом.

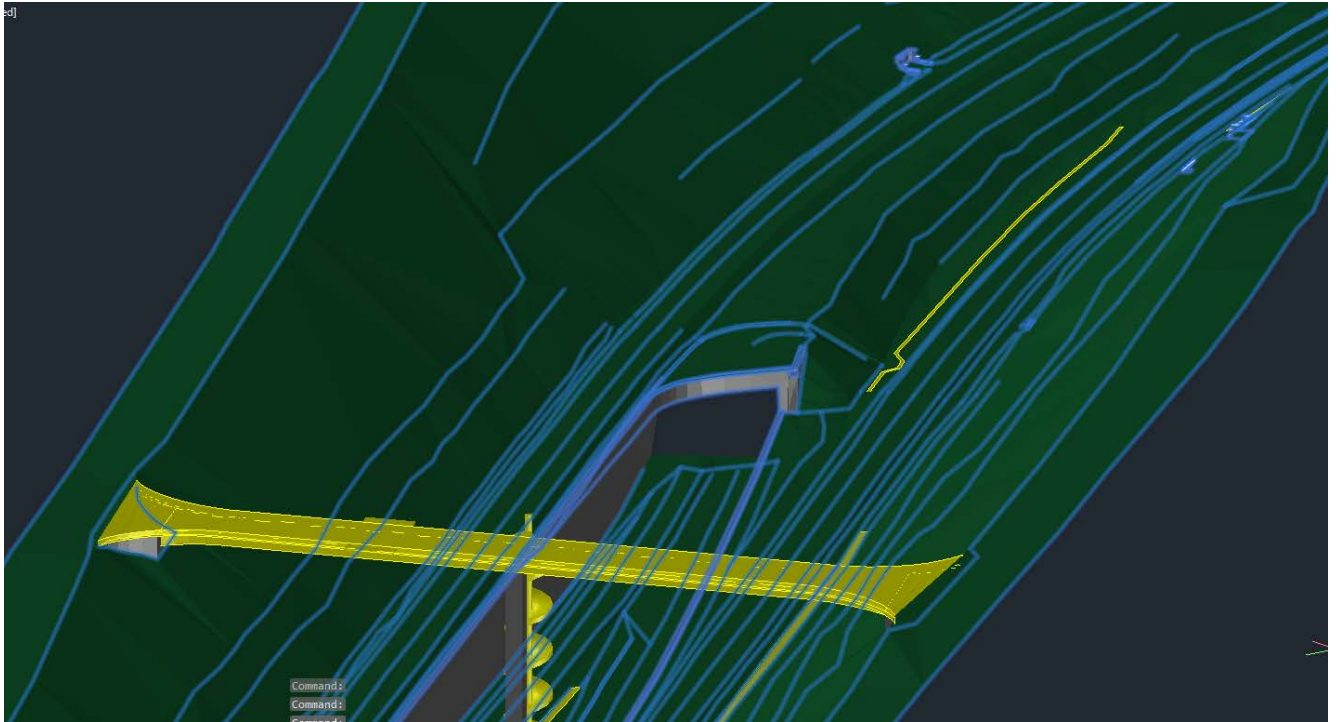


Рис.1.8. Приклад моделювання рельєфу за допомогою орографічних ліній(позначено блакитним)

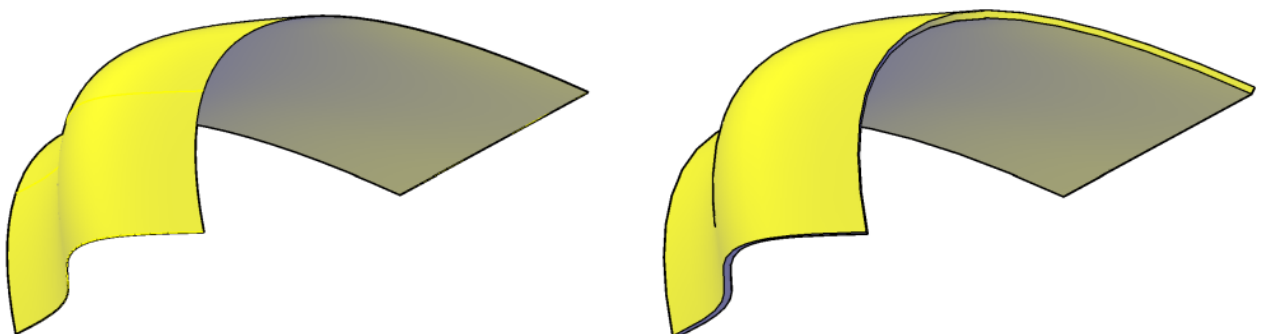


Рис.1.9. Складна форма(справа) та поверхня (зліва) з якої вона була змодельована

Каркасне моделювання використовується досить рідко. Як правило такі моделі створені з 3D поліліній. Найчастіше так можуть моделювати дороги.

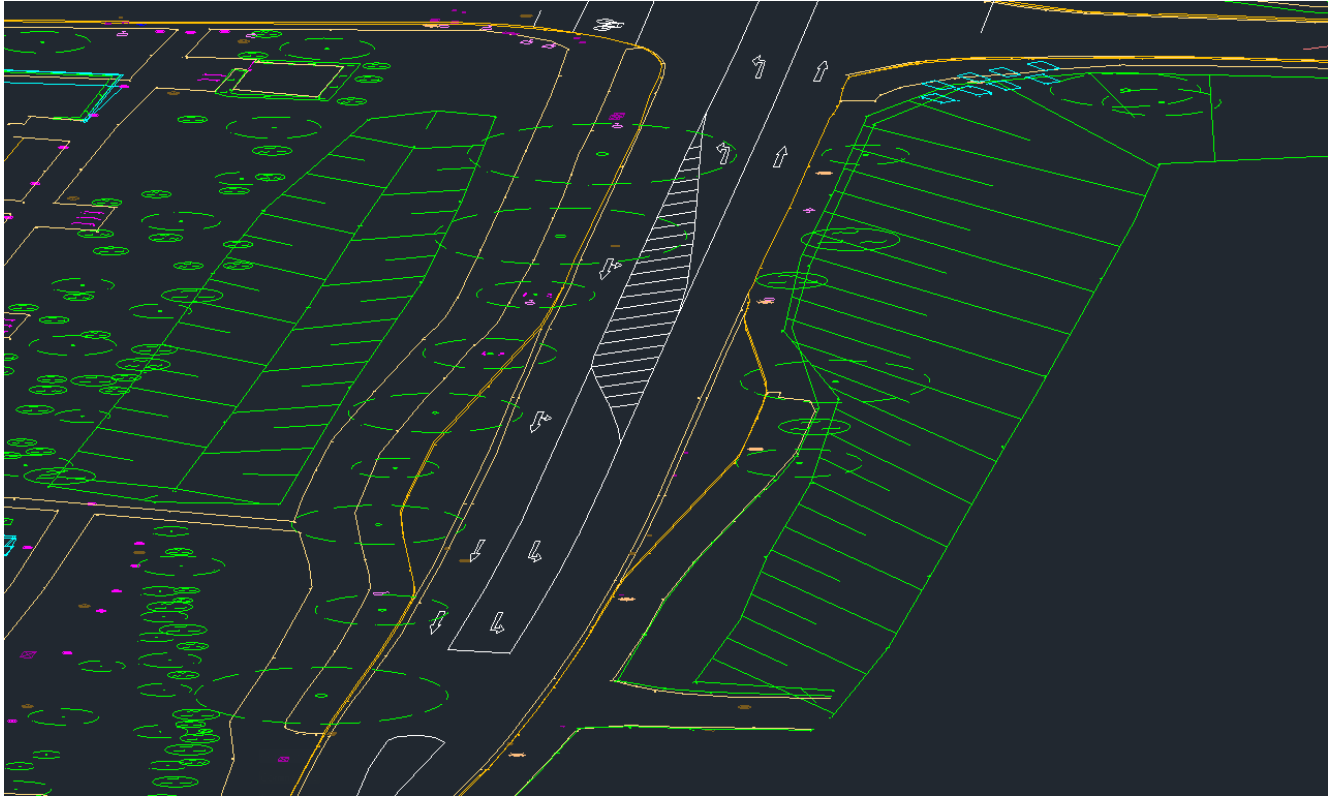


Рис.1.8. Приклад моделювання доріг за допомогою 3D поліліній

Важливим моментом в CAD-моделюванні є системи координат. Їх можна виставити по виду, по грані чи зробити локальну систему координат. Геодезичні системи координат CAD-програми не підтримують, адже переважно спрямовані на проектування та виробництво та орієнтуються на прямокутні системи координат, які дозволяють зручно маніпулювати об'єктами в просторовому середовищі без урахування геодезичних аспектів. Проте готову модель можна змістити в реальні координати, звісно якщо ця модель не величезних розмірів, де вже має суттєвий вплив кривизна земної поверхні.

Будівельна інформаційна модель об'єкта будівництва (з англ., Building Information Models, BIM-модель) це набір даних, що містить геометричні, фізичні, функціональні та інші характеристики будівлі, слугуючи основою для всіх етапів життєвого циклу об'єкта: від проектної документації до кошторисів і інструкцій з експлуатації.

BIM-технологія, що виникла в 1990-х роках, стала відповіддю на потребу підвищити ефективність і узгодженість будівельних проєктів. Завдяки тривимірній моделі з усією необхідною інформацією про матеріали і характеристики будівлі, BIM дозволяє краще приймати рішення, чого не забезпечували 2D-креслення.

BIM кардинально змінив підхід до проєктування та управління будівництвом, дозволяючи підвищити точність проєктування, заощадити час на плануванні та оптимізувати ресурси, зменшуючи витрати на матеріали та роботу.

Для різних типів проєктів можна досягти різних рівнів BIM. Наразі більшість користуються моделлю Бью-Річардса, прийнятій урядом Великобританії. Кожна група представляє окремий набір критеріїв, який демонструє певний рівень «зрілості». Рівні мають на меті оцінити, наскільки ефективно або скільки інформації передається та управляється протягом усього процесу.

- **Рівень 0 BIM.** Використовується традиційний CAD у 2D-форматі, де елементи зображаються лініями та дугами. Обмін даними здійснюється на паперових чи електронних носіях.
- **Рівень 1 BIM.** 2D- або 3D-CAD. 3D застосовується для концептуальних робіт, а 2D — для документації. Обмін інформацією відбувається через загальне середовище даних (CDE), проте міждисциплінарної інтеграції немає.
- **Рівень 2 BIM.** Усі учасники команди працюють з 3D-моделями, обмін даними відбувається через загальний формат файлів (наприклад, IFC чи COBie), що дозволяє уникати переробок. Багато країн визнали цей рівень обов'язковим.

- **Рівень 3 BIM.** Усі учасники використовують єдину спільну модель проекту в «центральному» середовищі з доступом для змін. Це повністю інтегровані дані та процеси.
- **Рівень 4 BIM.** Включає час у модель, що допомагає планувати етапи проекту.
- **Рівень 5 BIM.** Додає оцінки витрат та бюджетний аналіз, що дозволяє відстежувати витрати протягом усього життєвого циклу будівлі.
- **Рівень 6 BIM.** Оцінює енергоспоживання будівлі ще на етапі проектування, забезпечуючи можливість будувати енергоефективні споруди.

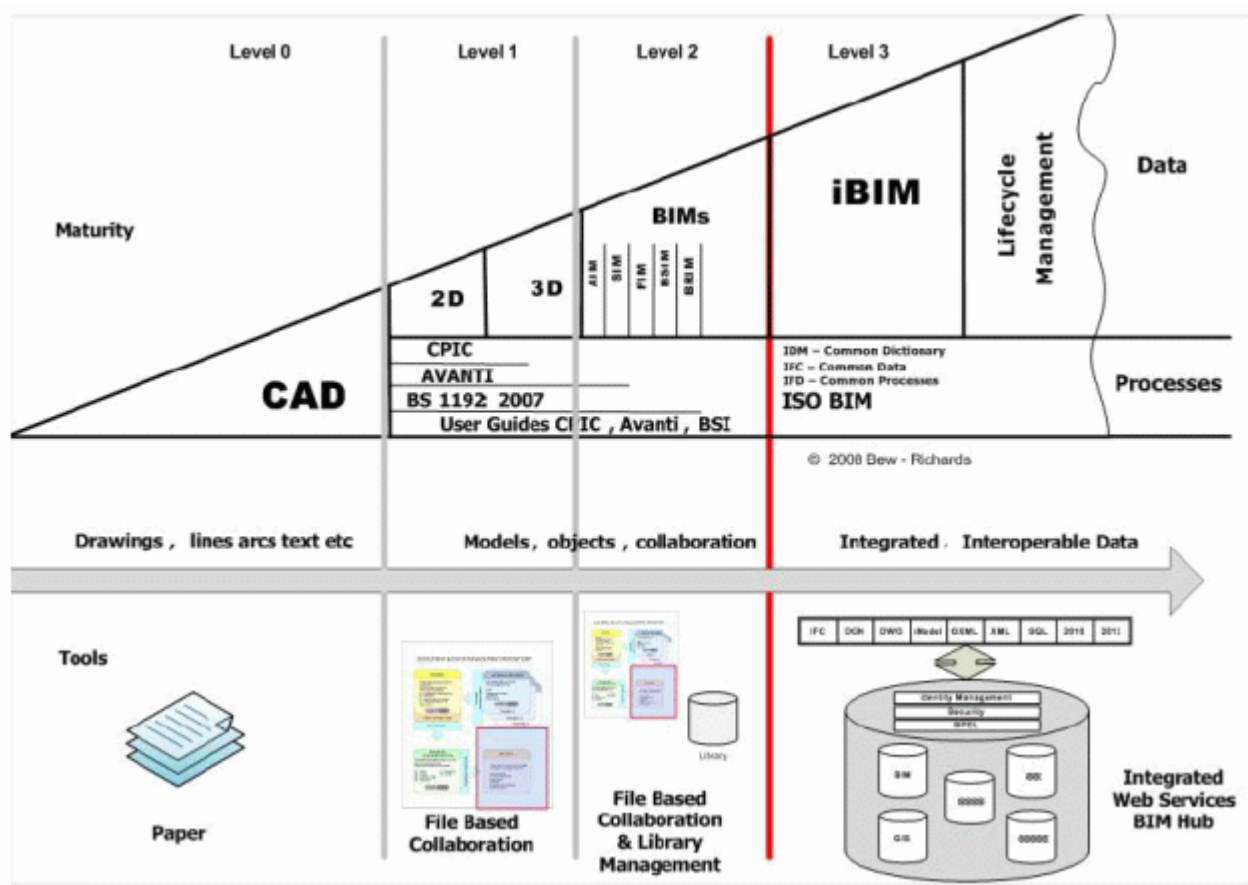


Рис.1.8. Рівні зрілості BIM (модель Бью-Річардса)

BIM-моделі розробляються на різних рівнях (LOD — Level of Development), що визначає обсяг інформації та деталізації, необхідний для виконання завдань. Рівень деталізації (LoD) відображає графічну точність моделі, а рівень інформативності (LOI) — наповнення описової частини. Система наведена тут, була встановлена

AIA (Американським інститутом архітекторів) та вдосконалена організацією BIMForum у 2023 році.

- **LOD 100:** Модель містить загальну форму будівлі, без деталей про матеріали чи конструктивні елементи, і використовується для концептуального проектування.
- **LOD 200:** Додає приблизну геометрію, основні системи та інформацію для загальної оцінки витрат.
- **LOD 300:** Модель з точною геометрією та деталями про матеріали, яка служить основою для проєктної документації.
- **LOD 350:** Містить інформацію для врахування монтажу та взаємозв'язків, що дозволяє виявляти колізії.
- **LOD 400:** Включає деталі, необхідні для виробництва та монтажу, і забезпечує підготовку до виконання робіт.
- **LOD 500:** Модель відображає фактичний стан побудованого об'єкта та містить дані для управління й обслуговування будівлі.

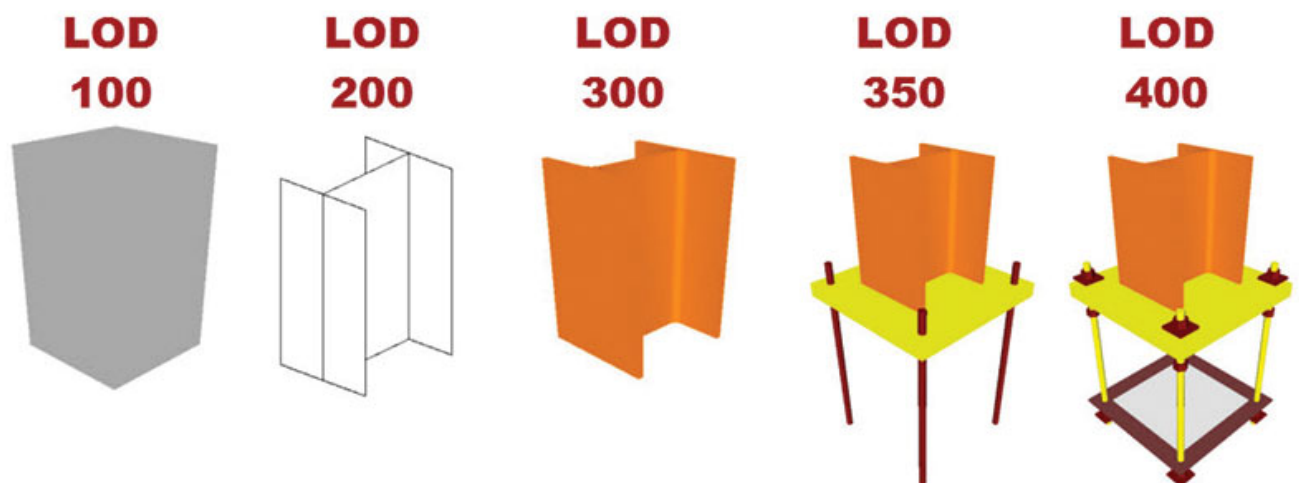


Рис.1.9. Рівні розроблення BIM на прикладі сталевих конструкцій

BIM-моделі створюють у спеціалізованих програмах, таких як Autodesk Revit чи Graphisoft ArchiCAD, використовуючи інструменти, що мають реальні аналоги (стіни, дахи, балки тощо). Ці програми застосовують методи CAD-моделювання (loft, extrude), інтегруючи їх з інформацією про об'єкт: характеристиками, матеріалами, функціями. Це дозволяє створювати інформаційний об'єкт, а не

просто геометричну модель. Програмні рішення автоматизують процеси, орієнтуючи на об'єктний підхід і управління інформацією, а також підтримують геодезичні системи координат.

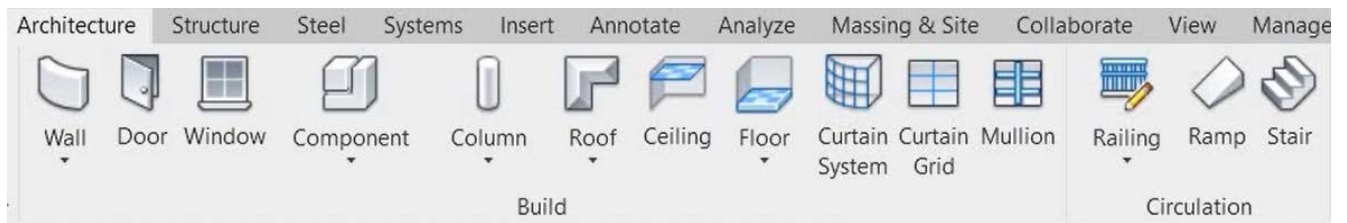


Рис.1.11. Панель інструментів в середовищі Autodesk Revit

На сьогодні найпопулярнішим рівнем деталізації для BIM-моделювання є LOD 300, оскільки він забезпечує достатню точність геометрії та деталізацію матеріалів і конструктивних елементів, щоб створити проектну документацію та виконати основний аналіз. Рідше використовують LOD 100 (для об'єктів на фоні чи коли не потрібна висока деталізація) та LOD200/250 (якщо потрібна точність але непотрібні матеріали).



Рис.1.12. BIM-модель кварталу в LOD300 та частково в LOD100



Рис.1.13. BIM-модель в LOD250 та частково в LOD150

У BIM найчастіше моделюють будівлі різного призначення, такі як житлові, комерційні, лікарні та навчальні заклади, включаючи стіни, перекриття, сходи, дахи, інженерні системи та внутрішні елементи.

Проте, BIM дозволяє також створювати моделі таких об'єктів, як мости, тунелі, інженерні комунікації (водо- і теплопостачання, каналізація), транспортна інфраструктура (дороги, залізниці, аеропорти), гідротехнічні споруди (дамби, канали) та енергетичні об'єкти (електростанції, вітрові й сонячні установки).



Рис.1.14. BIM-модель пішохідного мосту в LOD300

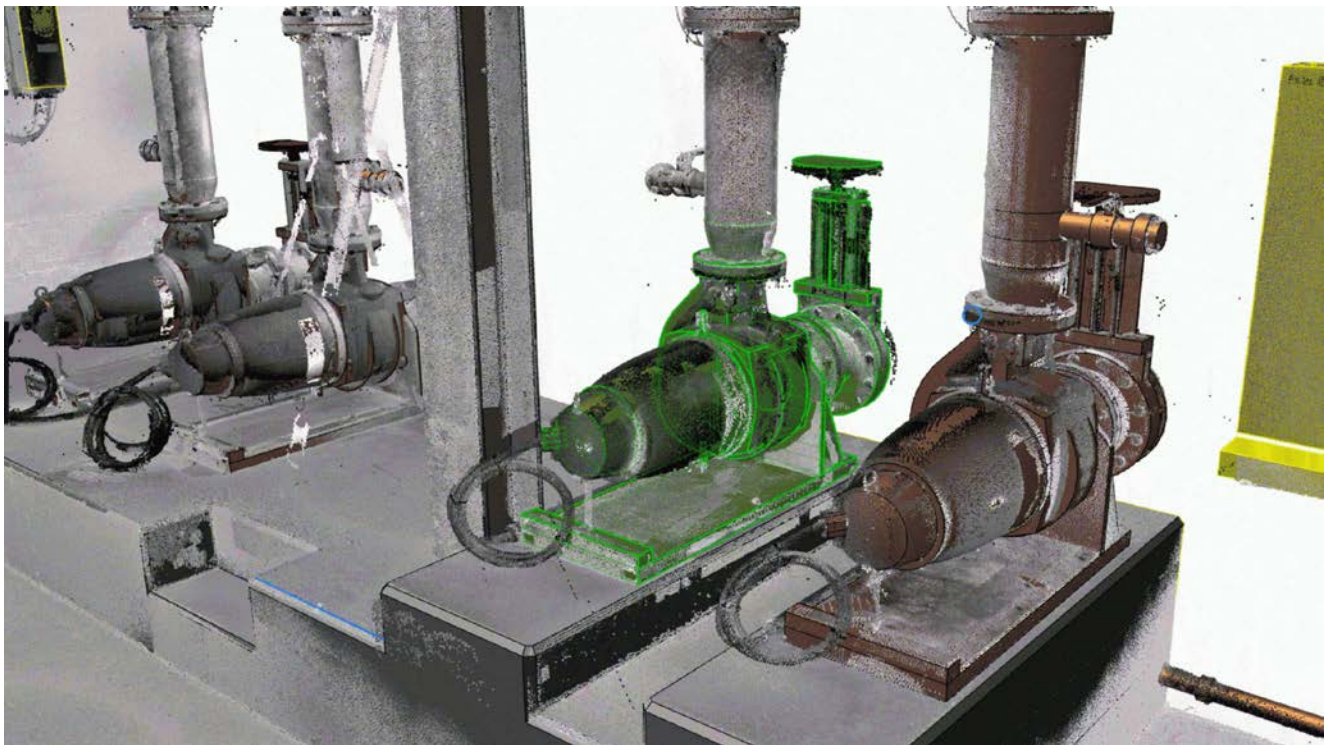


Рис.1.15. BIM-модель насосної станції в LOD250

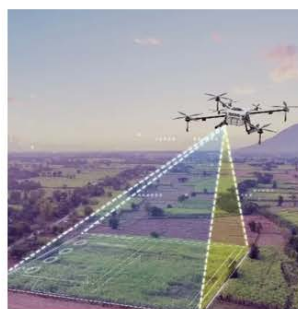
Сучасні технології збору даних значно підвищують точність, швидкість і ефективність процесу моделювання в середовищах BIM/CAD. Вони дозволяють отримувати детальні дані про об'єкти, їх параметри і характеристики, що є

важливим для подальшого проектування і реалізації будівельних проектів. Основні методи збору даних включають:

- **Геодезичні знімання** є традиційним методом, який включає використання теодолітів, тахеометрів та ГНСС для визначення координат точок на поверхні Землі. Хоча цей метод є точним, він може бути часозатратним і має обмежений рівень деталізації.
- **Фотограмметричні знімання** - це метод збору даних, що використовує зображення, отримані з різних ракурсів. Це може бути виконано за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів) або традиційних камер. Цей метод швидко охоплює великі території, але залежить від погодних умов та кута зйомки, що може вплинути на точність.
- **Наземне лазерне сканування** використовує лазерні промені для отримання детальних тривимірних моделей об'єктів, що забезпечує високу деталізацію і швидкість знімання. Але воно є дорогим у плані обладнання і вимагає спеціалізованого програмного забезпечення для обробки даних.
- **Системи мобільного картографування** поєднують лазерне сканування, GPS і камери, що дозволяє швидко збирати інформацію на великих ділянках знімання. Водночас їх використання також пов'язане з високими витратами на обладнання та потенційними неточностями через швидкість збору даних.



**ГЕОДЕЗИЧНЕ
ЗНІМАННЯ**



**ФОТОГРАМЕТРИЧНЕ
ЗНІМАННЯ**



**НАЗЕМНЕ ЛАЗЕРНЕ
СКАНУВАННЯ**



**СИСТЕМИ
МОБІЛЬНОГО
КАРТОГРАФУВАННЯ**

Рис.1.16.Сучасні технології збору даних

1.2. Порівняльний аналіз інструментів тривимірного моделювання

Для вибору програмного забезпечення для тривимірного моделювання та роботи з хмарами точок важливо враховувати різні критерії, такі як основне призначення, легкість освоєння, взаємодія з хмарами точок, підтримка колективної роботи, інтегрованість та інтерфейс користувача. На сьогоднішній день доступно багато програм, кожна з яких має свої переваги та обмеження в залежності від вимог конкретного проєкту. Деякі інструменти краще підходять для детального BIM-моделювання, тоді як інші спеціалізуються на геометричному дизайні або проєктуванні інженерних систем. Далі представлена порівняльна таблиця(див.табл.1.1), яка допоможе розглянути ключові характеристики та можливості найпопулярніших програм для CAD/BIM моделювання.

Проаналізувавши таблицю 1.1. найбільше під критерії підпадають AutoCAD, Archicad, Rhino, BricsCAD. Також не слід відразу відкидати Revit, адже хоч в ньому важко змоделювати щось нерівне, проте він більш призначений для інженерії, що є важливим критерієм при моделюванні інженерних споруд. В Archicad навпаки легко створити старі історичні будівлі, через те що він більш призначений саме для будівель, але слабкий в інженерії. За потреби більш точного моделювання можна використати AutoCAD чи Rhino. BricsCAD хоч і є гарним аналогом AutoCAD, який ще й коштує значно дешевше, більшість користувачів обирають саме AutoCAD через велику кількість плагінів та кастомних надбудов (AutoLISP) за допомогою яких можна автоматизувати деякі процеси (наприклад моделювання труб). Тому було прийнято рішення моделювати в AutoCAD чи в Revit в залежності від мети використання моделі та складності об'єкту.

Таблиця 1.1.

Порівняння 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	Приблизна 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, розміру і щільності. Може підвисати та вилітати на великих хмарах.	Інтуїтивний інтерфейс	Середні	\$1,690
Revit	BIM моделювання будівель (більше для інженерів)	Autodesk	Середня	Підтримує	Повноцінна	Сумісність з IFC . Не дозволяє відкривати файли з нових версій у старих версіях програмного забезпечення	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Налаштування кольору, розміру і щільності доступне. Неможливо робити підрізки. Іноді підвисає та вилітає.	Незручний інтерфейс, проте є багато відеоуроків	Високі	\$2800
Archicad	BIM моделювання будівель (для архітекторів)	Graphisoft	Висока з певними обмеженнями	Підтримує	Розширена	Сумісність з IFC та іншими форматами	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Налаштування кольору, розміру і щільності недоступне. Вилітає лише на великих проєктах.	Дружелюбний інтерфейс	Середні	\$2100

Продовження таблиці 1.1.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rhino	Моделювання складних форм	McNeel	Дуже висока	Через плагін Grasshopper	Обмежена	Інтеграція з іншими інструментами	Можливість роботи через плагіни	Налаштування кольору і щільності недоступне. Є базові інструменти побудови з хмари.	Помірно легкий	Середні	\$1400
BricsCAD	Загальне 2D/3D та BIM моделювання	Bricsys	Висока	Підтримує	Обмежена	Відмінна підтримка формату DWG	Колективна робота через хмару	Вирізки і налаштування доступні, але підрізки не зберігаються. Вилітає на великих хмарах.	Інтуїтивний інтерфейс	Середні	\$1180
BricsCAD BIM	BIM моделювання будівель	Bricsys	Висока	Підтримує	Розширена підтримка BIM	Сумісність з IFC та іншими форматами	Колективна робота через хмару	Вирізки і налаштування доступні, але підрізки не зберігаються. Може вилітати на великих хмарах.	Інтуїтивний інтерфейс	Середні	\$1060
MicroStation	Загальне 2D/3D моделювання та деякі інструменти BIM	Bentley Systems	Висока	Підтримує	Розширена підтримка BIM	Сумісність з іншими CAD/BIM системами	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Добра підтримка хмари, класифікація доступна. Немає вирізок.	Складне	Високі	\$1800

Продовження таблиці 1.1.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Open Building Designer	BIM моделювання будівель	Bentley Systems	Висока	Підтримує	Повноцінна	Сумісність з IFC та іншими форматами	Можливість колективної роботи по локальній мережі та через хмару	Добра робота з хмарою. Вирізки відсутні.	Складне	Високі	\$,800
SketchUp	Загальне 3D моделювання	Trimble	Обмежена	Базові інструменти	Базова	Сумісність через плагіни	Колективна робота через Trimble Connect	Дуже базова підтримка роботи з хмарою.	Інтуїтивний інтерфейс	Низькі	\$440
SolidWorks	Інженерне та механічне моделювання	Dassault Systèmes	Висока	Підтримує	Не підтримує	Інтеграція з іншими інструментами	Колективна робота через платформу 3DEXPERIENCE	Мінімальна підтримка.	Помірно легкий	Високі	\$3995
Allplan	BIM моделювання будівель та інфраструктури	Nemetschek Group	Висока	Підтримує	Розширена	Сумісність з IFC та іншими форматами	Доступна за допомогою спільної моделі	Налаштування кольору, розміру і щільності недоступне. Вилітає лише на великих проєктах.	Інтуїтивний інтерфейс	Високі	\$2600
Vectorworks	BIM, ландшафтний дизайн, сценографія	Vectorworks, Inc.	Висока	Підтримує	Розширена	Сумісність з IFC та іншими форматами	Колективна робота через Vectorworks Cloud	Налаштування недоступне, може підвисати. Доступні базові інструменти моделювання з хмари	Інтуїтивний інтерфейс	Високі	\$4150

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто методи та алгоритми сучасного тривимірного моделювання. Основні методи подано у вигляді схеми.
2. Досліджено технології та інструменти CAD та BIM моделювання а також сучасні технології збору вихідних даних для моделювання.
3. Проаналізовано інструменти тривимірного моделювання. Найбільше під задані критерії підпадають AutoCAD, Archicad, Rhino, BricsCAD. Було прийнято рішення моделювати в AutoCAD чи Revit. Порівняння інструментів подано у вигляді таблиці.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Виконала</i>	<i>Бахмач А.Ю.</i>				Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Консульт.</i>							33	122
<i>Керівник</i>	<i>Горковчук Ю.В.</i>					КНУБА, ГІСУТ, ГСТм-23		
<i>Зав.каф.</i>	<i>Карпінський Ю.О.</i>							

2.1 Інституційні засади тривимірного моделювання мостів

Наразі в Україні існує кілька нормативно-правових актів, що регулюють проектування, будівництво та експлуатацію мостів:

- 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".

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) має такі стандарти щодо будівництва мостів:

- ISO 6446:1994. Гумові вироби. Підшипники мостів. Технічні умови на гумові матеріали
- ISO 6819:2023. Механічні вібрації та удари. Настанови щодо динамічних випробувань і досліджень мостів і віадуків
- ISO 18649:2004. Механічна вібрація — Оцінка результатів вимірювання динамічних випробувань і досліджень на мостах
- ISO 19203:2018. Гарячеоцинкований сталевий дріт високої міцності з цинк-алюмінієвим покриттям для мостових кабелів
- ISO 19427:2019. Сталеві канати. Попередньо виготовлені паралельні дротяні пасма для основного кабелю підвісного мосту.

Згідно з ДБН В.2.3-22:2009 мостом називають транспортну споруду, що забезпечує прохід через перешкоди для потоків рейкового та автомобільного транспорту, а також для пішоходів і різних комунікацій.

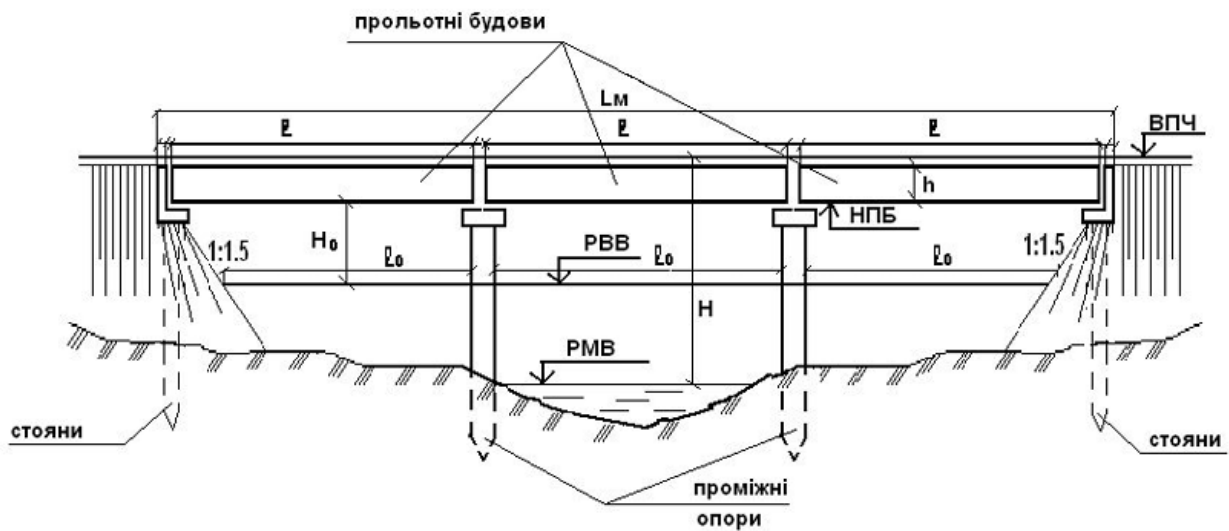


Рис.2.1. Загальне креслення мосту

Мости можна класифікувати за різними критеріями, що дозволяє систематизувати їхні конструктивні та функціональні особливості (див.рис.2.2.).

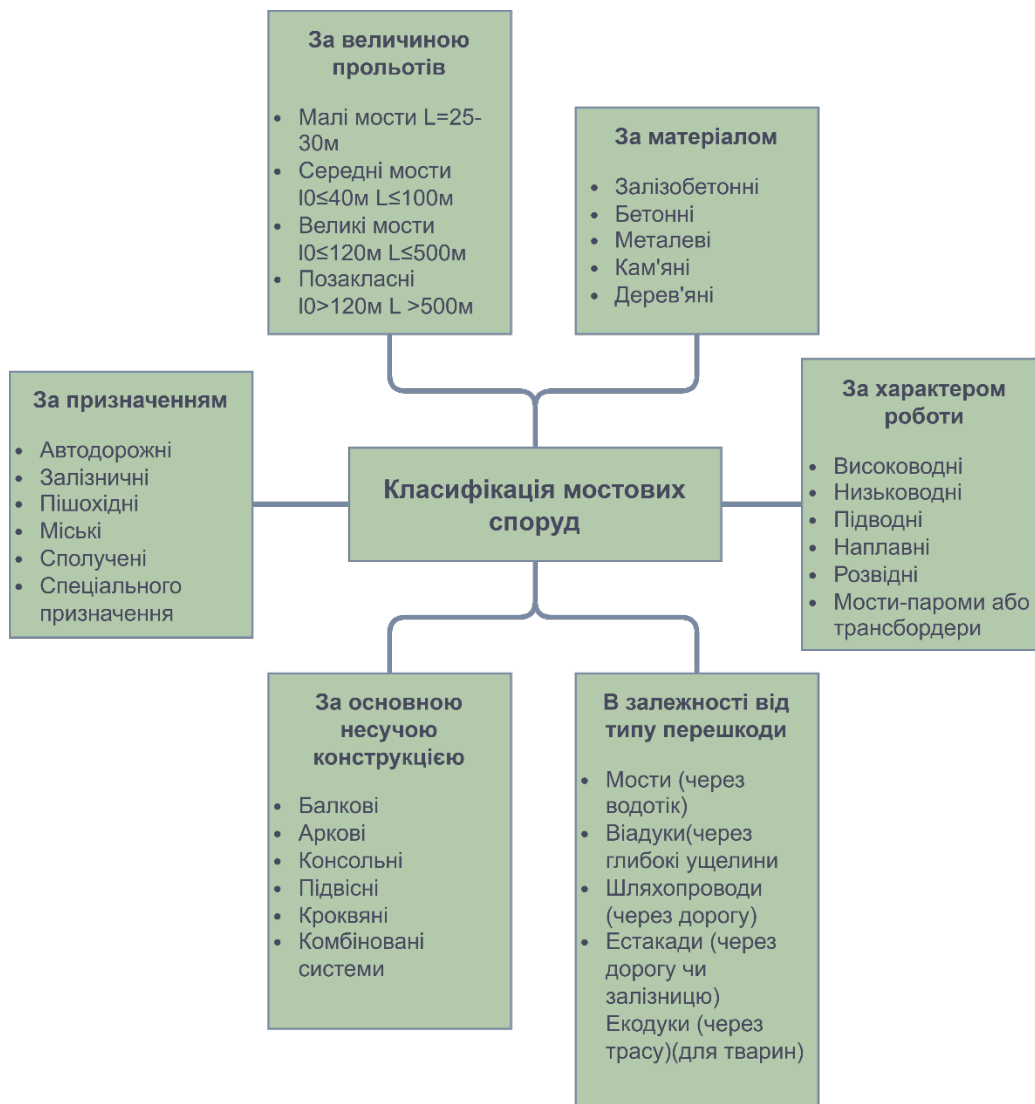


Рис.2.2. Класифікація мостових споруд

В рамках роботи головним ознакою класифікації є тип основної несучої конструкції, від якого залежить точність та складність проектування, будівництва і моделювання мостової споруди. По статичній схемі основної несучої конструкції мостові споруди можна поділити на декілька типів:

- **Аркові мости** – містять арки, що спираються на основи з обох кінців, забезпечуючи ефективне розподілення навантажень. Завдяки вигнутій формі, аркові мости підходять для перетинів через глибокі долини або каньйони.
- **Балкові мости** – найпоширеніший тип, у якому основну несучу функцію виконують горизонтальні балки, що спираються на опори з обох боків. Вони прості у будівництві та підходять для невеликих і середніх прольотів.
- **Консольні мости** складаються з консольних елементів, що виступають з опор у бік центру прольоту. Це дозволяє ефективно перекивати середні й великі відстані над річками чи каньйонами. Така конструкція підходить для місць, де важко розташувати багато опор.
- **Підвісні мости** використовують пілони з основними тросами, що підтримують конструкцію, тоді як менші вертикальні підвіски утримують дорожнє полотно. Така конструкція дозволяє перекивати дуже довгі прольоти.
- **Вантові мости** мають високу центральну опору (пілон), до якої кріпляться натягнуті троси (ванти), що утримують настил. Це дозволяє перекивати великі відстані з мінімальним числом опор. Такі конструкції часто використовують для великих прольотів в умовах складного рельєфу або в густонаселених районах, де потрібно забезпечити широкий простір без перешкод.
- **Підвісно-арочні мости** поєднують риси арочної та підвісної конструкцій. Вони використовують горизонтальну тягу з обох боків, як у традиційних арочних мостах, але арка розташовується над дорожнім полотном, а підтримувальні вертикальні троси опускаються вниз до настилу для додаткової стійкості. Такі мости називають "тятивними" через схожість з луком, де натяг вертикальних тросів і стиснення арки забезпечують стабільність і витримують навантаження.

- **Кроквяні мости** мають кроквяну конструкцію, що нагадує трикутники, з'єднані між собою, що робить міст легким і жорстким одночасно. Це дозволяє будувати конструкції для залізниць або важкої техніки. В Україні такі мости часто використовують у залізничному будівництві для підвищеної надійності.



Рис.2.2. Типи мостів за основною несучою конструкцією

У чинних нормативних документах відсутні конкретні вимоги щодо точності, з якою повинні моделюватися мости. Проте, можна приблизно розрахувати цю точність орієнтуючись на точність геодезичних робіт. За основу обчислень точності взята методика зі статті [22]. В ній виконувалось обчислення точності геодезичних робіт за допомогою теорії розмірних ланцюгів.

$$\Delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}, \quad (2.1)$$

Де Δ_T — загальний допуск кінцевого параметра,

Δ_i — допуск кожного з елементів у розмірному ланцюгу,

n — кількість елементів у ланцюгу.

Для розрахунку точності були вибрані середні розміри для кожного з типу мостів. Допуски на довжину, висоту, ширину та відстань між опорами були взяті з ДБН В.1.2-15:2009 "Мости та труби. Навантаження і впливи" та ДБН В.2.3-14:2006 "Мости та труби. Правила проектування". Відповідно формула для обрахунку таблиці 2.1 матиме такий вигляд:

$$\Delta_T = \sqrt{(\Delta_L)^2 + (\Delta_H)^2 + (\Delta_O)^2 + (\Delta_S)^2} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1.

Точність моделювання мостів за основною несучою конструкцією

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 Δ_T , 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

Сучасні лазерні сканери залежно від моделі та відстані мають різний рівень точності вимірювання. Серед найпопулярніших моделей на даний момент, Leica BLK360 має похибку близько ± 20 мм, тоді як FARO Focus 3D чи Leica RTC360 забезпечують точність $\pm 1-2$ мм на коротких і середніх відстанях (до 50 м). Відповідно на дальніх відстанях (більше 100 м) похибка буде пропорційно збільшуватися. Також на точність сканування може впливати матеріал об'єкта, зокрема його здатність відбивати або поглинати лазерний промінь. Таким чином металеві поверхні чи поверхні покриті іржею можуть підвищити похибку сканування до $\pm 7-10$ мм.

Для виявлення тріщин та пошкоджень, що потенційно загрожують безпеці конструкції, необхідно сканування з точністю $\pm 3-5$ мм. При цьому важливо забезпечити силове навантаження на конструкцію, оскільки це дозволяє виявити приховані дефекти, які можуть проявитися лише під дією додаткових навантажень.

Отже балкові, консольні та кроквяні мости мають бути змодельовані з точністю в 1 см, аркові та вантові – 1,5 см, підвісні та підвісно-арочні – 2 см.

На сьогоднішній день, в Україні немає повністю сформованої нормативної бази для BIM чи CAD, проте є різні концепції впровадження, а також можуть діяти міжнародні стандарти. Серед них:

- 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). Управління інформацією за допомогою інформаційного моделювання будівель. Частина 1. Поняття та принципи
- 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). Управління інформацією з використанням інформаційного моделювання будівель. Частина 2. Фаза доставки активів
- ДСТУ CEN/TS 17623:2022 (CEN/TS 17623:2021, IDT) Властивості BIM для освітлення. Світильники та датчики
- ДСТУ EN ISO 22057:2022 (EN ISO 22057:2022, IDT; ISO 22057:2022, IDT) Екологічність у будівництві та цивільних інженерних спорудах. Шаблони даних для використання екологічних декларацій про продукцію (EPD) для будівельних виробів у інформаційному моделюванні 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.

Відповідно до цих стандартів, можна навести основні вимоги до CAD/BIM-моделей.(див. рис.2.3.)

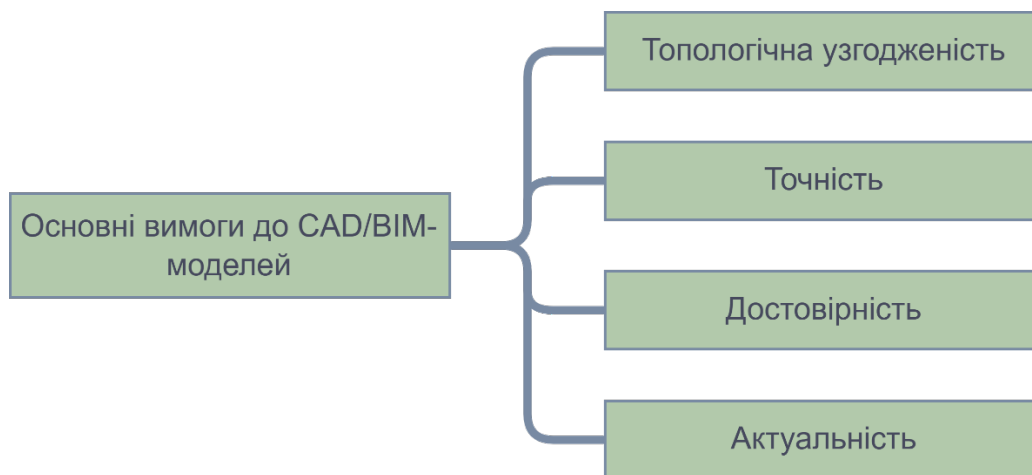


Рис.2.3. Основні вимоги до CAD/BIM-моделей

2.2. Досвід впровадження тривимірного моделювання для моделювання мостових споруд

Тривимірне моделювання мостів за результатами наземного лазерного сканування є ефективним методом для точного відтворення конструкцій, що дозволяє підвищити якість проектування, контролю та обслуговування.

Основні способи моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування можна умовно поділити на три категорії (див.рис.2.10)

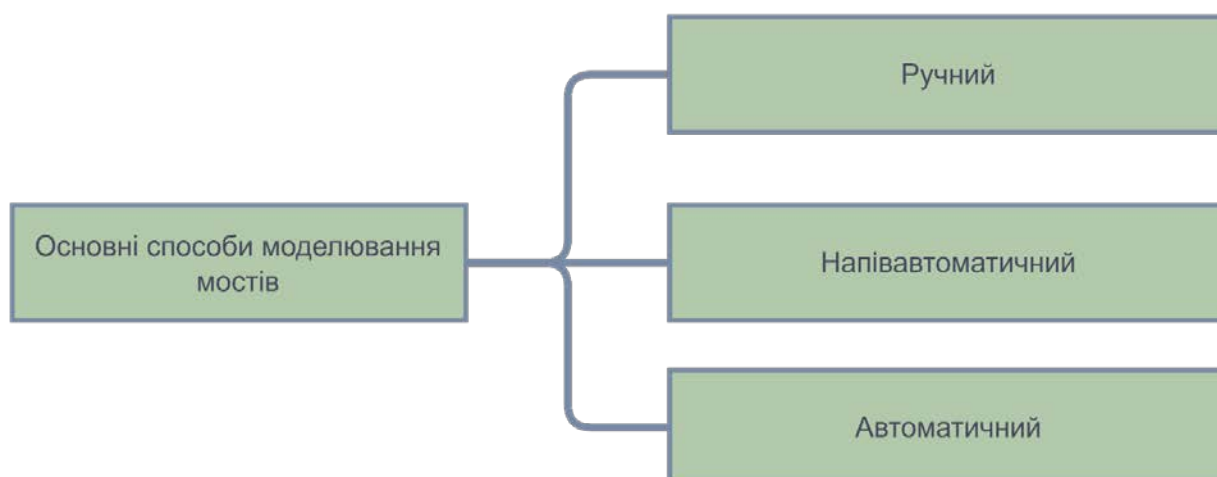


Рис.2.4. Основні способи моделювання мостових споруд

Прикладом ручного способу моделювання є модель середньовічного мосту Azzone Visconte, створена авторами статті [23]. Дослідження було проведене для моніторингу стану споруди. Воно проходило в кілька етапів:

- Щоб отримати детальну хмару точок мосту, 77 сканувань мосту за допомогою Faro Focus 3D для створення хмари точок з 2,5 мільярда точок. Реєстрація сканів виконувалась із точністю ± 3 мм завдяки геодезичній мережі.
- Зібрано понад 500 фотографій для створення ортофото фасадів і арок мосту.
- Для контролю вертикальних переміщень мосту під час тестування навантаженням було проведено геометричне нівелювання, з точністю до ± 0.005 мм
- Зібрану хмару точок було класифіковано на окремі структурні елементи мосту, такі як арки, колони, склепіння та поверхня дороги.
- Враховуючи складну геометрію середньовічної споруди, стандартні бібліотеки BIM не могли забезпечити належного рівня деталізації. Тому використовували математичну модель NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) для збереження точності складних елементів мосту, таких як арки та виступи.
- В Autodesk Revit інтегрували об'єкти NURBS, що дозволило зберегти реалістичні форми елементів конструкції. Всі параметричні об'єкти структурували в інформаційну базу BIM з атрибутами матеріалів, історичних даних та результатів випробувань.
- Дані організували в хмарному репозиторії Autodesk A360 Team, що забезпечило віддалений доступ для фахівців і спільну роботу над проектом.

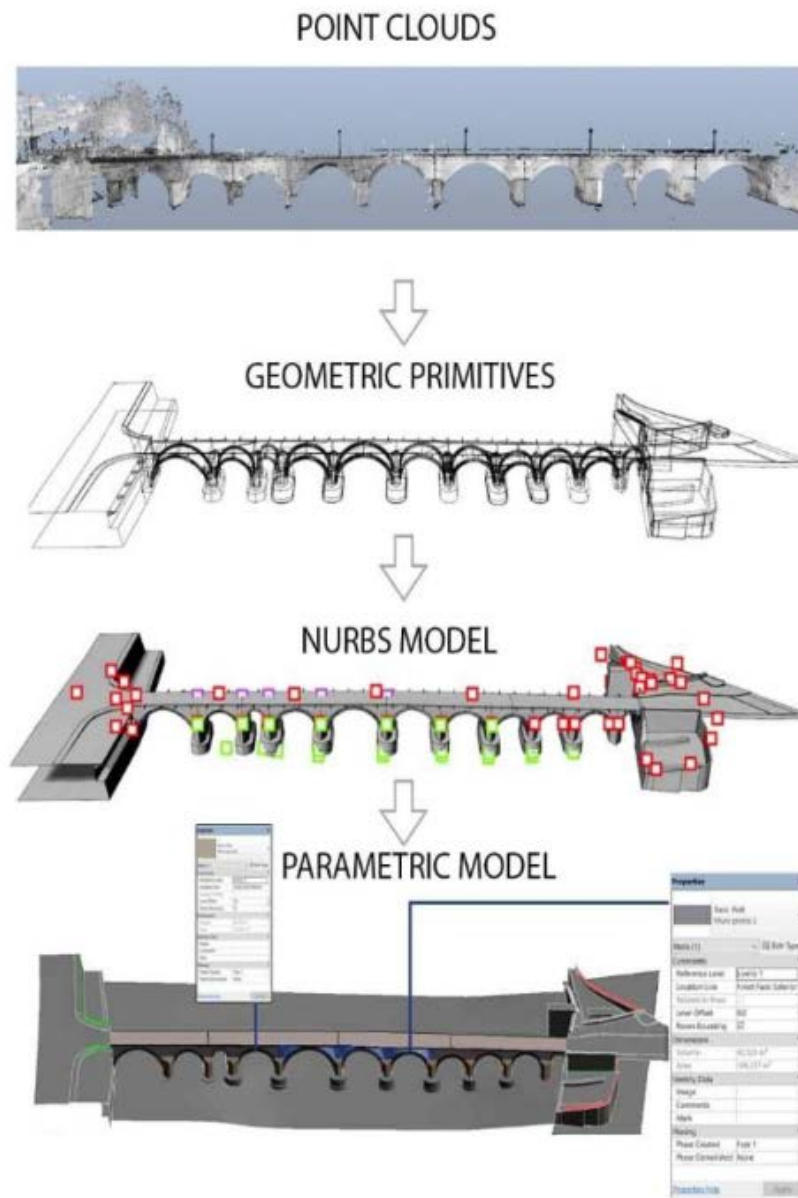


Рис.2.5. BIM-модель середньовічного мосту Azzone Visconte (Лекко, Італія), створений на основі лазерного сканування та цифрових зображень [23]

Загалом цей підхід забезпечує надійне рішення для моніторингу та збереження історичних споруд, хоча потребує значних інвестицій у ресурси і кваліфікованих фахівців для його реалізації.

У статті [24] був представлений схожий, проте не менш цікавий приклад ручного моделювання мосту. Міст був змодельований за таким алгоритмом:

- Спочатку були закладені точки полігонометричного ходу для прив'язки скануючого обладнання до потрібної системи координат.
- Було проведене лазерне сканування за допомогою Trimble SX10 TLS.

- Для зменшення шумів виділення необхідних елементів мосту хмара точок була оброблена за допомогою програмного забезпечення Trimble® RealWorks.
- Ручним способом виконувалось моделювання мосту у форматі CAD у програмі SketchUp. Для вдосконалення моделі її було імпортовано в Autodesk Revit, де було додано сімейства для кожного елемента відповідно до критеріїв.
- Для отримання топографії місцевості навколо мосту використовувалися дрони з високою роздільною здатністю з підтримкою RTK. Дані з дронів інтегрували з даними зі сканування через Pix4Dmapper.
- У програмі ABAQUS було використано модель Concrete Damage Plasticity Model (CDPM) для аналізу міцності бетону, що відображає тріщини та стиск під навантаженням. Динамічний аналіз визначив власні частоти та демпфування конструкції.

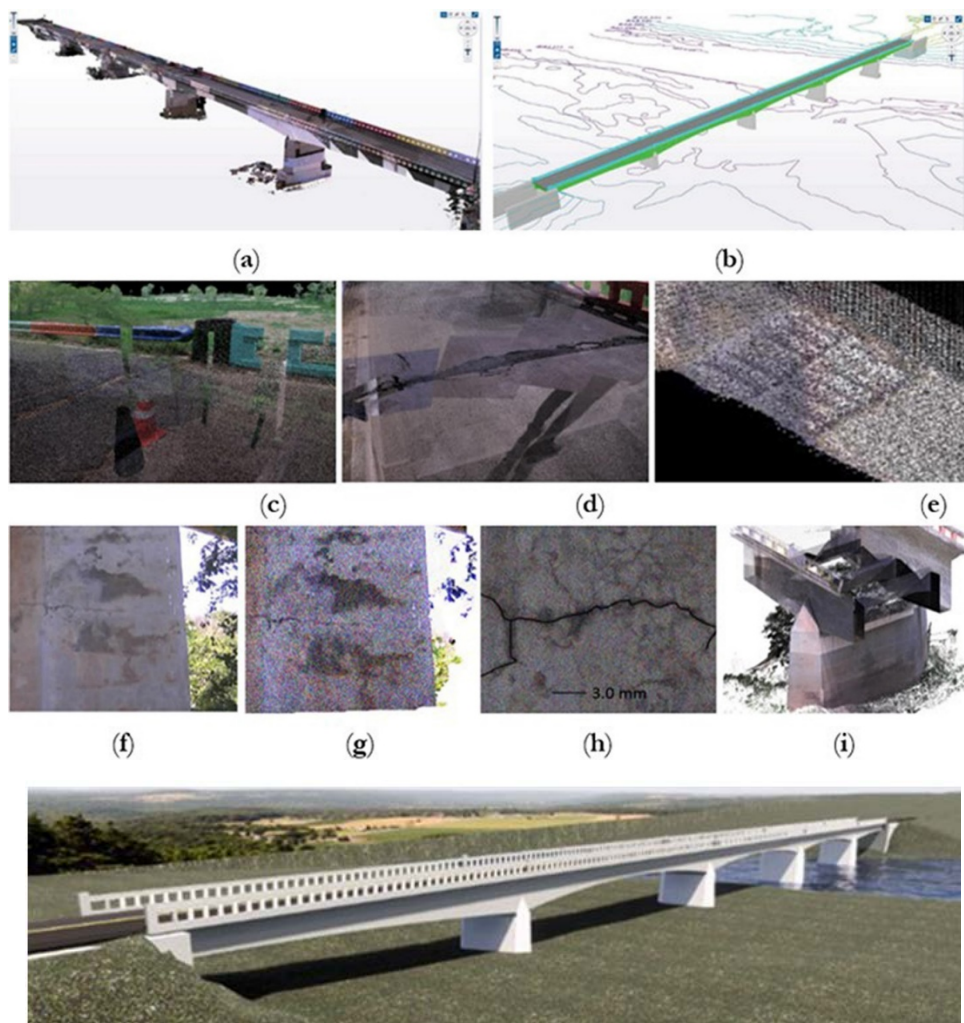


Рис.2.6. Результати моделювання [24]

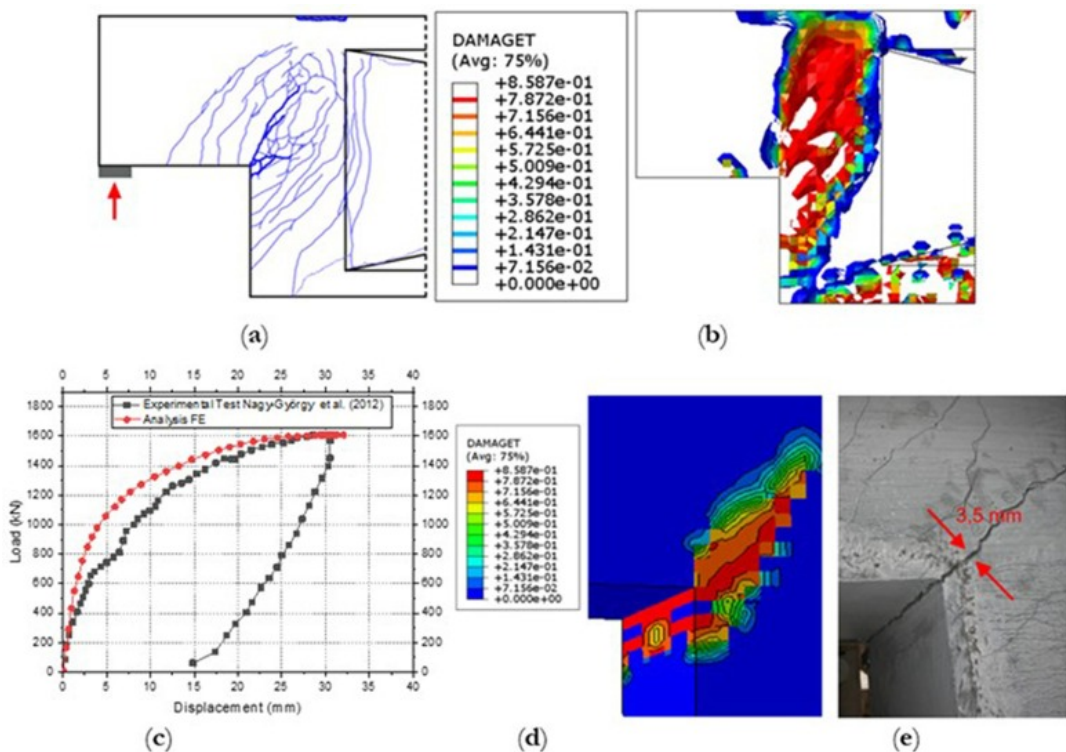


Рис.2.7. Порівняння експериментальний та числових результатів[24]

Цей метод виявився ефективним для моделювання мостових споруд. Незважаючи на високу вартість, результати дослідження дозволили виявити зони потенційних деформацій і пошкоджень, що значно полегшує планування майбутніх робіт з реконструкції та технічного обслуговування.

Автори статті [25] розглянули процес Scan2BIM для автоматизованого створення геометрично-семантичних моделей існуючих мостів. Він виконувався у декілька етапів:

- За допомогою методів лазерного сканування та фотограмметрії (фото з дронів) було створено модель (хмару точок) мостової споруди.
- Використовуючи методи зниження шуму (denoising) та вокселізації (для зменшення кількості точок), було очищено хмару від шумів. Також було виконане вирівнювання осей та видалення зайвих точок.
- Щоб спростити подальше моделювання, хмару точок було класифіковано. Для розпізнавання різних частин мосту на хмарі таких як колони, балки та плити, використовувались методи штучного інтелекту (класичні алгоритми та PointNet або 3D CNN).

- За допомогою методів головних компонентів (PCA), Nough-трансформації та RANSAC були визначені та параметризовані геометричні особливості мосту (профілі балок, опор та інші).
- Отримані дані про профілі, були імпортовані до середовища візуального програмування Dynamo Autodesk, де було створено параметричну BIM модель, використовуючи семантики, наданої програмним забезпеченням.

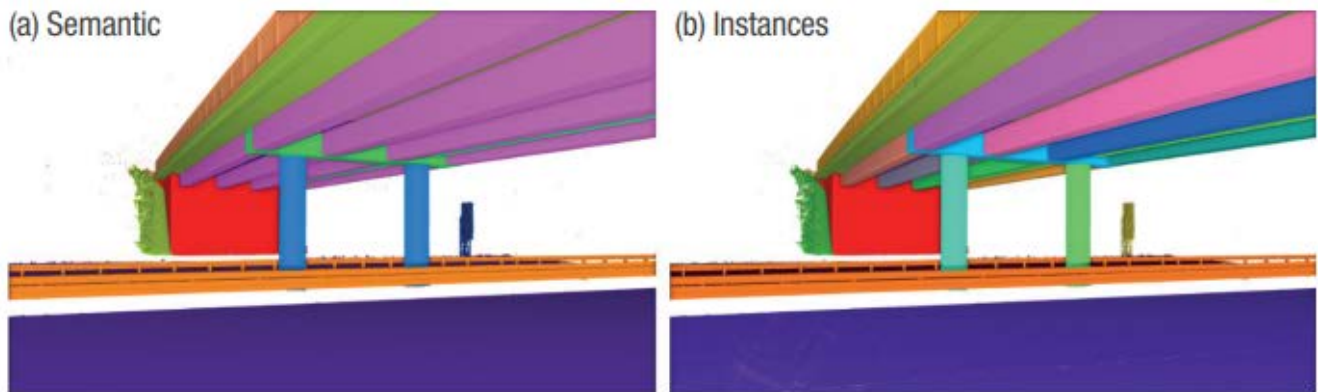


Рис.2.8. Візуалізація хмар точок із семантичною та екземплярною сегментацією

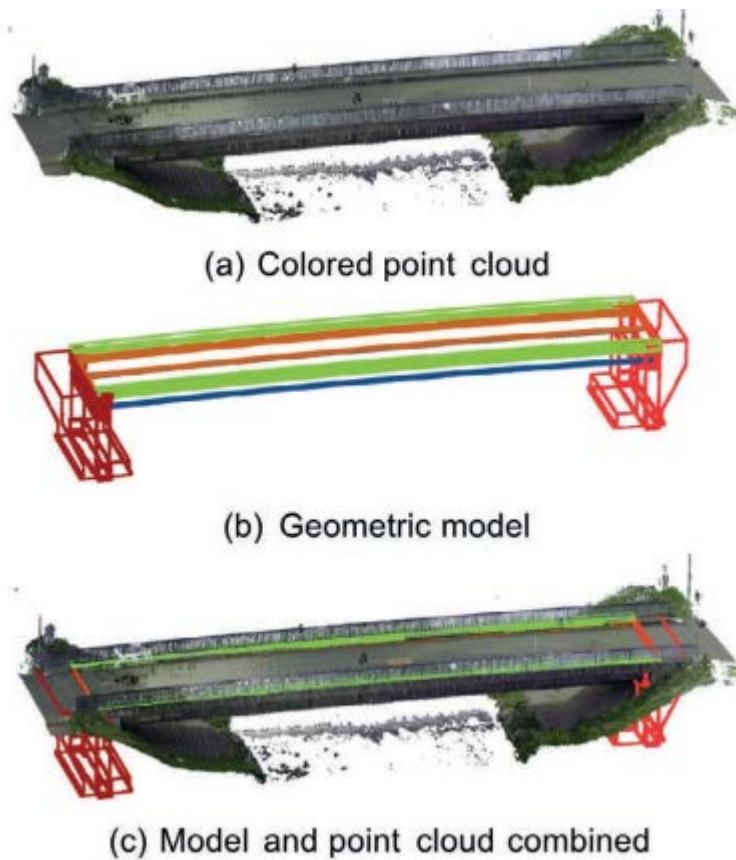


Рис.2.9. Результати моделювання

Scan2BIM хоч і дозволяє частково автоматизувати процес, проте все одно потребує втручання в створенні складних профілів, для уточнення деталей та коректного оформлення моделі. Також автоматична класифікація може займати багато часу, і мости простої конструкції буде швидше зробити вручну без класифікованої хмари.

Варто зазначити, що повна автоматизація CAD/BIM моделювання на сьогоднішній день залишається недосяжною. Хоча можна створити полігональну модель з хмари точок, така модель в основному призначена для візуалізації і не є достатньо точною для подальшого використання в інженерному проектуванні або аналізі.

Також варто зазначити, що всі розглянуті тут приклади моделювання мостових споруд по суті мають однаковий алгоритм: геодезичне та фотограмметричне знімання, обробка результатів, моделювання. Єдина відмінність між ними саме в інструментах моделювання.

В процесі дослідження були визначення основні цілі використання тривимірних моделей мостів. (див. рис. 2.9)

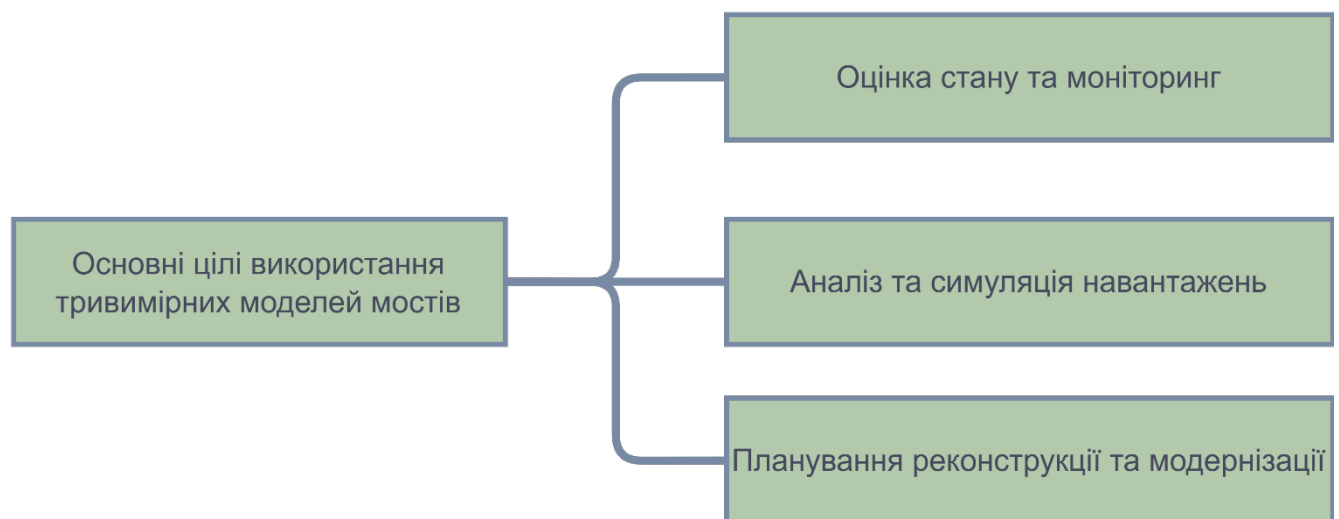


Рис.2.10. Основні цілі використання тривимірних моделей мостів

Однією з основних цілей є оцінка стану та моніторинг мостових споруд. Отримані CAD/BIM моделі, створені на основі даних лазерного сканування та фотограмметрії, дозволяють регулярно оновлювати інформацію про стан конструкцій. Це, в свою чергу, дає можливість виявляти мікротріщини, корозію,

зсуви та інші структурні деформації. Таким чином можна визначити зони, які потребують термінової уваги.

Аналіз та симуляція навантажень є не менш важливими етапами в оцінці безпеки мостових конструкцій. Готову модель експортують до спеціалізованого програмного забезпечення для чисельного аналізу. З використанням таких методів, як метод скінченних елементів, можна оцінювати, як конструкція реагуватиме на різні типи навантажень, включаючи рух транспорту, погодні впливи, сейсмічну активність та інші зовнішні фактори. Це дозволяє прогнозувати можливі проблеми та розробляти ефективні заходи для зміцнення конструкції.

Крім того, 3D-моделі відіграють важливу роль у підготовці до реконструкції та модернізації мостів, адже вони точно відображають поточний стан споруди. На основі цих даних можна симулювати різні сценарії реконструкції, оцінювати вплив змін на експлуатаційні характеристики та обирати оптимальні матеріали й технології для реалізації проєктів. Завдяки цьому процес реконструкції стає більш передбачуваним і ефективним, що сприяє підвищенню безпеки та надійності мостових споруд.

Висновки до розділу 2

1. На основі діючих нормативно-правових актів наведено різні класифікації мостових споруд, серед яких в рамках роботи важливою є класифікація за основною несучою конструкцією.
2. Точність тривимірного моделювання мостових споруд ґрунтується на вимогах до точності геодезичних робіт та точності проектування та складає для балкових, консольних та кроквяних – 1 см, для аркових та вантових – 1,5 см, для підвісних та підвісно-арочних – 2 см.
3. Окрім точності, обов'язковими вимогами до моделювання є достовірність, актуальність та часткова топологічна узгодженість.
4. Усі наведені приклади моделювання базуються на схожому алгоритмі, єдина різниця між ними саме в інструментах моделювання.
5. 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.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Виконала</i>		<i>Бахмач А.Ю.</i>			Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Консульт.</i>						49	122	
<i>Керівник</i>		<i>Горковчук Ю.В.</i>				КНУБА, ГІСУТ, ГСТМ-23		
<i>Зав.каф.</i>		<i>Карпінський Ю.О.</i>						

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

Залежно від мети використання тривимірної моделі мостової споруди, підхід до її створення може відрізнятися. Якщо модель потрібна лише для візуалізації чи презентації проекту, деякі елементи можна змодельовати менш детально, оскільки вони не впливатимуть на технічний аналіз. Водночас, для проведення розрахунків або аналізу стану конструкцій, необхідно забезпечити високий рівень деталізації. Різні завдання вимагають різних типів моделей: каркасні — для аналізу геометрії, поверхневі — для візуалізації, твердотільні — для розрахунків. BIM-моделі інтегрують дані про матеріали та експлуатацію, що корисно для комплексного управління проектами. CAD-моделі більше підходять для точного геометричного моделювання без додаткових атрибутів.

Для оцінки стану та моніторингу мостової споруди достатньо мати високоточну CAD-модель. Така модель дозволить виявити можливі зміни в конструкції за допомогою точно змодельованої конструкції з мінімальними відхиленнями. Оскільки для виконання такої задачі не потрібні дані про матеріали та внутрішню структуру, модель потрібно створити в LOD250 чи в LOD200 (за умови простої конструкції, напр. балкової). Деякі другорядні елементи, такі як огорожі чи оздоблення, можна не моделювати, адже вони мало впливають на оцінку технічного стану. Якщо споруда деформована краще все ж їх змодельовати, адже їхній стан також може свідчити про незначні зміни в конструкції.

Для аналізу та симуляції навантажень бажано мати BIM-модель, адже вона може містити в собі всю необхідну інформацію про матеріали, з'єднання, навантаження та фізичні властивості елементів. Для такої задачі, модель має бути в LOD250 чи навіть в LOD300. Також може підійти і CAD-модель, але їй буде необхідне додаткове наповнення даними про матеріали та умови навантажень.

Для планування реконструкції та модернізації обов'язково потрібно мати BIM-модель, яка забезпечить інтеграцію всіх даних проекту та дозволить ефективно управляти життєвим циклом об'єкта. Така модель дозволяє детально

спланувати всі етапи реконструкції, враховуючи взаємодію різних елементів конструкції, матеріалів та технологій.

Алгоритм моделювання в CAD та BIM відрізняється лише інструментами моделювання та певними технічними особливостями. Його можна поділити на 3 етапи:

- Підготовка даних.
- Моделювання.
- Перевірка та корекція моделі.

Дані для моделювання мають відповідати вимогам точності моделювання для конкретної мостової споруди. Якщо хмара все ж не відповідає вимогам, її можна обробити в спеціальному ПЗ напр. в CloudCompare, адже він має багато плагінів та інструментів, які можуть покращити якість хмари. За умови дублювання хмари допоможе лише перереєстрація станцій сканування (сканів).

В CAD моделювання відбувається за допомогою використання геометричних примітивів, тіл створених з лінійних чи площинних об'єктів, булевих операцій, функцій редагування твердих тіл тощо. Саме через наявність великої кількості інструментів та легкістю їх використання, в CAD просто та відносно швидко можна створити реальні деформовані чи пошкоджені конструкції, а також ті, що мають складну форму.

BIM-програми, такі як Revit, пропонують широкий набір інструментів, які дозволяють створювати (проектувати) складні форми. Однак вони значно менш гнучкі порівняно з можливостями, які надає AutoCAD, що ускладнює моделювання реальних об'єктів за хмарою. Одним із інструментів, яким все ж можна створювати реальні форми є Mass (Маси). Маси схожі на функції в AutoCAD, такі як Sweep, Loft або Extrude та дозволяють створювати елементи з примітивними чи складними формами, які потім в теорії (при проектуванні це працює, а на реальних конструкціях, через їхню кривизну тощо, нажаль ні) можна перетворити на конкретні категорії, такі як балки, стіни та колони.

Коли конструкція мосту має форму, яку важко показати з потрібною точністю в BIM

Часто, для деяких задач, напр. візуалізації потрібна цифрова модель рельєфу(ЦМР), яка також може допомогти в точному визначенні навантажень, що передаються через опори. В САД її створити можна в автоматичному режимі в Civil3D. Для створення потрібно створити орографічні лінії з 3D поліліній, прив'язаних до хмари, для коректного зображення країв схилів, насипів тощо. Також у зв'язку з тим, що це ПЗ погано відокремлює землю всього іншого на хмарі, а також у створенні використовує кожен точку з хмари (тому це займає багато часу), потрібно створити окрему хмару для землі в іншому ПЗ (напр. в CloudCompare). В BIM для створення рельєфу можна використовувати той же метод, або використати сторонні плагіни (напр. Environment for Revit).

Перевірити правильність моделі та відхилення від хмари можна в Navisworks Manage шляхом візуального огляду та секційних зрізів. За допомогою Clash Detective потрібно виявити недопустимі накладання між елементами. Виявлені помилки та колізії потрібно зберегти як Viewport чи оформити звіт. Також потрібно перевірити коректність шарів, наявність пустих шарів чи коректність сімейств. Після виправлення проекту, потрібно повторно перевірити модель.

Для представлення методики створення моделей використовуватиметься блок-схема, що демонструє ключові етапи процесу.(див.рис.3.1.)

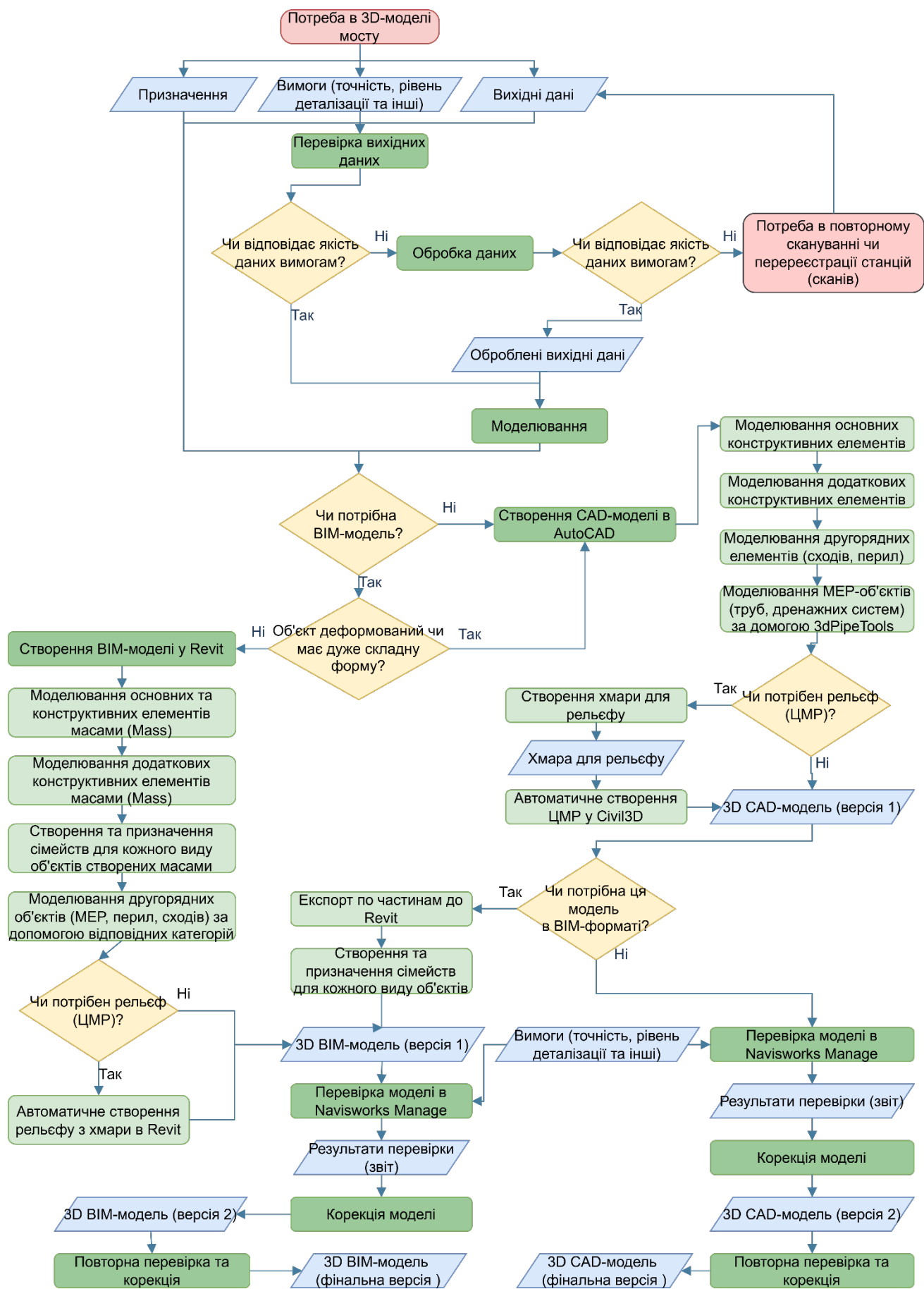


Рис.3.1. Методика моделювання мостових споруд у вигляді блок-схеми

3.2. Оптимізація методів класифікації елементів мостової конструкції

Класифікація — це процес розподілу об'єктів, елементів чи даних на групи або категорії за певними ознаками або властивостями. Класифікація елементів мостової конструкції є важливим етапом під час створення тривимірної моделі, оскільки вона забезпечує структурованість даних, сприяє ефективному управлінню інформацією та полегшує подальший аналіз і використання моделі. Правильна та чітка класифікація дає змогу:

- Спростувати моніторинг стану споруди завдяки поділу на категорії, такі як несучі конструкції, другорядні елементи, інженерні системи тощо.
- Покращувати точність розрахунків – кожен елемент може мати свої фізико-механічні характеристики, які впливають на аналіз міцності, деформацій і довговічності.

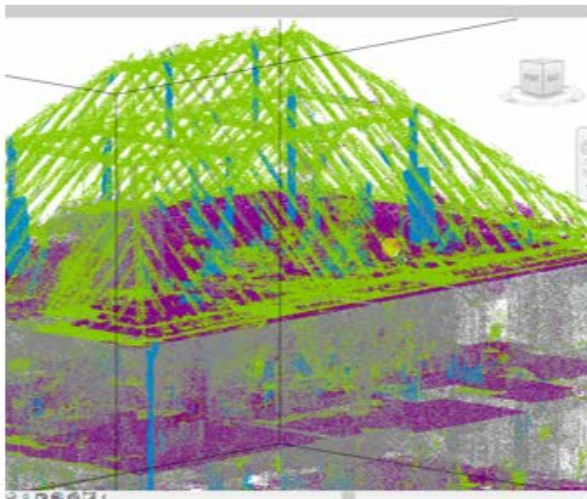
Класифікація елементів конструкції може здійснюватися:

- Вручну, коли фахівець вручну розподіляє елементи конструкції за певними ознаками, наприклад за їх функцією чи матеріалом.
- Автоматично, коли за допомогою алгоритмів, програмного забезпечення чи штучного інтелекту визначаються типи конструкцій.

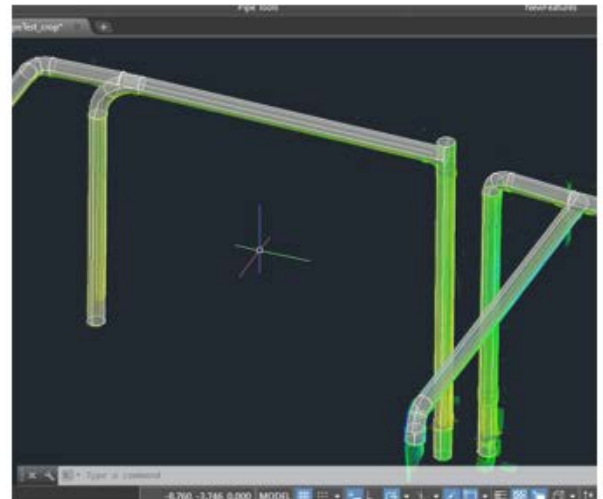
На сьогоднішній день, існує чимало плагінів автоматичного чи напівавтоматичного створення елементів з хмари, проте більшість з них оптимізовані на моделювання будівель. Серед тих, які можна використати в моделюванні мостових споруд є:

- Aurivus. Плагін для Revit на основі штучного інтелекту класифікує хмару точок та знаходить балки та колони з різних матеріалів, труби та їх з'єднання, стіни, підлоги, дахи та інші. А також він розподіляє ідентифіковані з хмари об'єкти по шарам, спрощуючи роботу з хмарою.
- Faro As-Built. Плагін для Revit та AutoCAD для автоматичного розпізнавання на хмарі та створення простих конструкцій (балок, колон, труб).

- 3D Pipe Tools. Плагін для AutoCAD для автоматичного моделювання труб (чи інших циліндричних об'єктів) по структурованій хмарі точок, або для напівавтоматичного по осям труб з неструктурованою хмарою. Також можна моделювати коліна труб підбираючи коефіцієнт закруглення та фланці (кожухи).



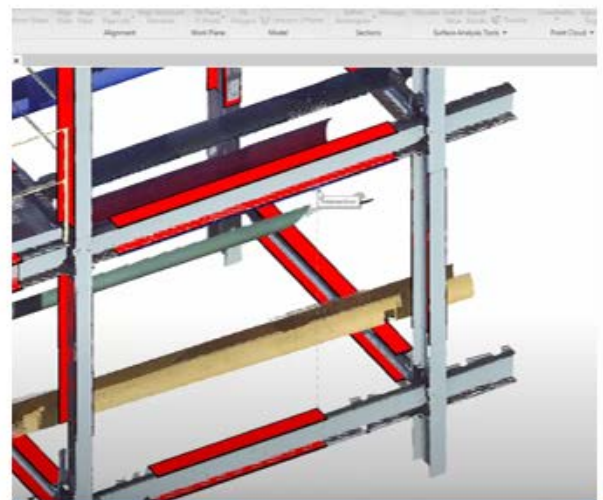
AURIVUS



3D PIPE TOOLS



FARO AS-BUILT FOR AUTOCAD



FARO AS-BUILT FOR REVIT

Рис.3.2. Плагіни, якими можна частково автоматизувати моделювання мостових споруд

AutoCAD елементи поділяють на окремі шари , забезпечуючи чіткий розподіл елементів за їхнім призначенням (наприклад, стіни, балки, опори). Такий підхід полегшує організацію даних і дає змогу точно моделювати кожен групу

окремо. Поділ на шари також допомагає уникати плутанини, коли в моделі використовується велика кількість різнорідних компонентів.

Таблиця 3.1.

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

У Revit немає концепції «шарів» у традиційному сенсі, як це реалізовано в AutoCAD або інших CAD-програмах. Натомість для структурування та організації елементів моделі застосовується система категорій, сімейств і фільтрів видимості, що забезпечує більш гнучке та структуроване управління.

Кожен елемент у Revit відноситься до певної категорії, наприклад, стіни, балки або покрівля. Ці категорії визначають загальний тип елемента та його роль у моделі. У межах кожної категорії елементи організовані в сімейства, які є параметричними об'єктами. Наприклад, у категорії стін можна виділити сімейства несучих і ненесучих стін залежно від їхніх конструктивних властивостей.

Система сімейств також дозволяє задавати індивідуальні параметри для кожного об'єкта, такі як матеріал, розміри чи конструктивні характеристики. Використання фільтрів видимості допомагає адаптувати відображення моделі до потреб користувача, наприклад, виділяти лише несучі елементи або приховувати другорядні об'єкти для зручності роботи

Таблиця 3.2.

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

Висновки до розділу 3

1. На основі досліджень, розглянутих в розділі 2, були розроблені методики моделювання мостових споруд в CAD та BIM за результатами лазерного сканування. Методика подана у вигляді блок-схеми. Встановлено оптимальні параметри для збирання даних, класифікації елементів мостової конструкції та їх подальшого моделювання в середовищах CAD і BIM. Запропонована технологічна схема моделювання забезпечує ефективне створення структурованих моделей із високою деталізацією, що відповідає сучасним вимогам точності й надійності.
2. Наведені способи автоматичної класифікації елементів конструкції мостових споруд а також переліки шарів, категорій та сімейств для структурування моделі.

РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Виконала</i>		<i>Бахмач А.Ю.</i>			Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Консульт.</i>						59	122	
<i>Керівник</i>		<i>Горковчук Ю.В.</i>				КНУБА, ГІСУТ, ГСТМ-23		
<i>Зав.каф.</i>		<i>Карпінський Ю.О.</i>						

4.1 Моделювання мостових споруд за даними наземного лазерного сканування

Для САD-моделювання було обрано хмару точок мосту Пфаффендорф у місті Кобленц (Німеччина) зокрема і через його унікальну історичну та архітектурну цінність. Це балковий міст через Рейн завдовжки 311,32 м із двома зовнішніми сталевими порожнистими балками. Опори з обох боків берега спираються на історичні частини попереднього мосту побудованого в 1869 році. З лівого берегу збереглися частини мостових веж, а з правого – крита кругла вежа та залізничний віадук (арки якого використовувались як складські приміщення і тому мають вікна та двері), які побудовані з блоків піщанику.

Оскільки наразі цей міст аварійний через загрозу обвалу над колишнім залізничним віадукком, потрібно створити тривимірну модель саме цієї частини для дослідження його стану та пошкоджень конструкції. Тому важливо показати точно всі несучі елементи конструкції нової частини та повністю всю конструкцію старої частини. Розміри цієї частини 160x13x15 м. З таблиці 2.1., такий тип мосту має бути змодельований з точністю до 1 см якщо це частина з балковим мостом та до 1,5 см – для віадуку (арковий міст).

В цьому випадку цифрова модель рельєфу потрібна лише для візуалізації, проте вона також може допомогти в точному визначенні навантажень, що передаються через опори.

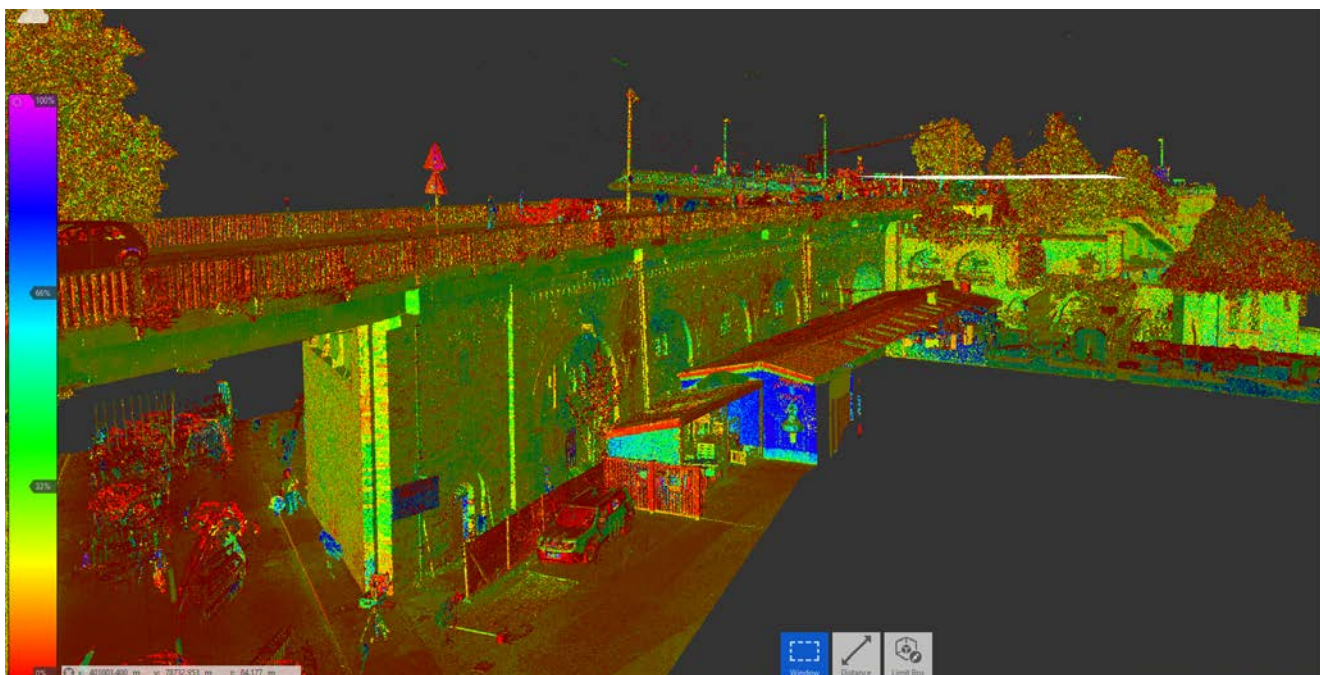


Рис.4.1. Хмара точок мосту Пфаффендорф у середовищі Resca

Модель була створена за алгоритмом наведеним на рис.3.1. Відповідно до нього, спочатку потрібно створити основні конструкції та вирізати в них отвори. Потім так само зробити із додатковими несучими конструкціями. Також потрібно створити шари за шаблоном наведеним в таблиці 3.1.

Beams						110
Ceilings						140
Columns						60
Decorative_elements						11
Drainage system						140
Floors						150
Ground						13...
Point_cloud						wh...
Railings						228
Road						9
Roof						12
Stairs						122
Steel_constructions						232
Walls						50

Рис.4.2. Перелік створених шарів в середовищі AutoCAD

Цей перелік шарів не містить усіх елементів, які були заплановані для моделювання, оскільки не кожен міст має всі перелічені компоненти конструкції.

Оскільки цей міст це по суті і будівля, було створено додаткові шари для даху (Roof), підлоги (Floors), стелі (Ceilings).

В процесі моделювання були використані чимало функцій, основними з яких були Extrude, Loft та Sweep. Кожна з цих команд дозволяє працювати з різними типами геометрії та створювати складні об'єкти в залежності від їх форми та розміру.

Extrude використовувалась для створення об'єктів з чітко визначеною формою, особливо для коротких елементів, що мають сталу форму по всій довжині.

Спочатку були створені 2D-конттури, наприклад, прямокутники або кола, після чого вони витягувались у тривимірний простір, що дозволяло отримати елементи з чітко визначеними розмірами по висоті чи ширині. Також ця команда використовувалась для вирізання частин об'єктів, наприклад, для створення отворів у стінах або для вирізання елементів з конструкцій. За допомогою цієї функції були створені балки, колони, декор та оператори (тіла для вирізання)

Loft використовувалась для моделювання складних криволінійних форм, де перерізи змінювались по висоті. За допомогою цієї команди створювались елементи, такі як арки або криві стіни, де між кількома профілями відбувався плавний перехід. Для цього спочатку були побудовані різні профілі на різних рівнях, а потім їх поєднували за допомогою Loft, що дозволяло отримати органічні форми з плавними лініями.

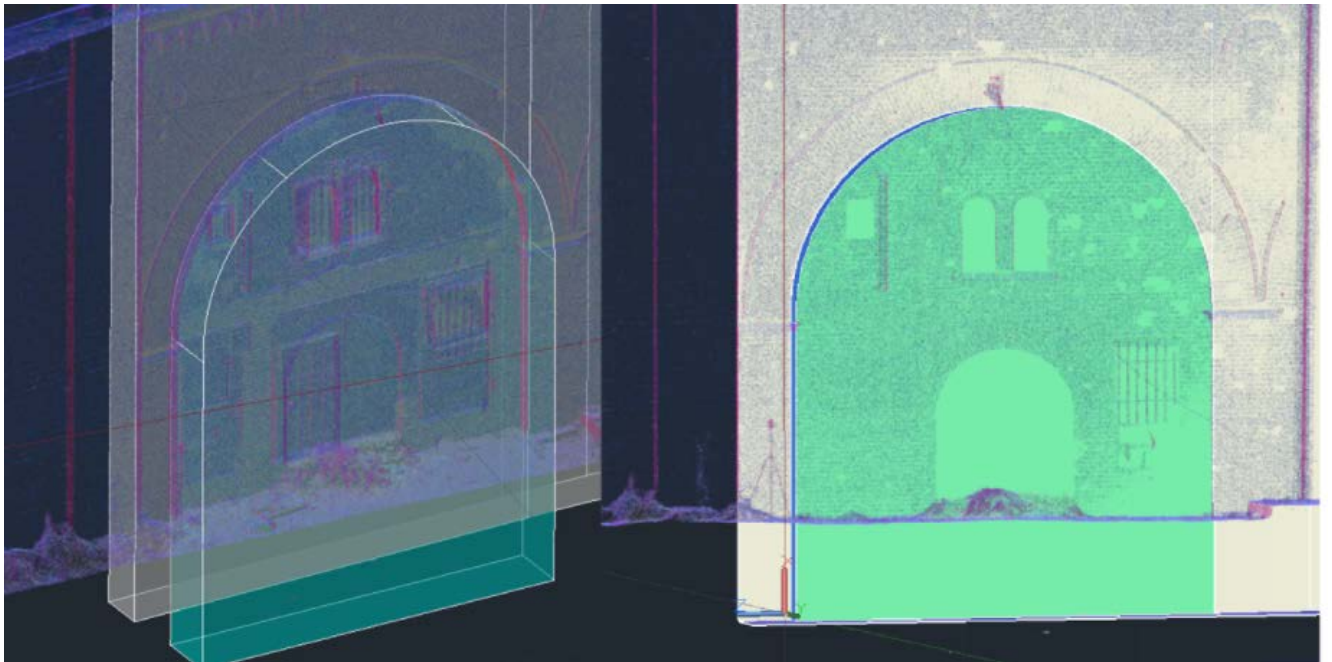


Рис.4.3. Процес моделювання стіни за допомогою Loft (для створення основної стіни) та Extrude(для оператора)із Subtract (для вирізання заглиблення в стіні оператором)

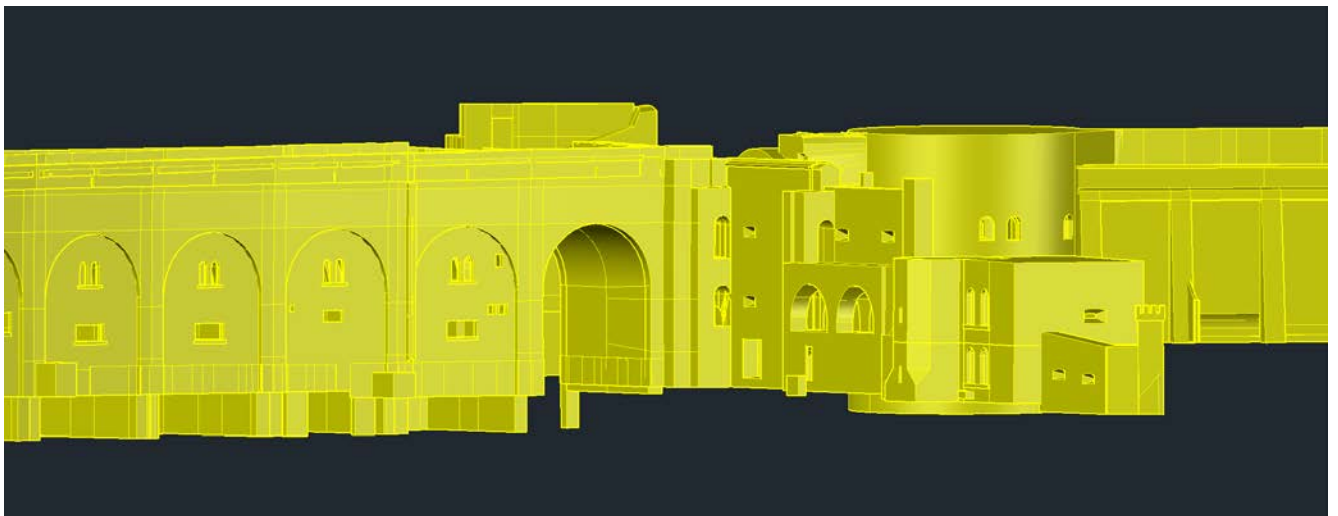


Рис.4.4. Результат моделювання стін в середовищі AutoCAD

Sweep використовувалась для створення довгих елементів з сталим перерізом, які рухались по заданій траєкторії. Ця команда була корисною для моделювання проїжджої частини та довгих балок. Також вона використовувалась для створення таких елементів як карнизи чи огорожі. Спочатку створювались 2D-конттури для визначення перерізу, а потім ці контури рухались по заздалегідь заданому шляху, утворюючи довгі елементи з рівномірним перерізом по всій довжині.

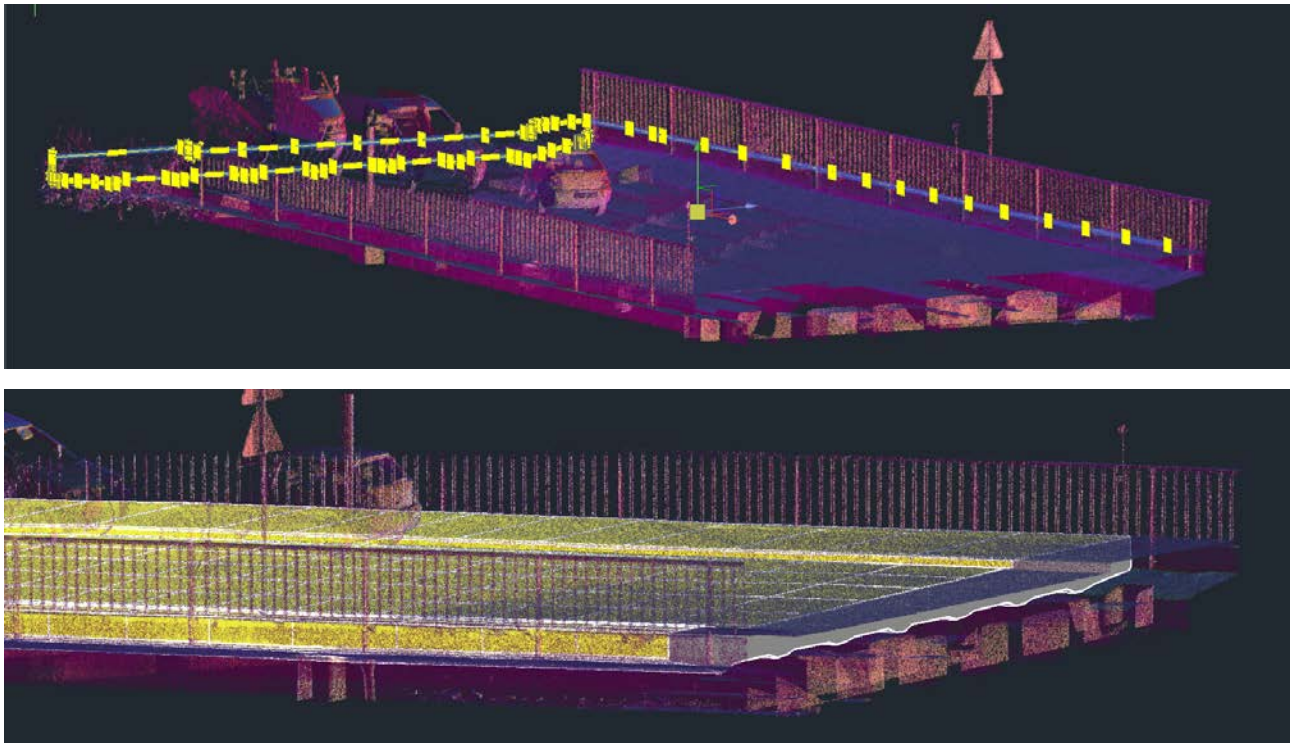


Рис.4.4. Процес моделювання проїжджої частини зв допомогою Sweep
 Сталеві конструкції моделювались за допомогою Extrude чи Sweep на основі розмірів реальних профілів. У випадку на рис.4.5. це двотавр НВВ220.

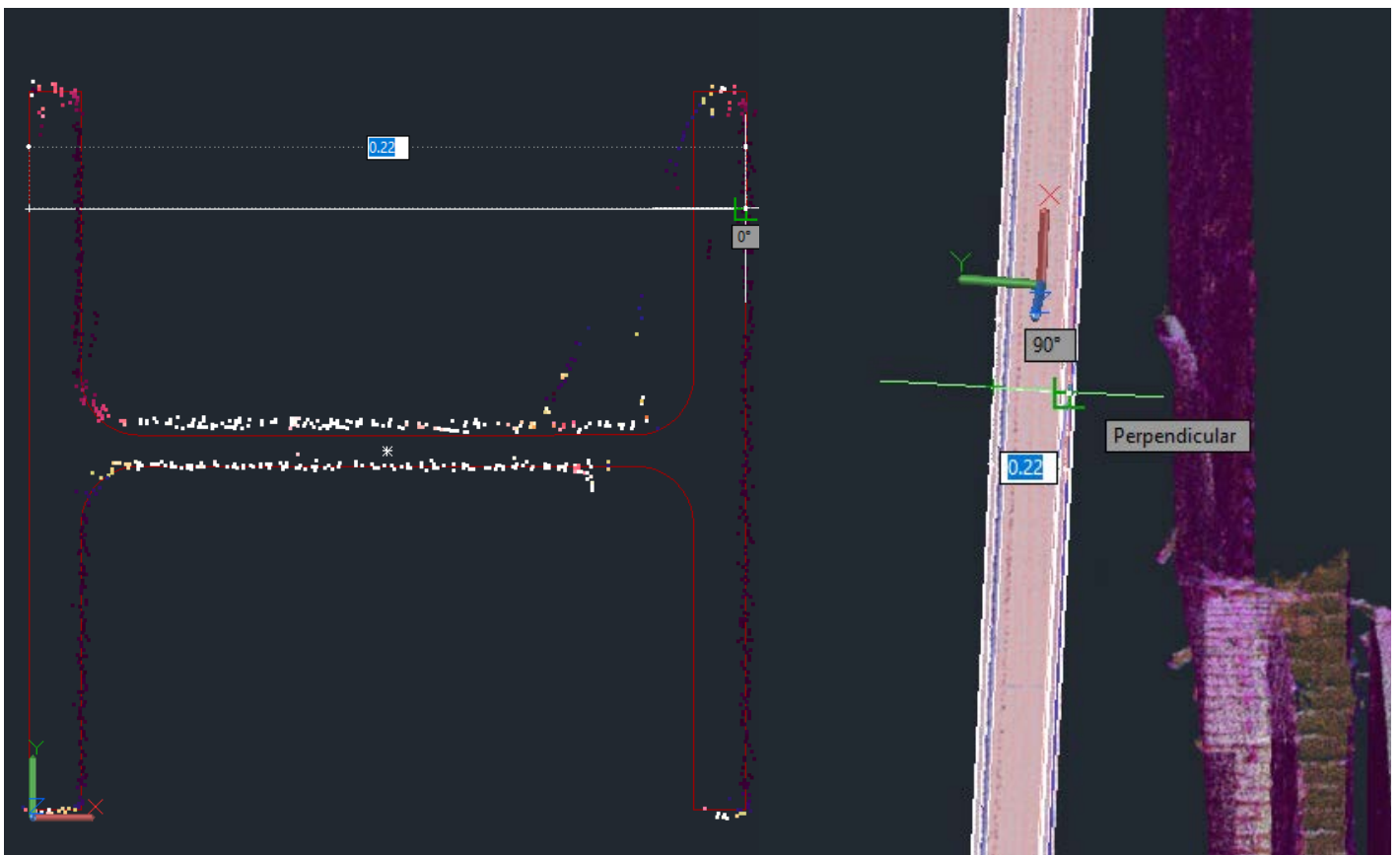


Рис.4.5.Профіль НВВ220 та сталева колона створена з нього

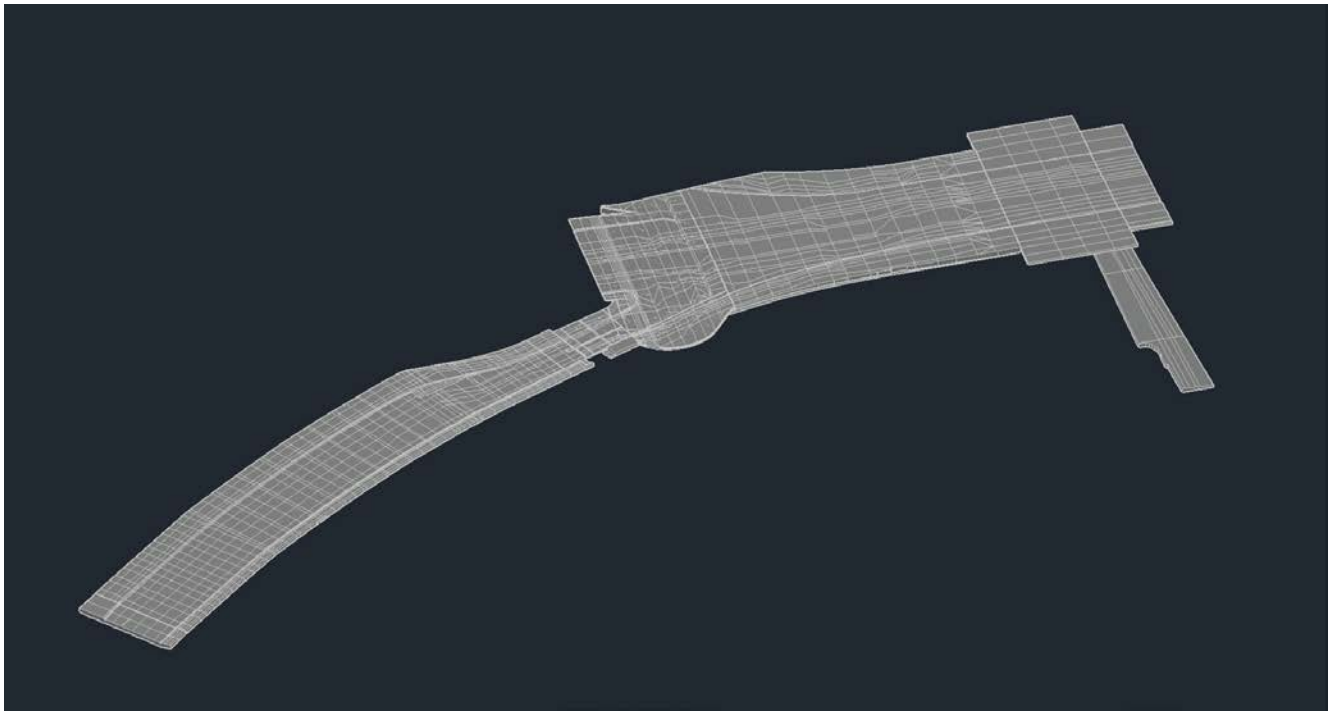


Рис.4.6.Результат моделювання проїжджої частини

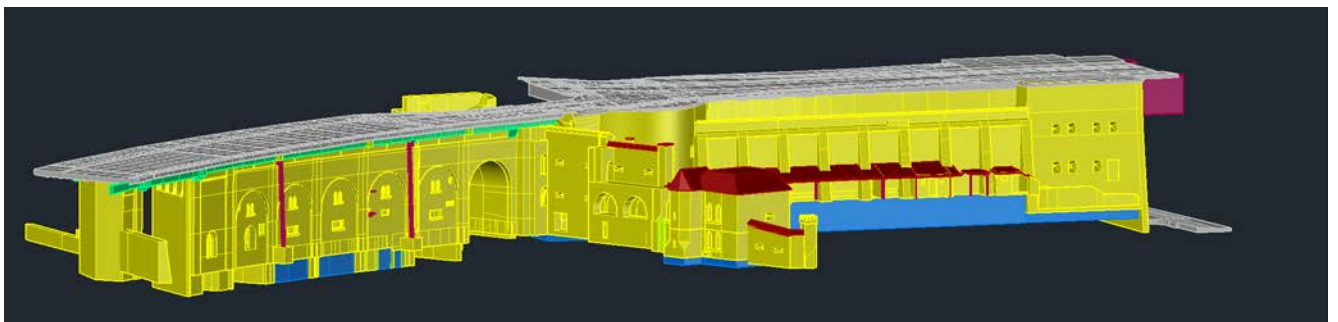


Рис.4.7.Результат моделювання основних та додаткових несучих конструкцій

Для створення другорядних елементів, окрім раніше згаданих інструментів, використовувалися масиви (Array). Цей інструмент дозволяє множити об'єкти вздовж заданої траєкторії або напрямку. З його допомогою були створені перила та декоративні елементи.

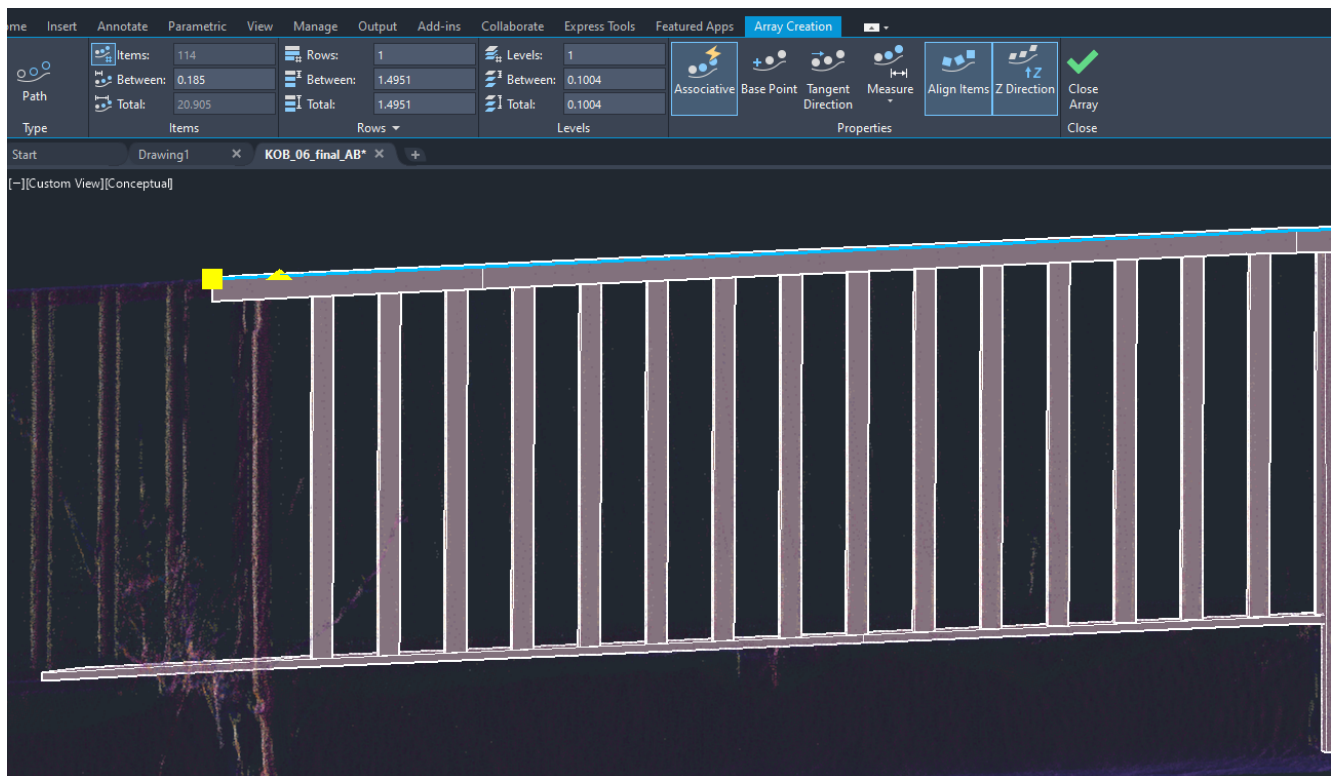


Рис.4.8.Процес моделювання перила

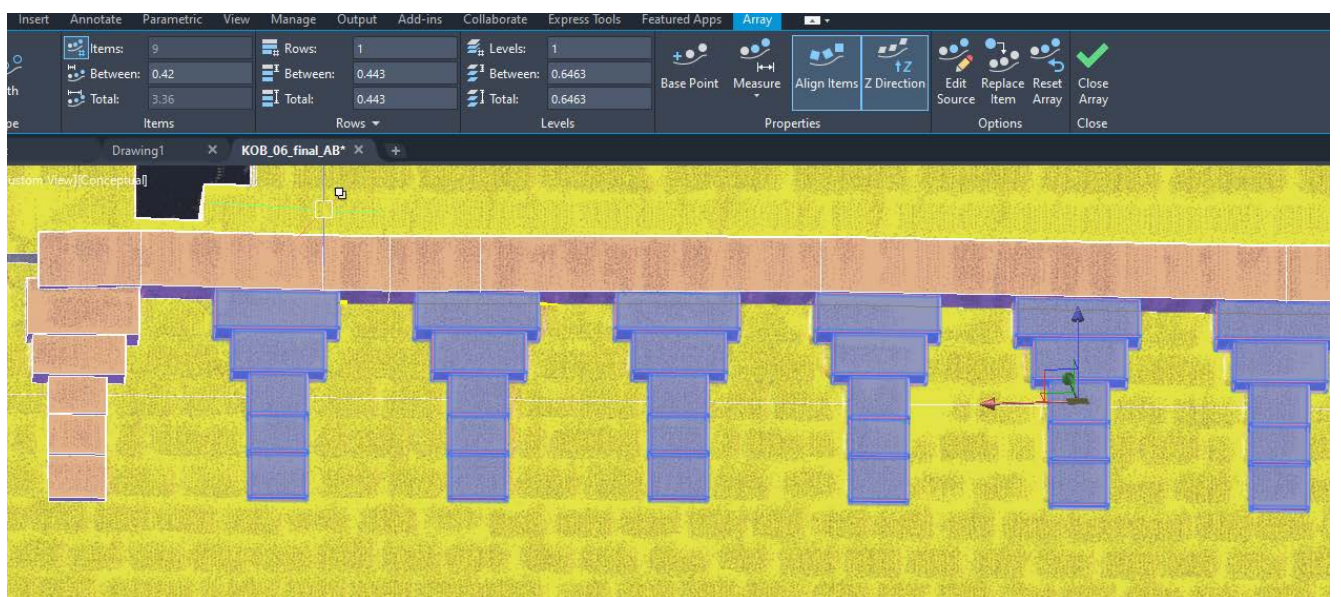


Рис.4.9.Процес моделювання декоративних елементів

MEP-елементи (труби та дренажні системи) були створені за допомогою 3D Pipe Tools із осевих ліній (адже хмара не структурована) у вигляді циліндрів. Важливо щоб труби були саме циліндрами, адже вони залишаються редагованими, інтероперабельними і мають у властивостях.

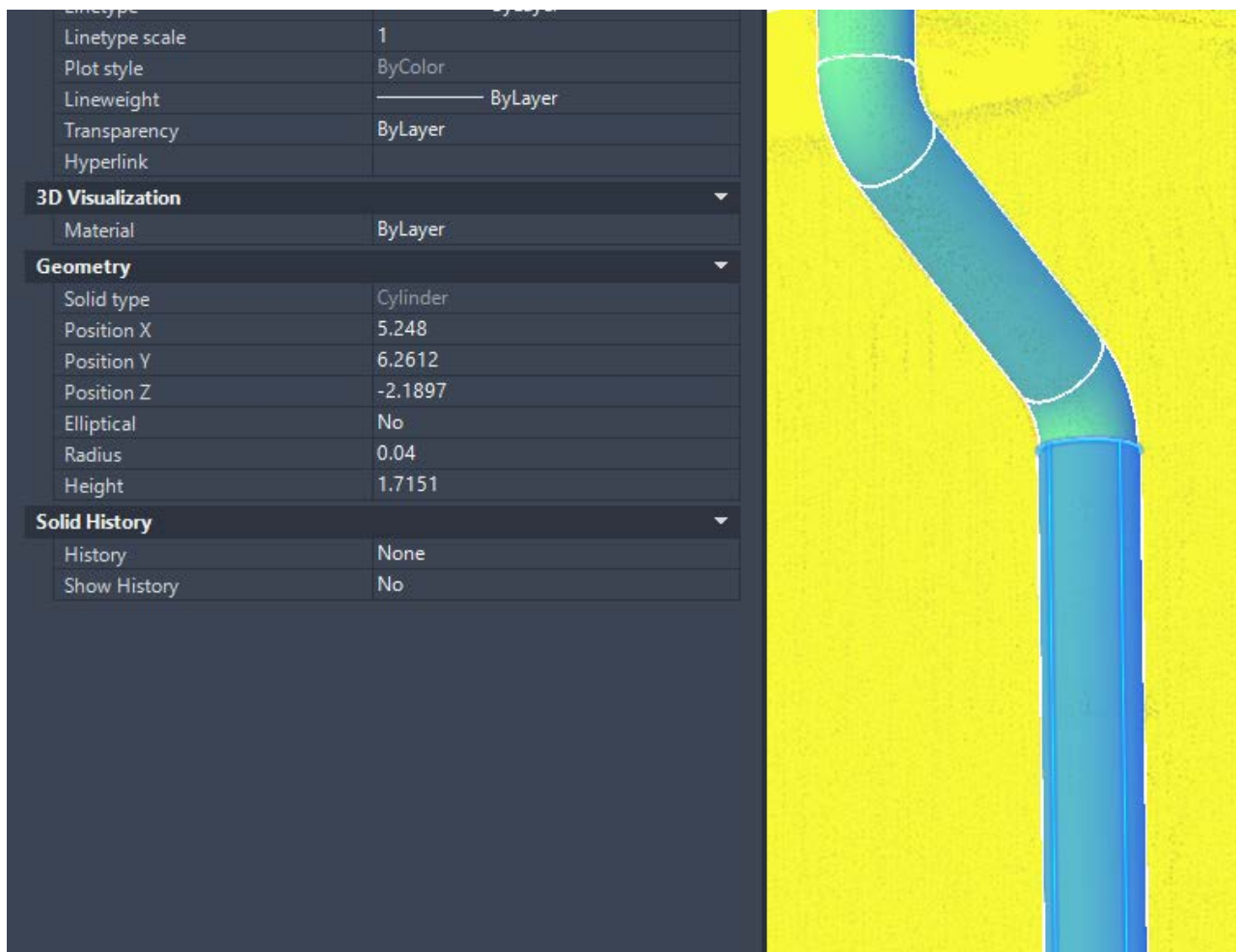


Рис.4.10.Створена труба за допомогою 3D Pipe Tools

Для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) хмара точок була імпортована в програмне забезпечення CloudCompare, де було виконано кілька етапів обробки даних. Спочатку хмара точок була растеризована, а для покращення якості даних використовувалися плагін CSF (Classified Surface Filtering), що дозволяє відфільтрувати шуми та непотрібні елементи, а також метод SOR (Statistical Outlier Removal) для видалення помилкових точок. Хмару також було проріджено з інтервалом 0,4 м для зменшення кількості полігонів при автоматичному створенні в Civil3D.

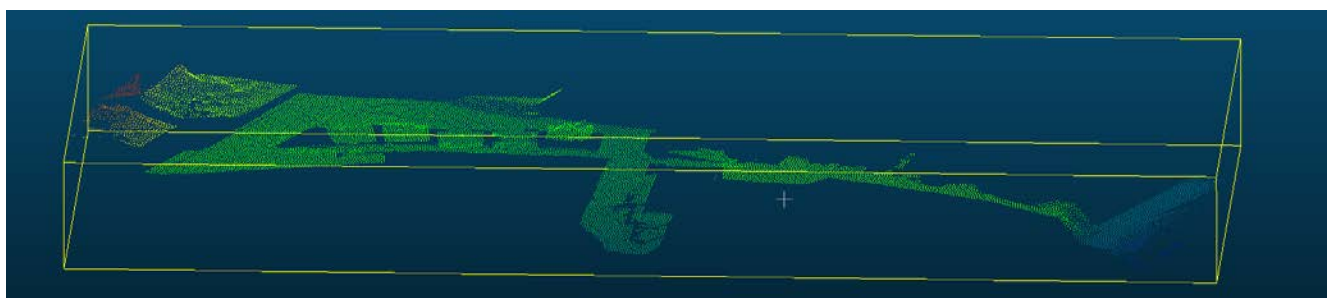


Рис.4.11.Результат обробки хмари точок в CloudCompare

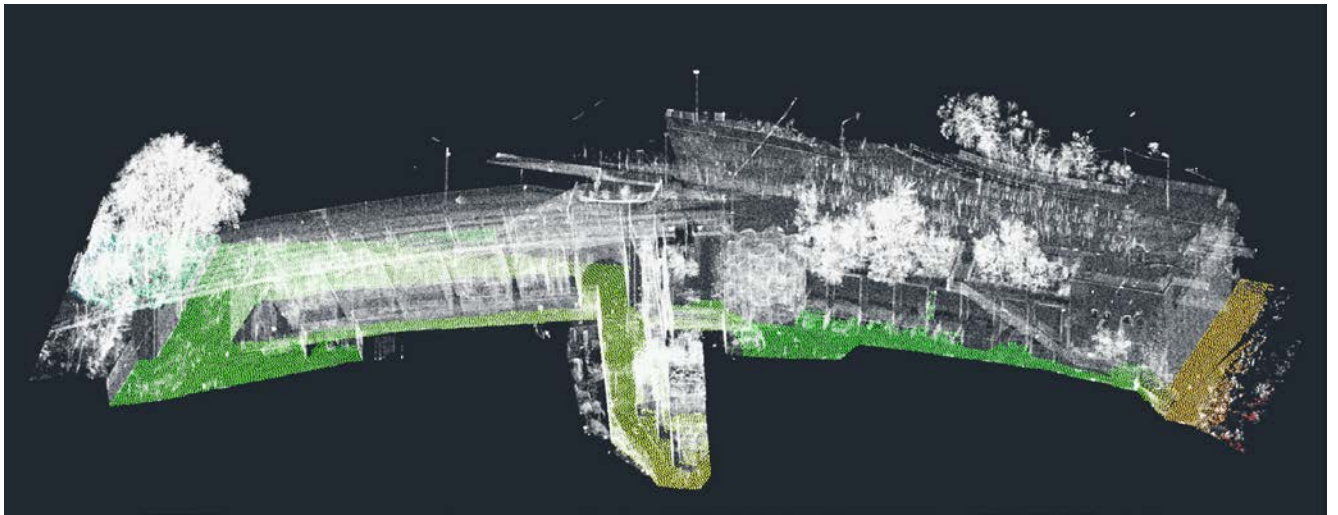


Рис.4.12. Вихідні дані для створення ЦМР

Використовуючи створену для землі хмару та орографічні лінії (якими позначалися краї насипів наприклад) було створено ЦМР в автоматичному режимі в Civil 3D. Після закінчення редагування рельєфу, щоб імпортувати її до AutoCAD її потрібно було двічі взірвати (команда Explode), розбивши її на окремі 3D Face.

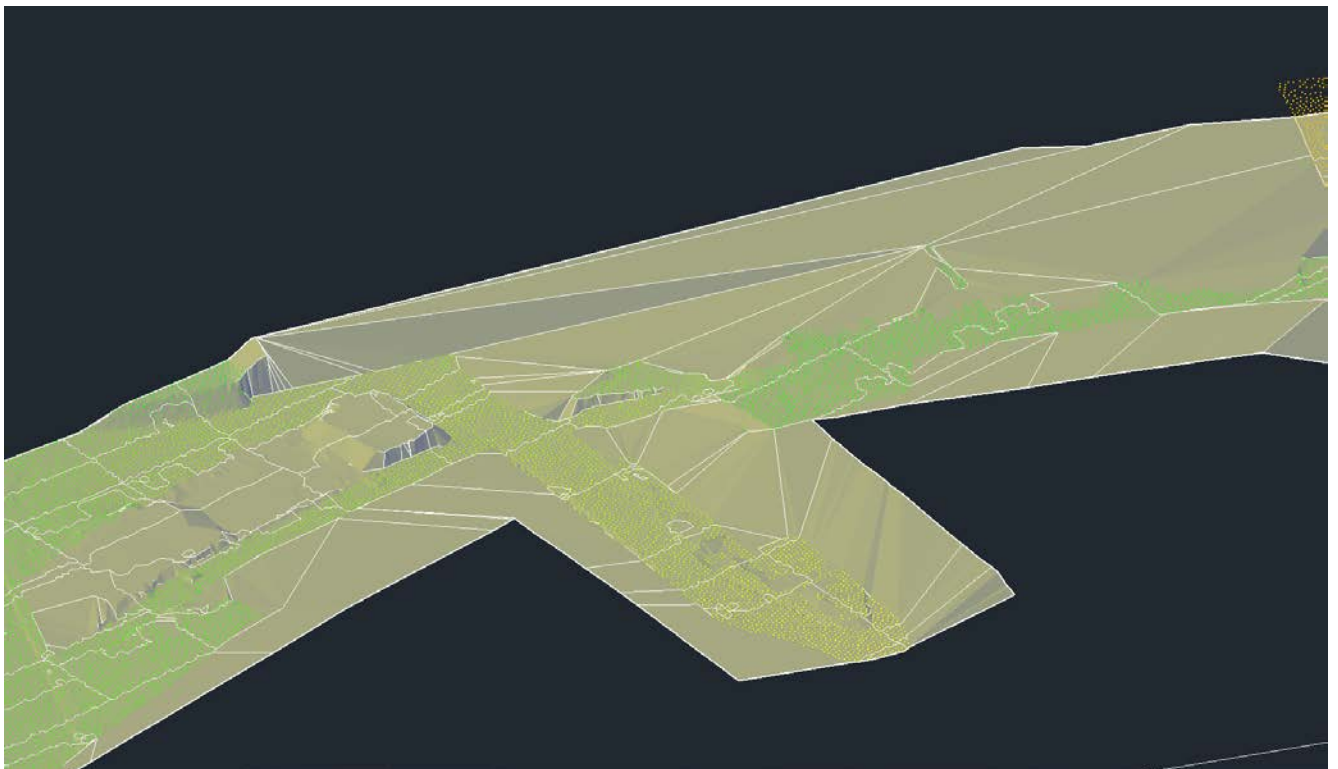


Рис.4.13. Створена ЦМР

ЦМР було обрізано та редаговано, а після цього їй було задано товщину, тому вона може бути не схожою на готовий результат. Модель рельєфу було перевірено на точність і коректність та об'єднано з моделлю мосту.

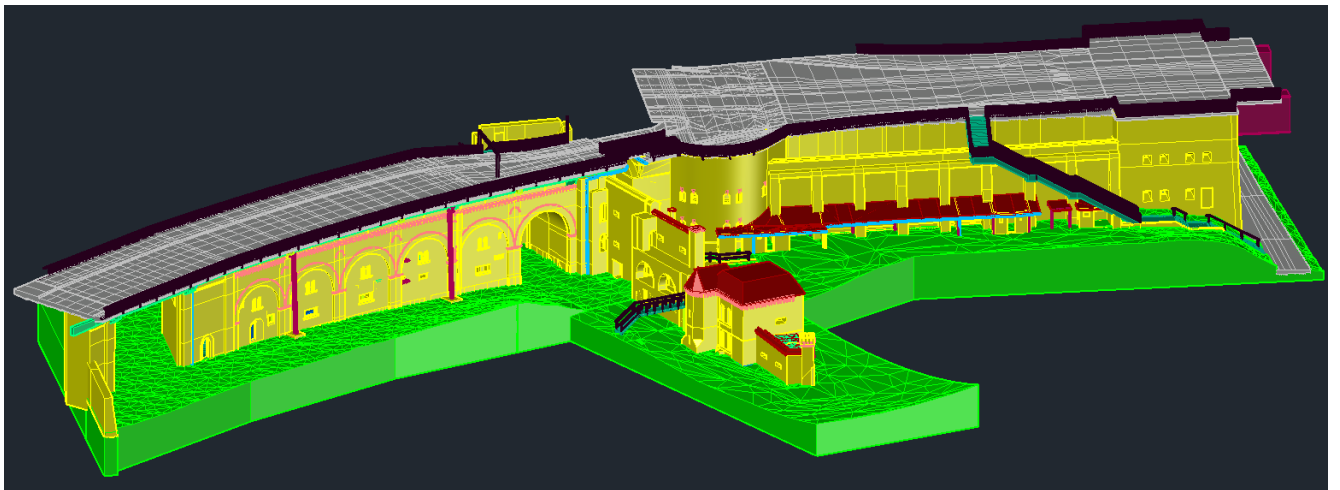
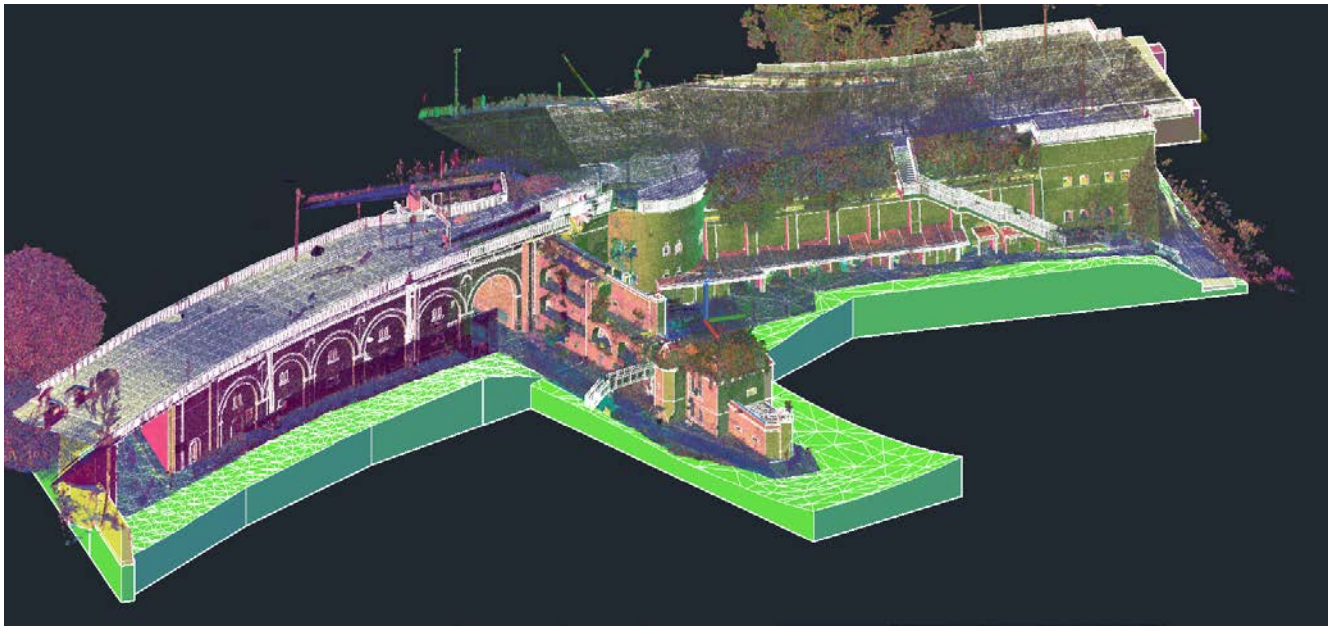


Рис.4.14. Результати моделювання мосту Пфаффендорф

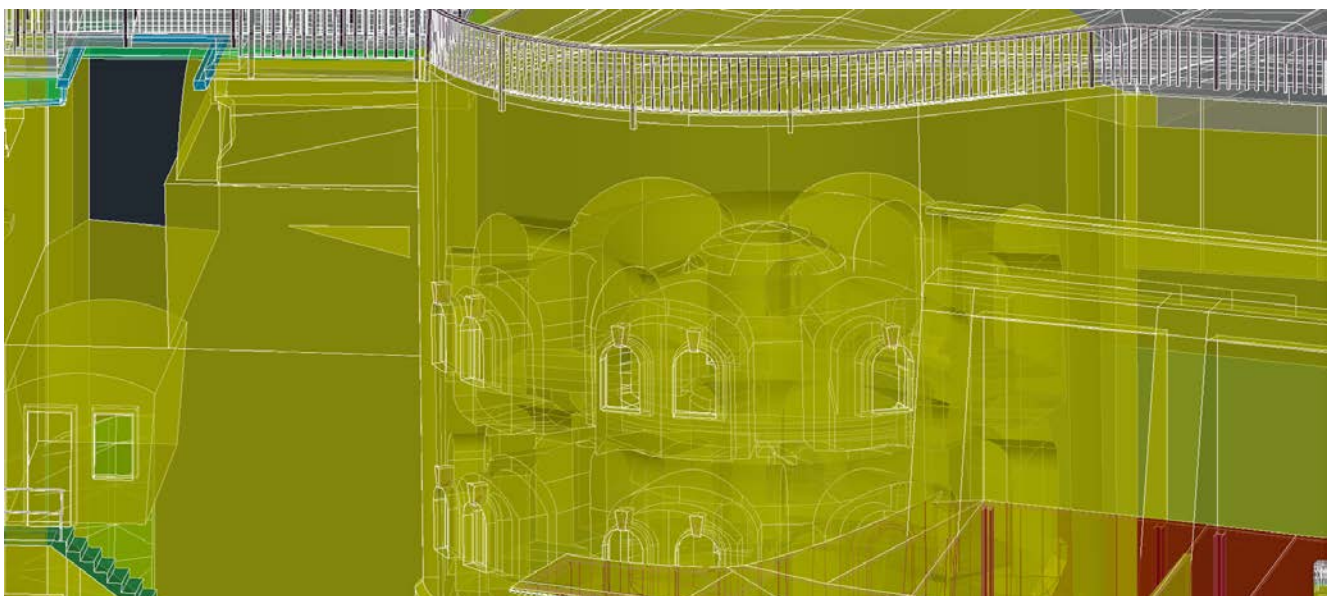


Рис.4.15. Результати моделювання мосту Пфаффендорф в візуальному стилі X-Ray

Далі виконувалась перевірка створеної моделі в середовищі Navisworks Manage, де здійснювався детальний аналіз її точності та коректності. На цьому етапі проводились перевірки на наявність помилок у геометрії, відповідність стандартам та вимогам до моделі. Після виявлення і корекції можливих недоліків, модель було повторно перевірено

Після успішної корекції всієї геометрії та налаштувань, модель була зарендерена в тому ж середовищі.

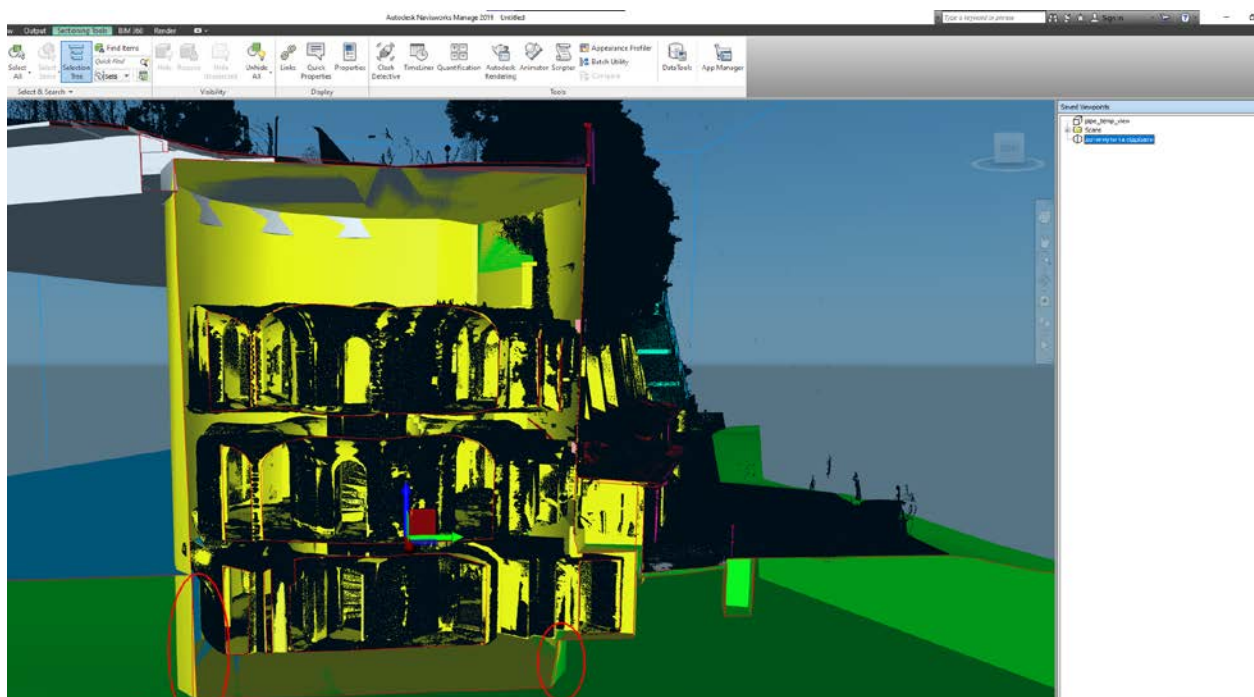


Рис.4.16.Приклад перевірки моделі

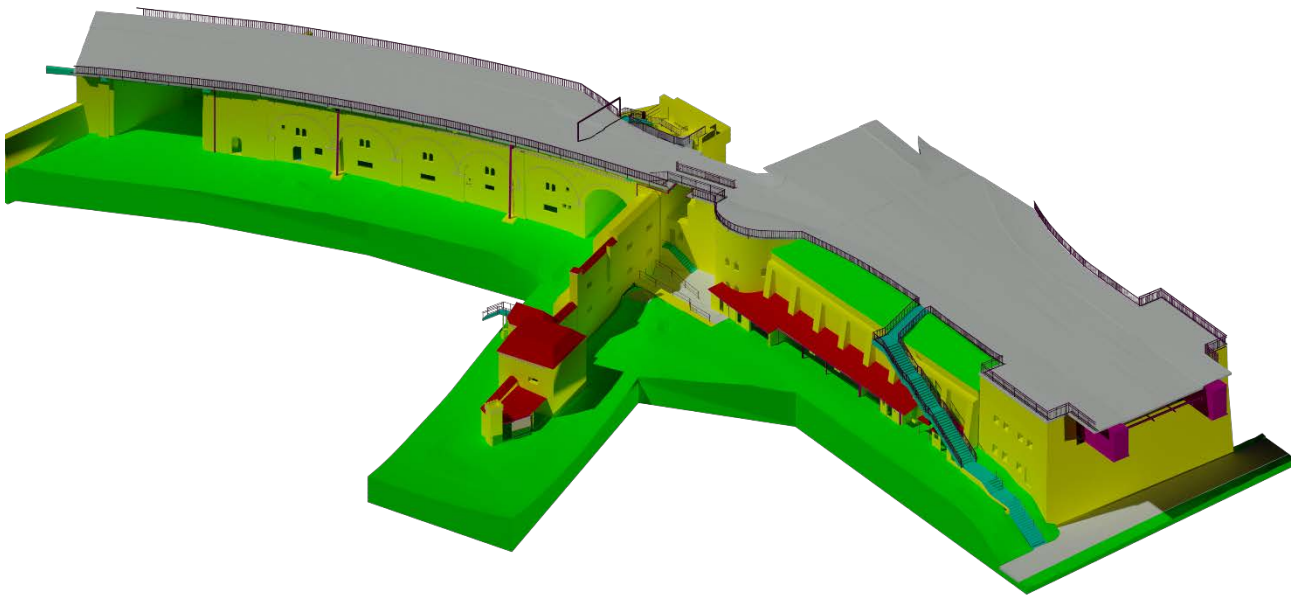
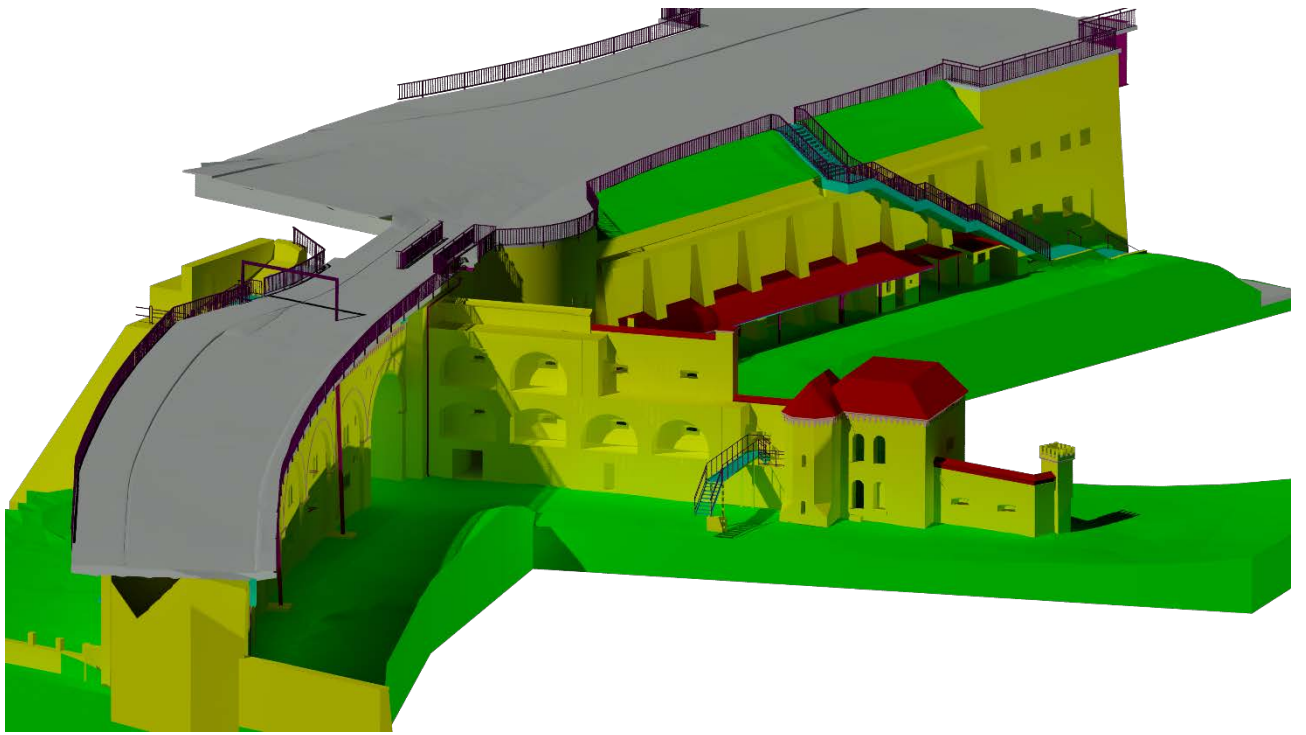


Рис.4.17.Рендери моделі мосту Пфаффендорф

Для BIM-моделювання було обрано хмару точок балкового мосту у місті Штутгарт (Німеччина). Створення моделі мосту Пфафендорф в BIM завдяки його складній геометрії, виявилось би складнішим та потребувало більше часу. Хоча такий міст можна було б імпортувати частинами до Revit і присвоїти відповідні сімейства для об'єктів, цей підхід не дозволив би продемонструвати повноцінно розроблену методику моделювання в BIM.

Це балковий міст через залізницю, який має такі розміри: 50x10x8 м, отже, згідно з таблицею 2.1., його потрібно моделювати з точністю до 1 см. Крізь цей міст планують провести комунікації, тому потрібно створити саме BIM-модель. Модель рельєфу створювати не потрібно, оскільки вже існує ЦМР залізниці, що проходить безпосередньо під мостом.

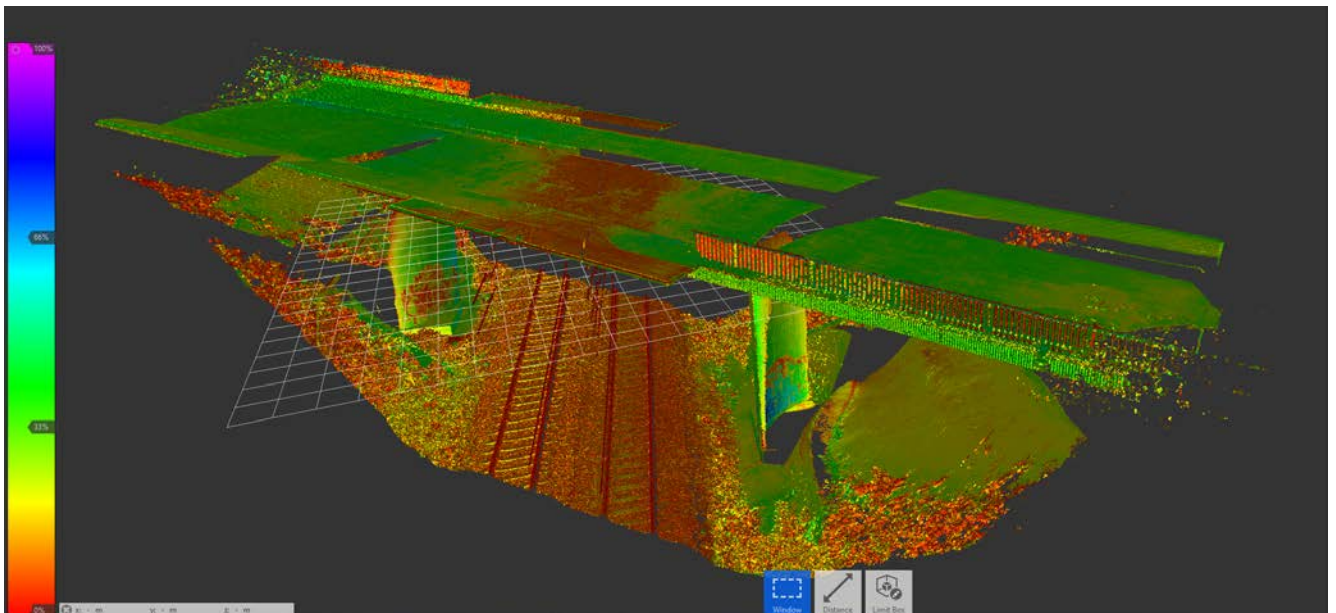


Рис.4.18. Хмара точок мосту у місті Штутгарт у середовищі Recap

Для створення моделі мосту в Revit були використані маси (Mass) для формування базових геометричних елементів конструкції. Маси схожі на функції в AutoCAD, такі як Sweep, Loft або Extrude та дозволяють створювати елементи з примітивними чи складними формами, які потім можна перетворити на конкретні конструктивні елементи, такі як балки, стіни та колони.

Через низьку якість хмари, деякі елементи були змодельовані з креслень цього мосту.

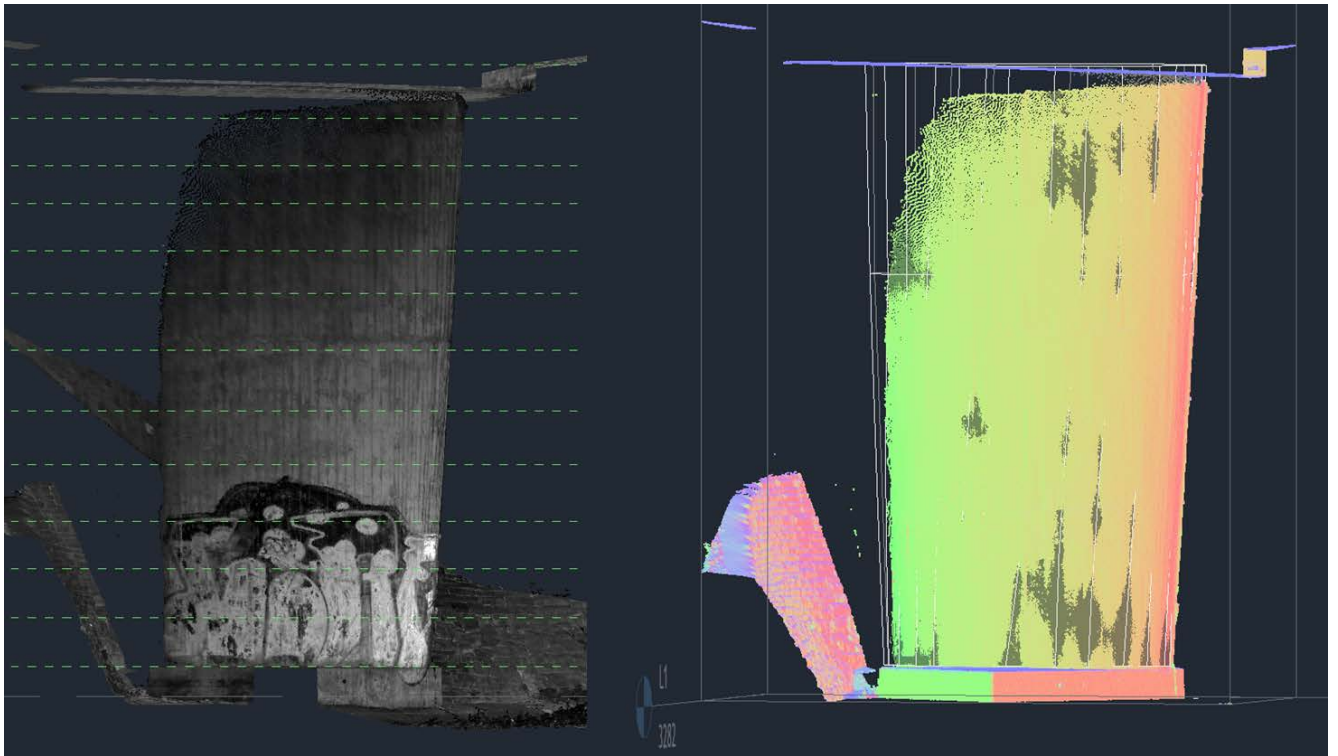


Рис.4.19. Приклад створення опориза допомогою мас (mass) у Revit

Після того, як основні геометричні форми були створені, модель була доповнена більш детальними елементами, такими як перила чи додаткові кріплення, відповідно до хмари точок. Вони були створені в AutoCAD а потім були імпортовані до Revit.

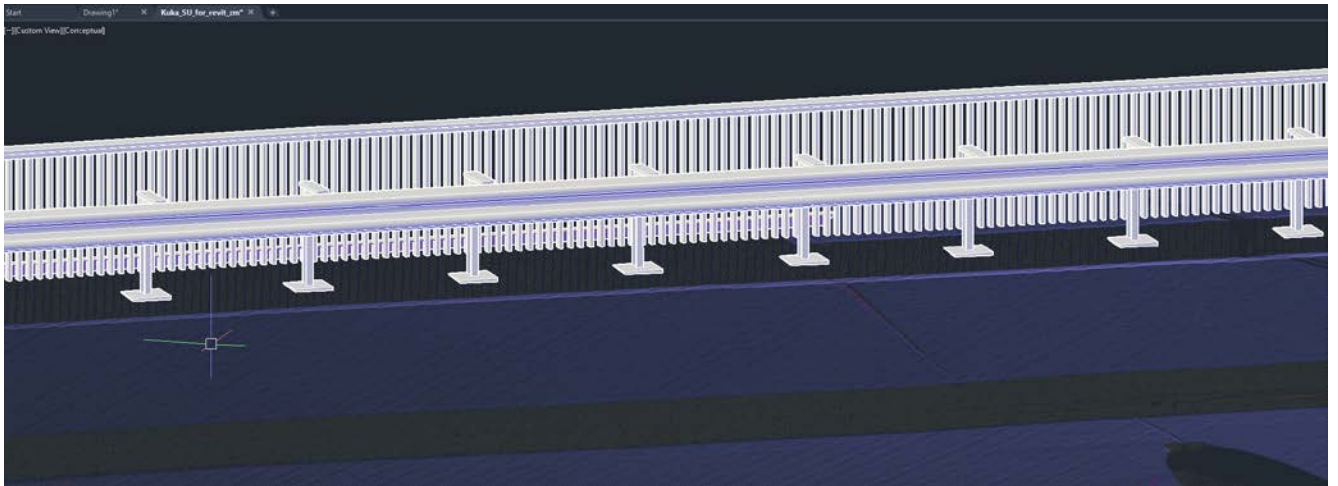


Рис.4.20. Створені перила в середовищі AutoCAD

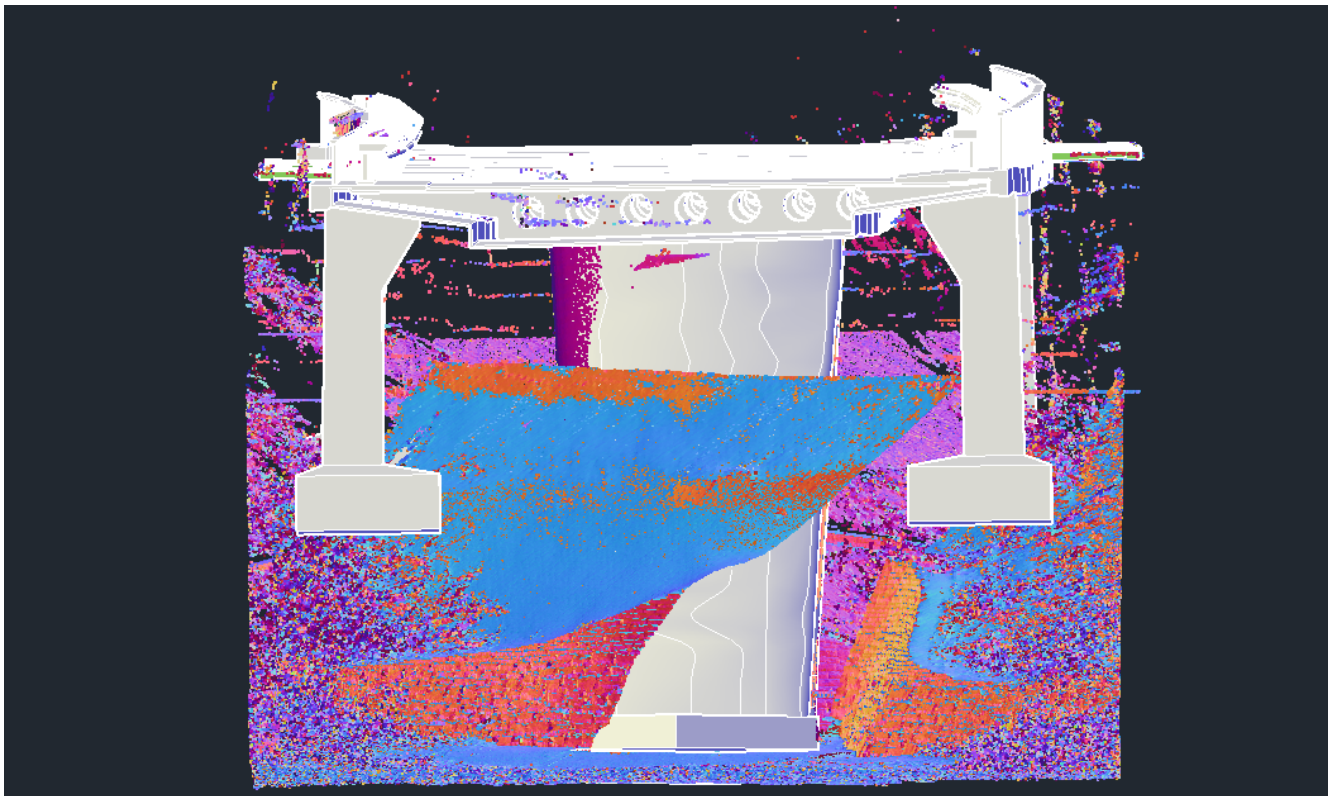
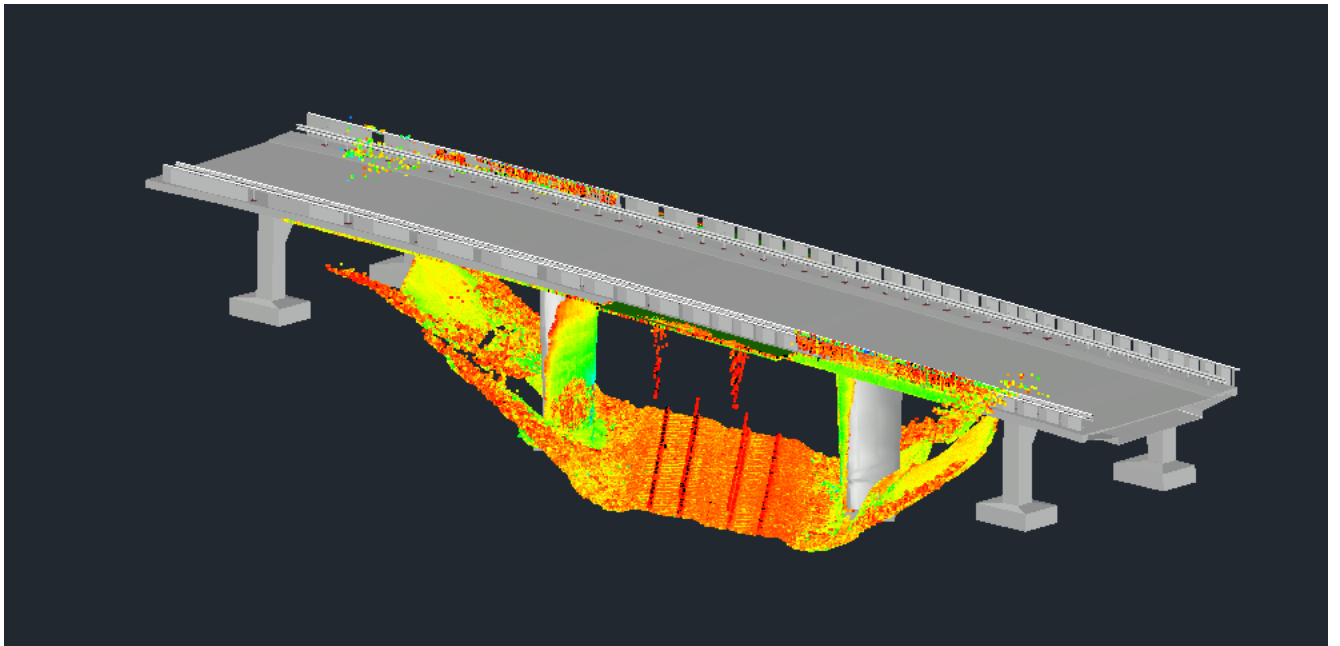


Рис.4.21. Результат моделювання мосту у місті Штутгарт

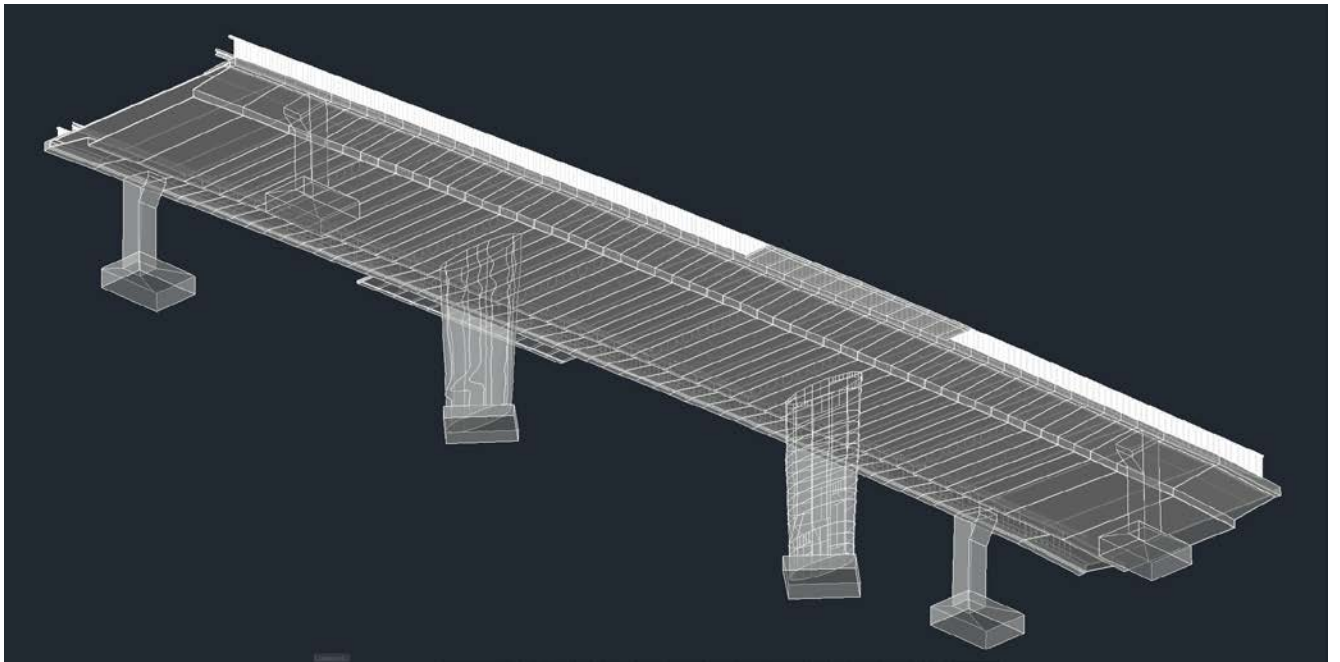


Рис.4.22. Результат моделювання мосту у місті Штутгарт в візуальному стилі X-Ray

4.2. Оцінка результатів відповідно до вимог якості моделювання

Оцінка результатів моделювання проводиться шляхом порівняння створеної моделі з результатами виконавчого знімання (хмарою точок). Отримані результати порівнюють з нормативними вимогами (Табл. 2.1).

Аналіз проводився за допомогою CloudCompare. Для цього формат хмари було змінено з .pcr на .e57 та проріджено з інтервалом 0.4 м. Модель було експортовано у формат .fbx, адже це ПЗ підтримує лише полігональні mesh-моделі. Також перевагою цього формату є підтримка геодезичних систем координат. При імпорті моделі в цьому форматі кожен елемент конструкції CloudCompare розпізнає як окрему модель, тому всі елементи було об'єднано.

За допомогою інструменту визначення відстані між хмарою та mesh-моделлю (Compute cloud/mesh distance) була створена «порівняльна хмара». Ця хмара є модифікованою версією вихідної, де точки зафарбовано залежно від відстані між ними та моделлю. Максимальною відстанню для зафарбування було обрано 5 см.

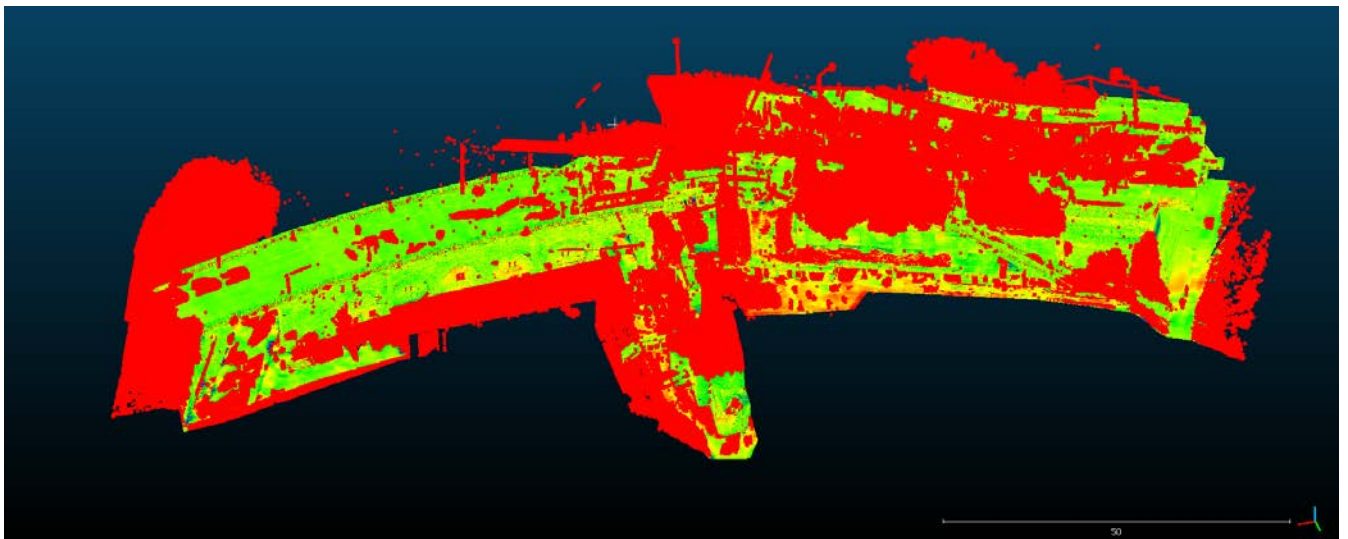
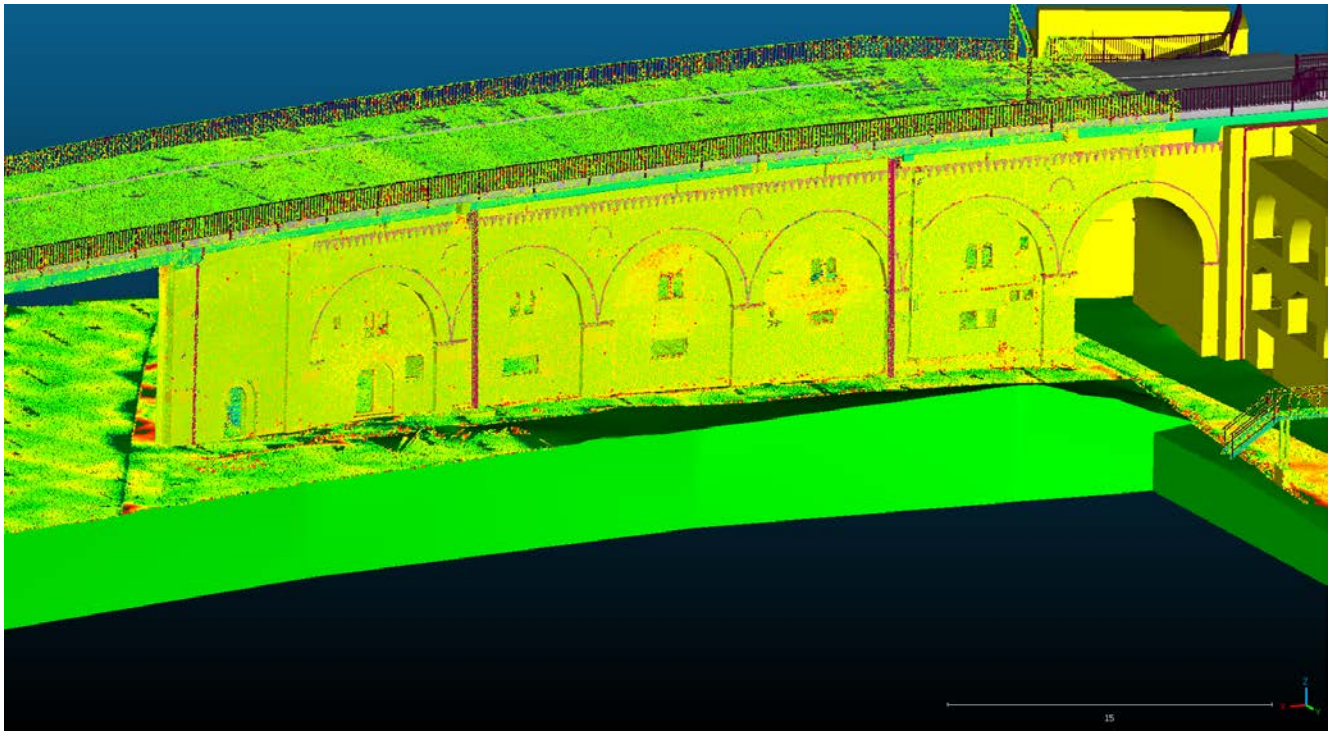


Рис.4.23. Порівняльна хмара мосту Пфаффендорф в середовищі CloudCompare

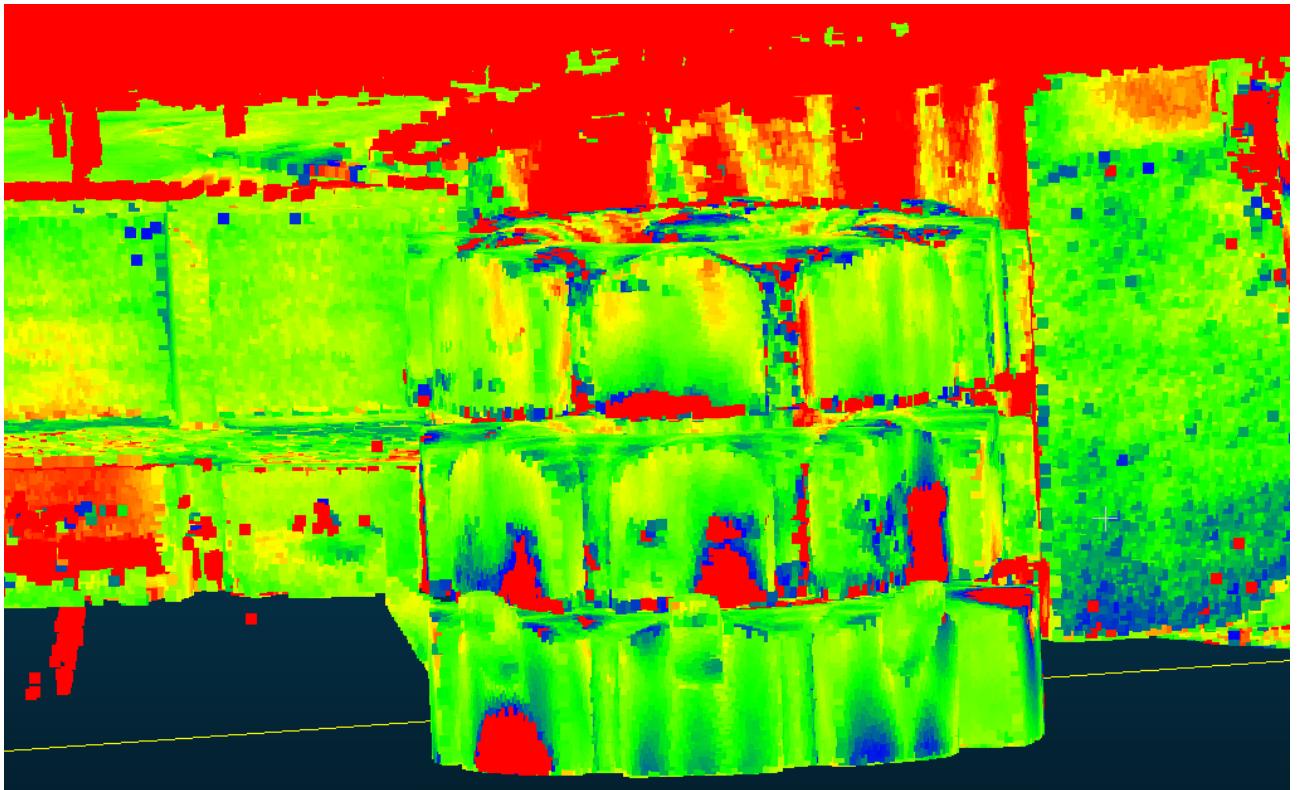


Рис.4.24. Фрагмент порівняльної хмари мосту Пфаффендорф (вежа зсередини)

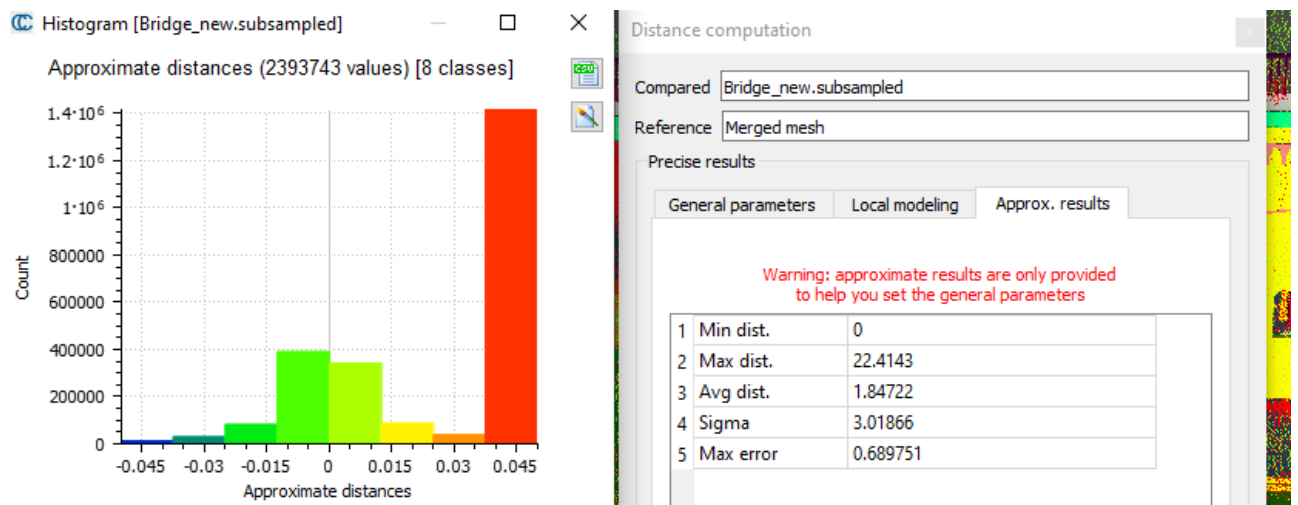


Рис.4.25. Гістограма відстаней між хмарою точок і 3D-моделлю та результати обчислень у CloudCompare

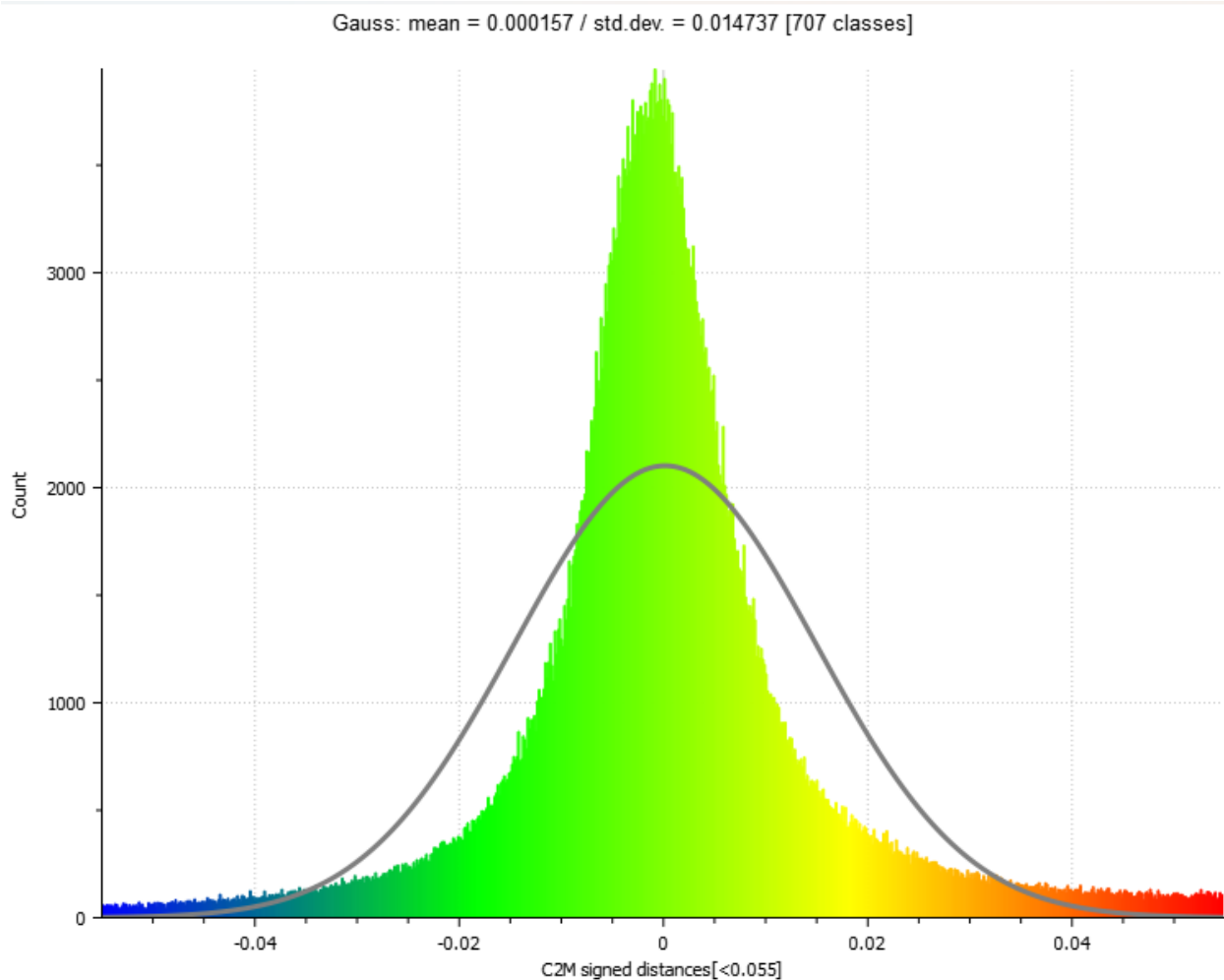


Рис.4.26. Гістограма відстаней між хмарою точок і 3D-моделлю обмежена до 0,05 м

Як видно з рисунку 4.23, в більшості, відхилення між створеною моделлю та хмарою точок мосту Пфаффендорф, не перевищують допустиме (1,5 см). Проте є деякі місця які змодельовані недостатньо точно. Це стосується деяких стін під арками та вежі.

У першому випадку це пов'язано з тим, що зазначені стіни не є несучими елементами конструкції, оскільки їх збудували через багато років після спорудження акведуку. Через це їхнє будівництво здійснювалося без особливої уваги до якості, що призвело до значних нерівностей поверхні. Незважаючи на неточності моделювання цих елементів, це не матиме суттєвого впливу на оцінку стану споруди або для дослідження її деформацій.

У другому випадку це по'язано із кривизною стін (адже вони аркові та криві одночасно), нерівністю штукатурки та її відсутністю та матеріалом стін (кам'яна кладка).

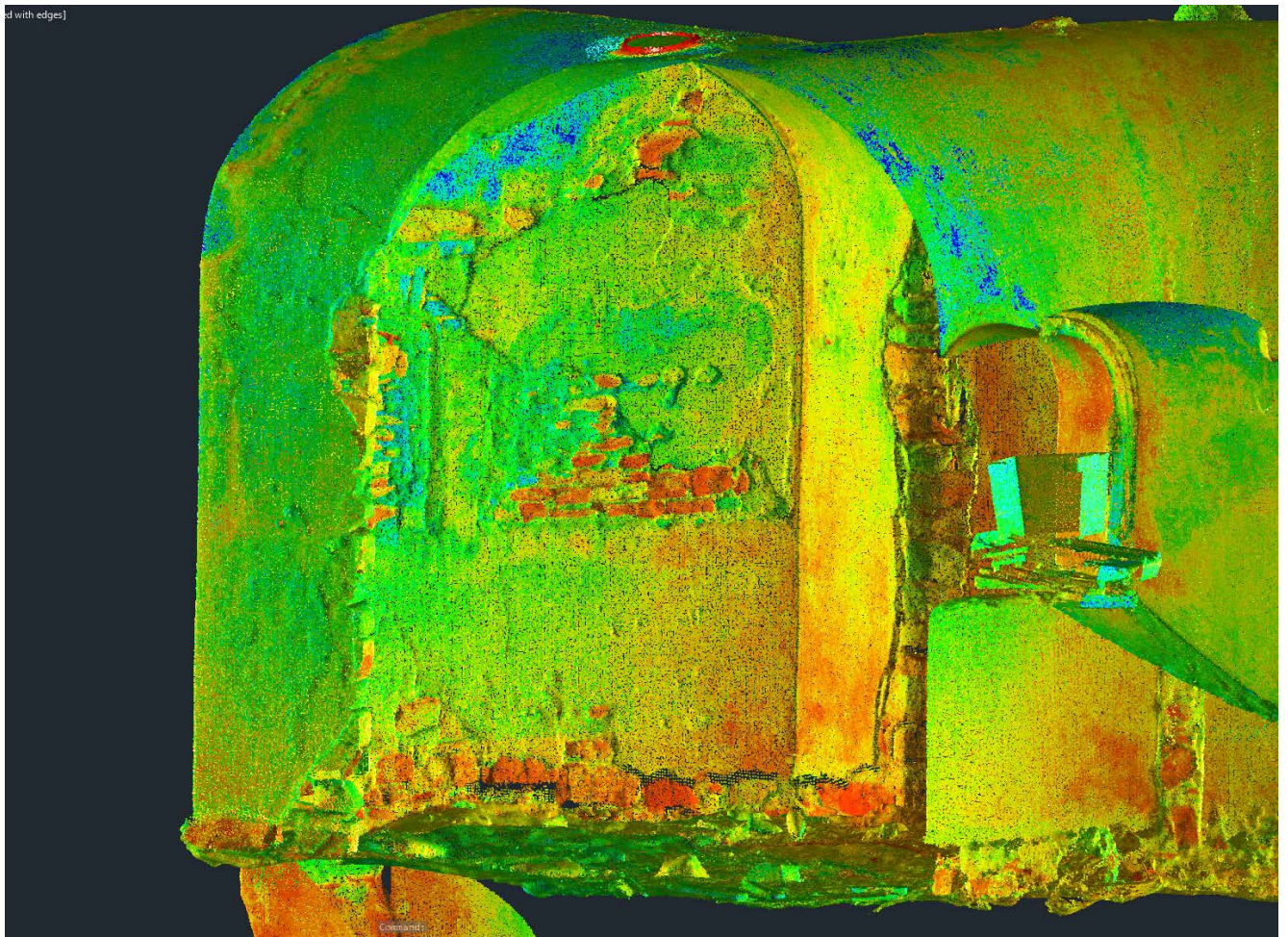


Рис.4.27. Зображення стіни в частині з вежею

Незважаючи на локальні неточності, загальний рівень точності створення моделі відповідає вимогам до моделювання та є достатнім для забезпечення потреб аналізу.

Для створення порівняльної хмари мосту у місті Штутгарт не знадобилося проріджувати хмару, адже споруда невелика і створення хмари не буде займати багато часу.

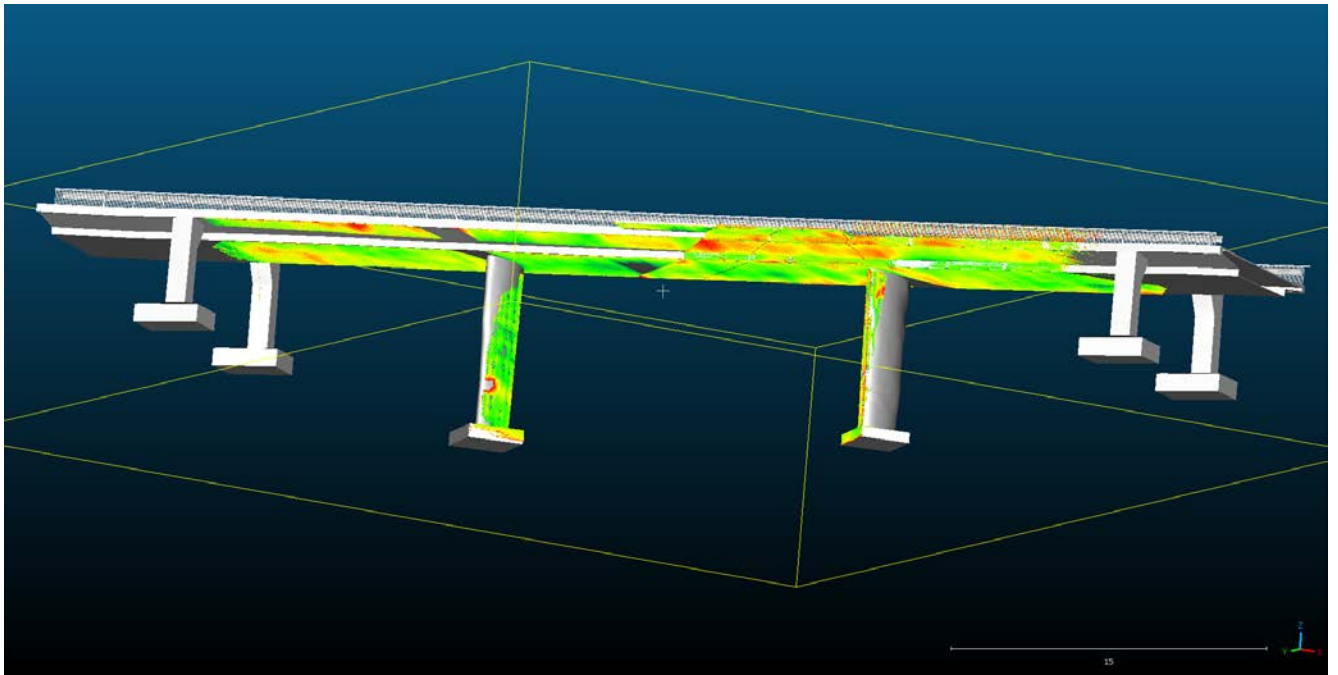


Рис.4.28. Порівняльна хмара мосту у місті Штутгарт в середовищі CloudCompare

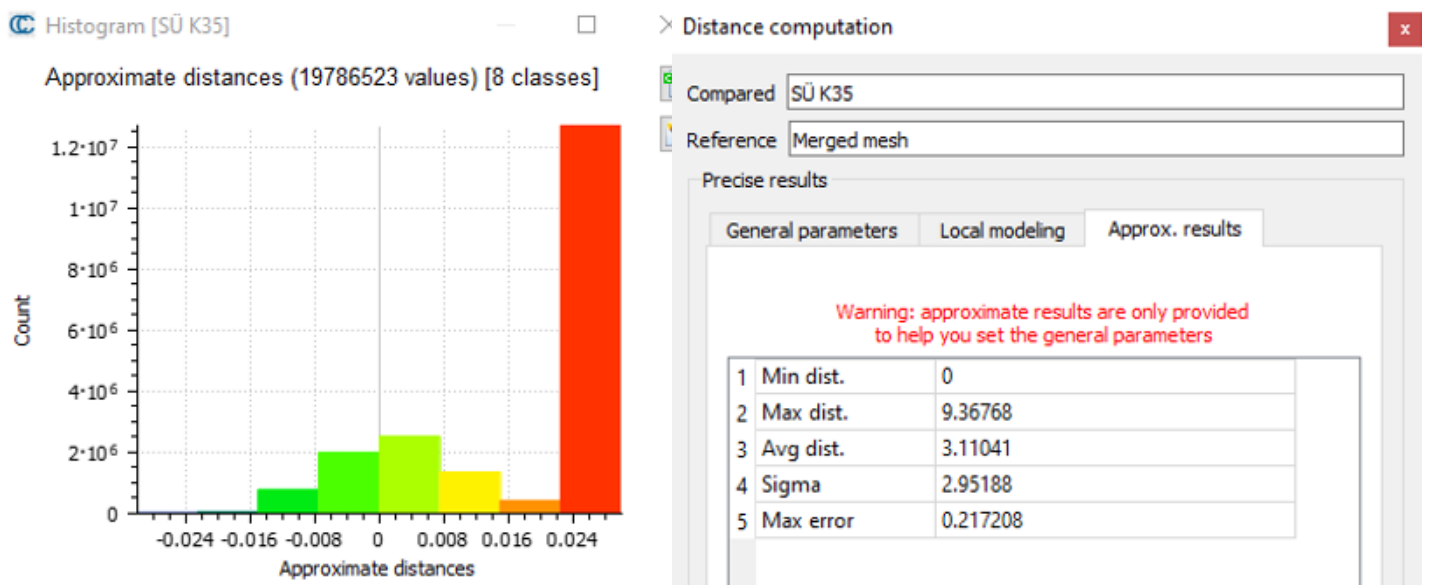


Рис.4.29. Гістограма відстаней між хмарою точок і 3D-моделлю та результати обчислень у CloudCompare для мосту у місті Штутгарт

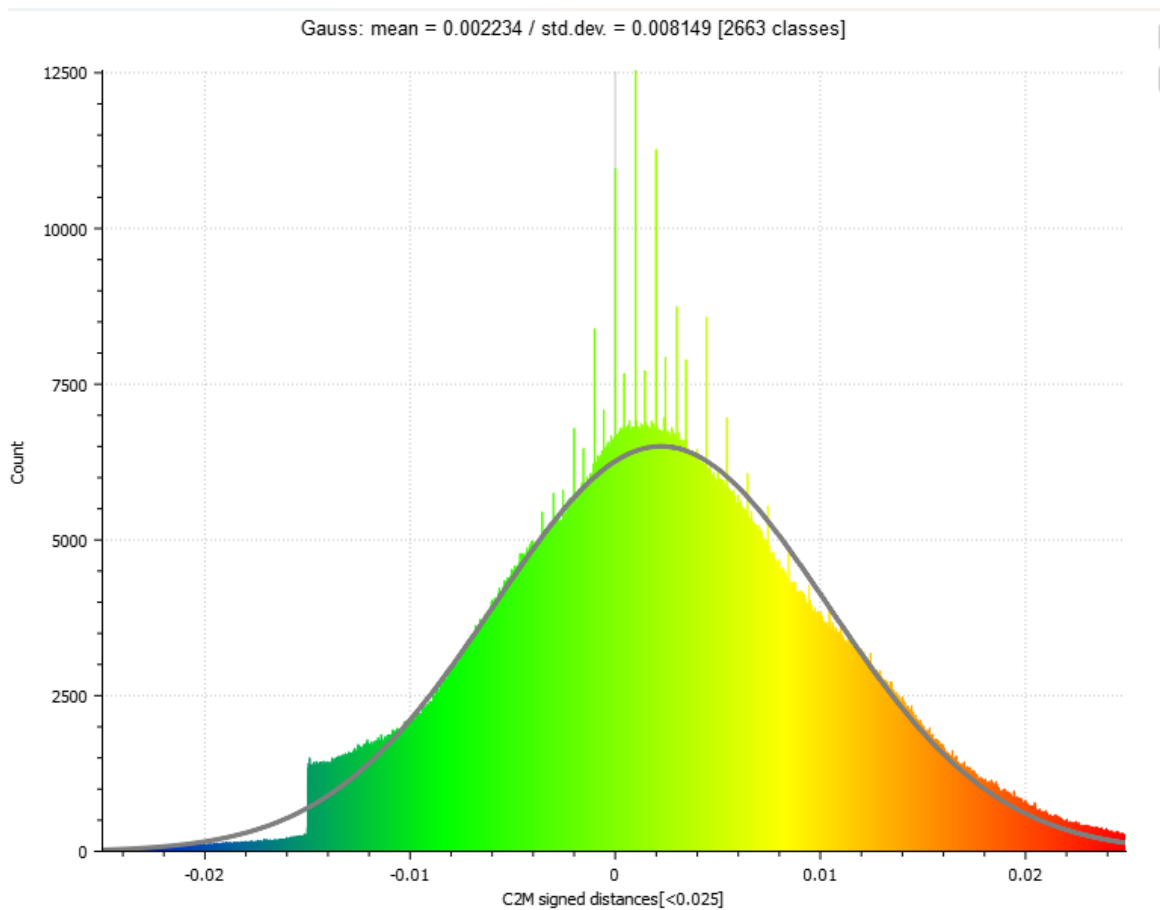


Рис.4.30. Гістограма відстаней між хмарою точок і 3D-моделлю обмежена до 0,025 м

У випадку мосту у місті Штутгарт в більшості міст змодельований точно (до 1 см), а відхилення більші за допустимі пов'язані з низькою якістю хмари.

Висновки до розділу 4

1. За створеними алгоритмами в розділі 3, були змодельовані міст Пфаффендорф у САD та міст у місті Штутгарт у ВІМ.
2. Шляхом порівняння створених моделей з хмарою, було визначено відхилення, яке не перевищує допустиме. Це свідчить про високий рівень точності моделювання та ефективність застосованої методики.

ЗАГАЛЬНІ 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 Пфaffenдорф 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 вагомий значення для сучасної інженерної практики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Повний посібник із 3D-моделювання в будівництві [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://www.takeoffpros.com/blog/guide-to-3d-modeling/>
2. Грабченко А. І. Теорія 3D моделювання : навч. посібник / А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2009. – 230 с. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/44e120ab-f2aa-4dcf-a68b-6636494de33a/download>
3. Каркаси, поверхні та тверді тіла – що це таке? [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://www.mastercam.com/news/blog/wireframes-surfaces-and-solids-what-are-they/>
4. Полігональне моделювання: суть методу, ключові особливості, рекомендації в роботі. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://rocketmen.com.ua/ua/article/polygonic>
5. A Comprehensive Guide to 3D Modeling. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://ikarus3d.com/media/3d-blog/a-comprehensive-guide-to-3d-modeling/>
6. Maya - Modelling, Motor Bike. [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://jutsblog.blogspot.com/2011/09/maya-modelling-motor-bike_14.html
7. QCT-based finite element prediction of pathologic fractures in proximal femora with metastatic lesions/ Emir Benca, Alexander Synek, Morteza Amini, Franz Kainberger, Lena Hirtler, Reinhard Windhager, Winfried Mayr & Dieter H. Pahr.- Scientific Reports, 2019. [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/334490475_QCT-based_finite_element_prediction_of_pathologic_fractures_in_proximal_femora_with_metastatic_lesions#fullTextFileContent
8. Бідніченко О. Г. Сучасні тенденції розвитку систем автоматизованого комп'ютерного моделювання. [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/364767123_CURRENT_TRENDS_IN

THE DEVELOPMENT OF AUTOMATED COMPUTER MODELING SYSTEMS

9. В.І. Доненко В.І., Іщенко О.Л., Вакулюк Я.Є. BIM-технології як метод оптимізації використання ресурсів в будівельній галузі. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/322454397.pdf>
- 10.Р. Грицеляк. Концепція інформаційного моделювання будівель - "BIM". [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39146/2/MNTK_2022_Grytseliak_R-The_conception_of_building_176-178.pdf
- 11.The Hnin Su Aung. Dimensions in BIM: 7 BIM Dimensions Explained [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://www.novatr.com/blog/dimensions-in-bim>
- 12.Level of Development (LOD) Specification [Електронний ресурс]– Режим доступу: [https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/#:~:text=The%20Level%20of%20Development%20\(LOD,the%20design%20and%20construction%20process.](https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/#:~:text=The%20Level%20of%20Development%20(LOD,the%20design%20and%20construction%20process.)
- 13.AEC (UK) BIM Protocol. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <https://aecuk.files.wordpress.com/2012/09/aecukbimprotocol-v2-0.pdf>
- 14.Stans Rathaus. Graphisoft BIMx model transfer. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <http://surl.li/kzzzgk>
- 15.Platzgestaltung Waiblingen-Neustadt. Graphisoft BIMx model transfer. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <http://surl.li/uxyfjq>
- 16.Jerico Bridge. Graphisoft BIMx model transfer. [Електронний ресурс]– Режим доступу: <http://surl.li/dbgxqd>
- 17.ДБН В.2.3-22:2009 "Мости та труби. Основні вимоги проектування". [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074865221706188507?doc_type=2
- 18.Основні елементи мосту та їх призначення. [Електронний ресурс]– Режим доступу: https://zadk.ucoz.ua/distan/sajt_shs.pdf

- 19.Types of Bridges. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://www.bigrentz.com/blog/types-of-bridges>
- 20.Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 р. № 152-2021-р. Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text>
- 21.База нормативних документів ДСТУ. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://csm.kiev.ua/nd/nd.php?z=bim&st=0&b=1>
- 22.О.В. Адаменко. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів за допомогою теорії розмірних ланцюгів. Містобудування та територіальне планування.
<https://repository.knuba.edu.ua/bitstreams/5f399300-49fd-488b-9e52-dca37119ab93/download>
- 23.Banfi, F., Barazzetti, L., Previtali, M., and Roncoroni, F.: Historic BIM: a new repository for structural health monitoring, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-5/W1, 269–274, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-269-2017>, 2017. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/317058865_HISTORIC_BIM_A_NEW_REPOSITORY_FOR_STRUCTURAL_HEALTH_MONITORING
- 24.Vital, Welington, et al. Application of bridge information modelling using laser scanning for static and dynamic analysis with concrete damage plasticity. Alexandria Engineering Journal, 2023, 79: 608-628. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823007044#f0045>
- 25.Kellner, Maximilian, et al. Scan2BIM -A Review on the Automated Creation of Semantic-Aware Geometric as-is Models of Bridges Scan2BIM. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 2024, 131 : 159-181. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://www.gia.rwth-aachen.de/cms/gia/Forschung/Publikationen/~zpugf/Details/lidx/1/?file=995612>

- 26.Блок-схема [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://www.maxzosim.com/blok-skhema/>
- 27.Лазерний сканер Leica RTC360. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://leica-geosystems.com.ua/product/rtc360/>
- 28.Лазерний сканер FARO Focus Core [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://tnt-tpi.com/lazernyi-skaner-faro-focus-core/>
- 29.Trimble X9. [Електронний ресурс]– Режим доступу:
<https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-x9>
- 30.Онлайн створювач GIF та редактор зображень. Режим доступу:
<https://ezgif.com>
- 31.CloudCompare (Програмне забезпечення) Режим доступу:
<https://www.cloudcompare.org/release/notes/20190106/>
- 32.Autodesk ReCap (Програмне забезпечення) Режим доступу:
<https://www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- 33.Autodesk AutoCAD (Програмне забезпечення) Режим доступу:
<https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- 34.3D Pipe Tools for AutoCAD. (Плагін) Режим доступу:
<http://www.gorkovchuk.com/3dptools.html>
- 35.Point Cloud Cropping Tools for AutoCAD (Плагін) Режим доступу:
<http://www.gorkovchuk.com/pcctools.html>
- 36.Autodesk Civil 3D (Програмне забезпечення) Режим доступу:
<https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- 37.Autodesk Revit (Програмне забезпечення) Режим доступу:
<https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- 38.Environment for Revit (Плагін) Режим доступу:
<https://archintelligence.com/download/>

39. Aurivus. (Плагін) Режим доступу: <https://aurivus.com/>

40. As-Built for Autodesk Revit. (Плагін) Режим доступу:

https://knowledge.faro.com/Software/As-Built/As-Built_for_Autodesk_Revit

ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала		Бахмач А.Ю.			Розробка методики тривимірного моделювання мостових споруд за результатами наземного лазерного сканування	Літ.	Арк.	Акрушів
Консульт.							91	122
Керівник		Горковчук Ю.В.				КНУБА, ПІСУТ, ГСТМ-23		
Зав.каф.		Карпінський Ю.О.						

АТЕСТАЦІЙНА 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

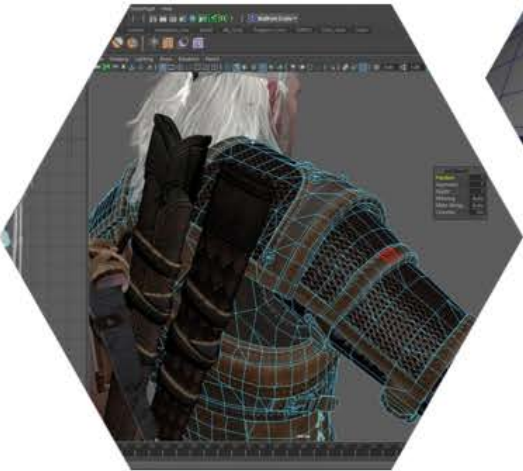
5

Оптимізація методів класифікації елементів мостової конструкції

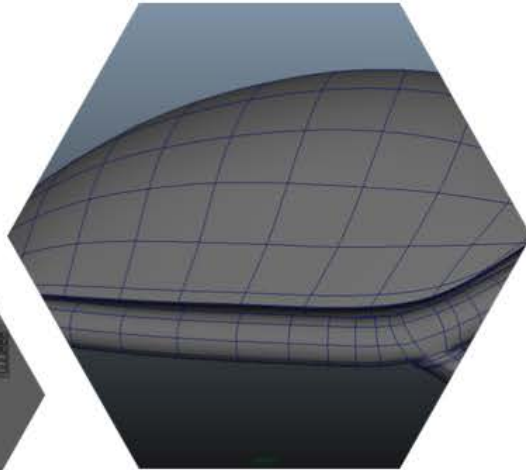
6

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

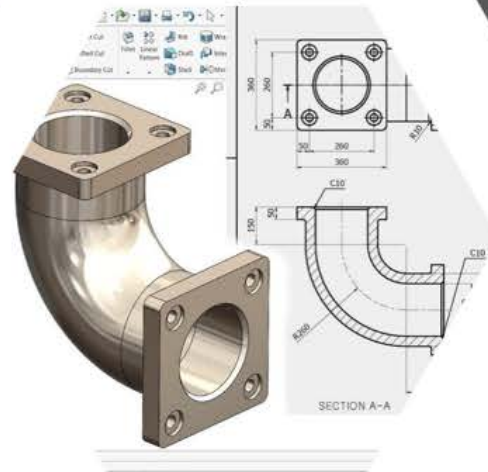
МЕТОДИ СУЧАСНОГО ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ



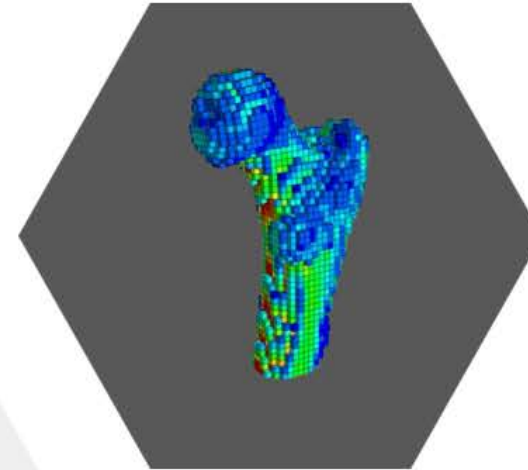
Полігональне



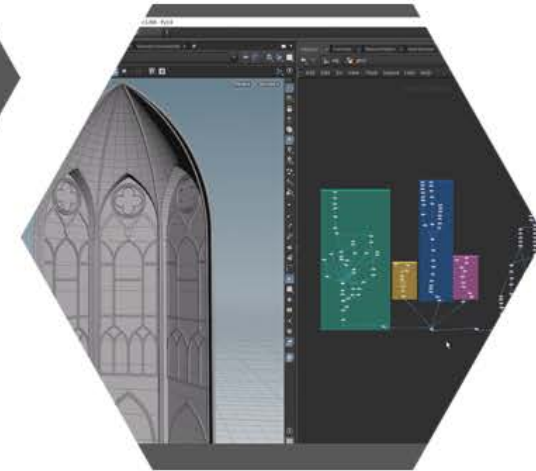
NURBS



Параметричне



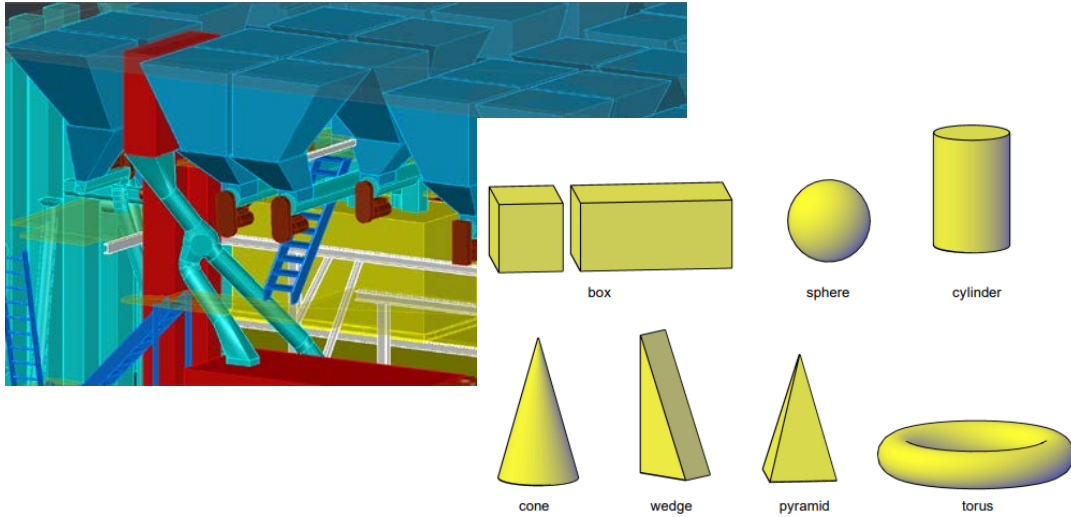
Воксельне



Процедурне

3D МОДЕЛЮВАННЯ

CAD



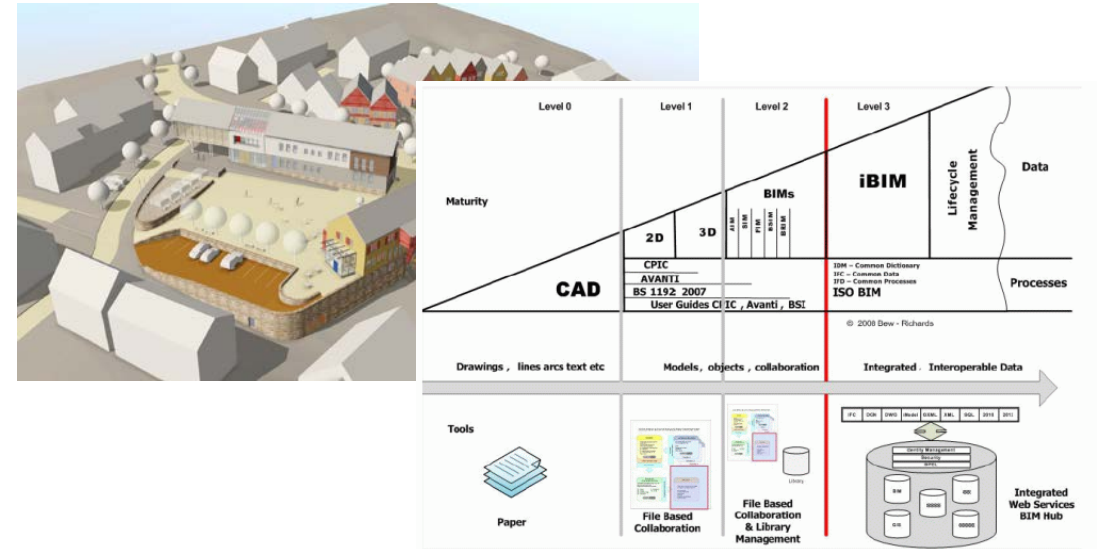
Переваги

- + 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



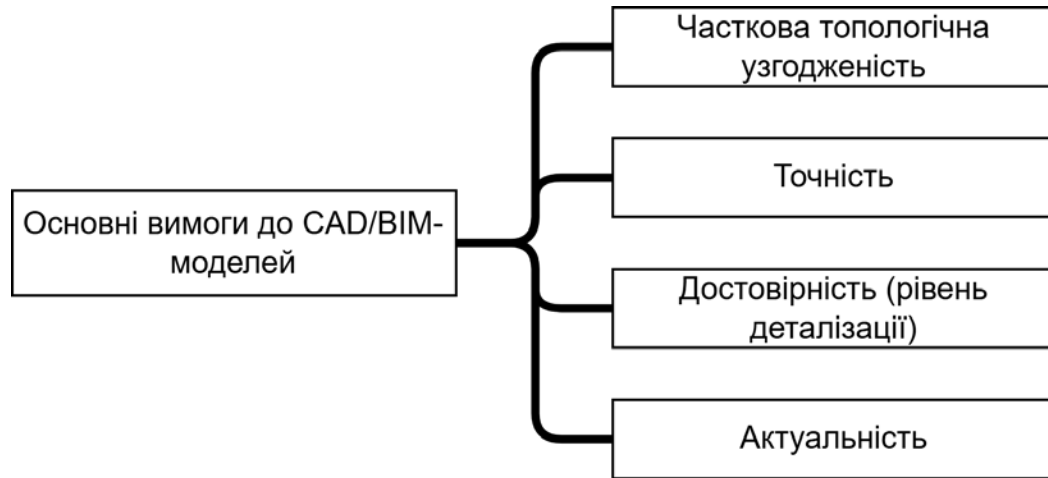
КРОКВЯНІ

ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ

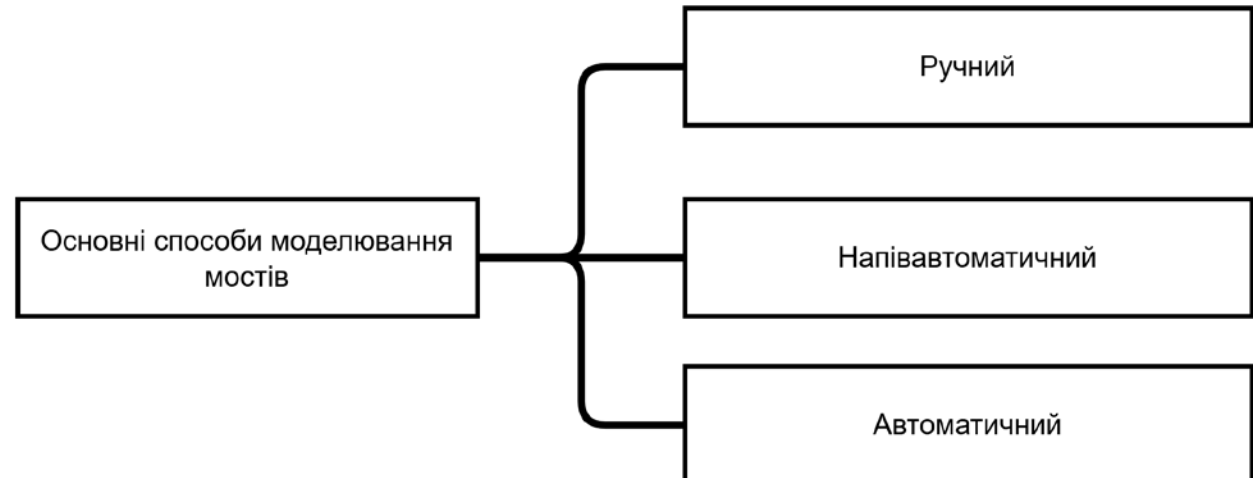
Тип мосту	Габарити (Довжина x Ширина x Висота), м	Основні елементи конструкції	Матеріал	Похибки елементів, мм ($\Delta L/\Delta H/\Delta O/\Delta S$)	Загальний допуск ΔT , мм
Балковий	50 × 10 × 1	Балки	Бетон	5 / 3 / 2 / 4	10
Арковий	100 × 15 × 20	Арка	Бетон	10 / 5 / 5 / 8	15
Консольний	120 × 12 × 2	Консольні 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



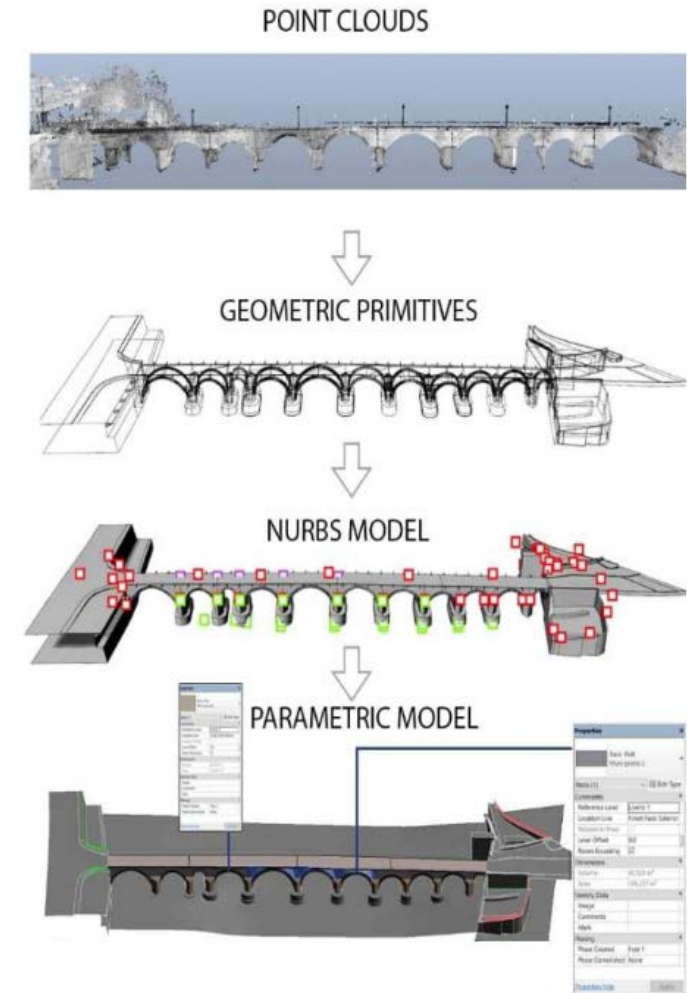
ОСНОВНІ СПОСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТІВ



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.

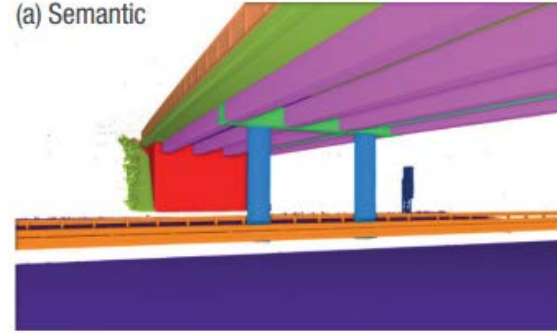


ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

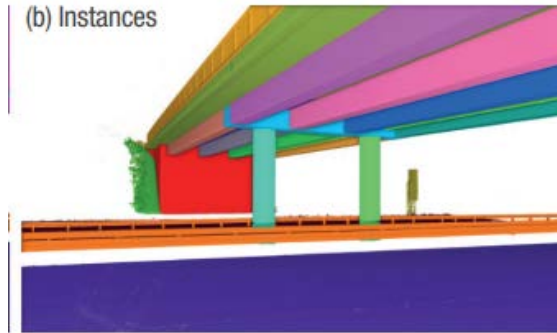
НАПІВАВТОМАТИЧНИЙ СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ

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



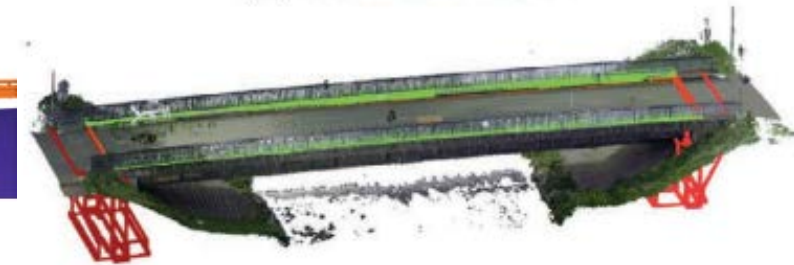
(b) Instances



(a) Colored point cloud

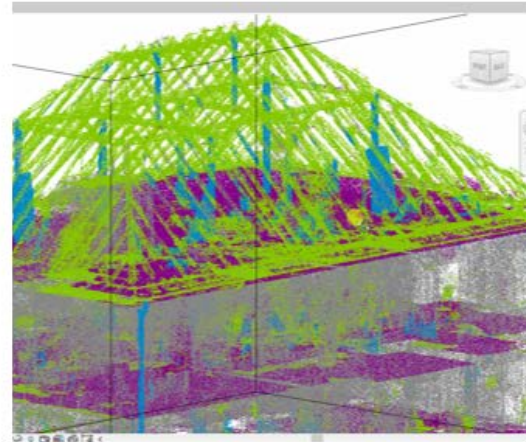


(b) Geometric model

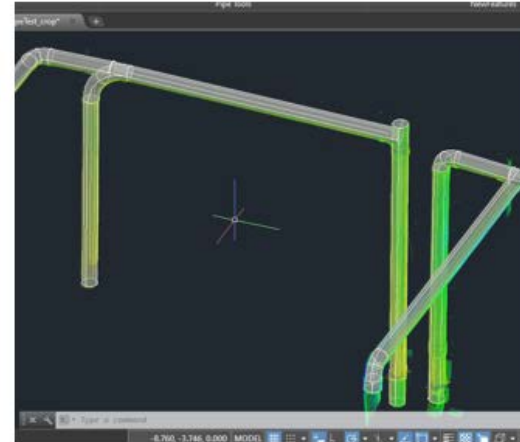


(c) Model and point cloud combined

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ



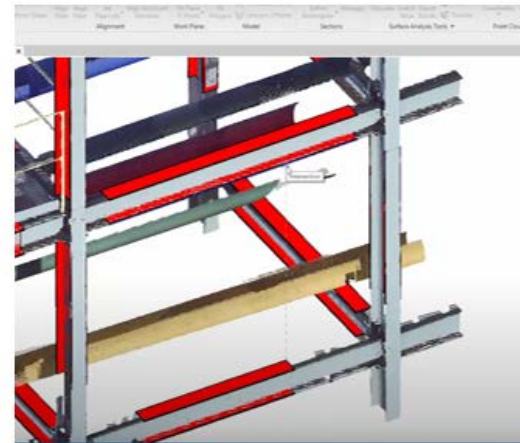
AURIVUS



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)

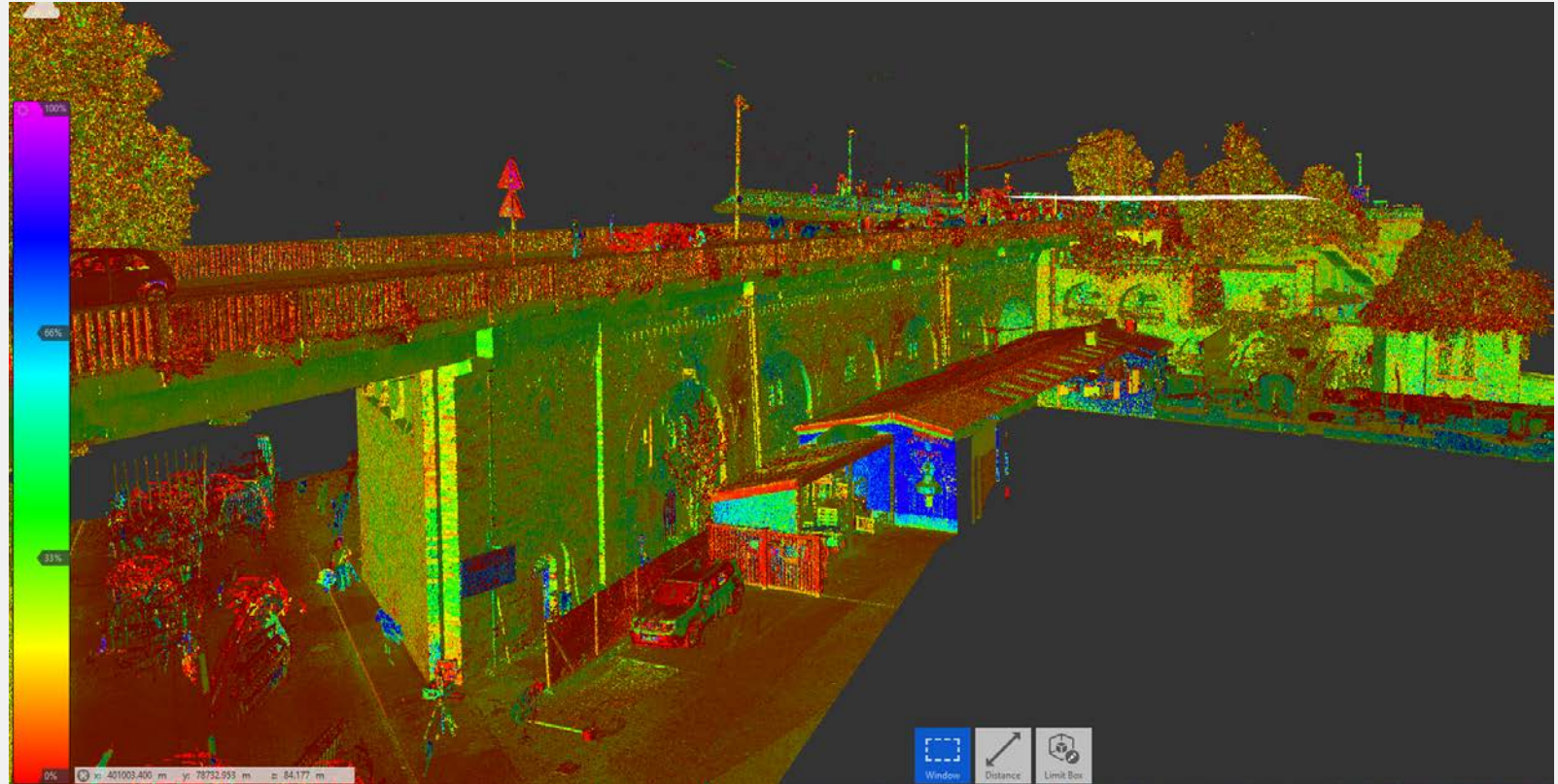
Габарити мосту: 160x13x15 м.

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

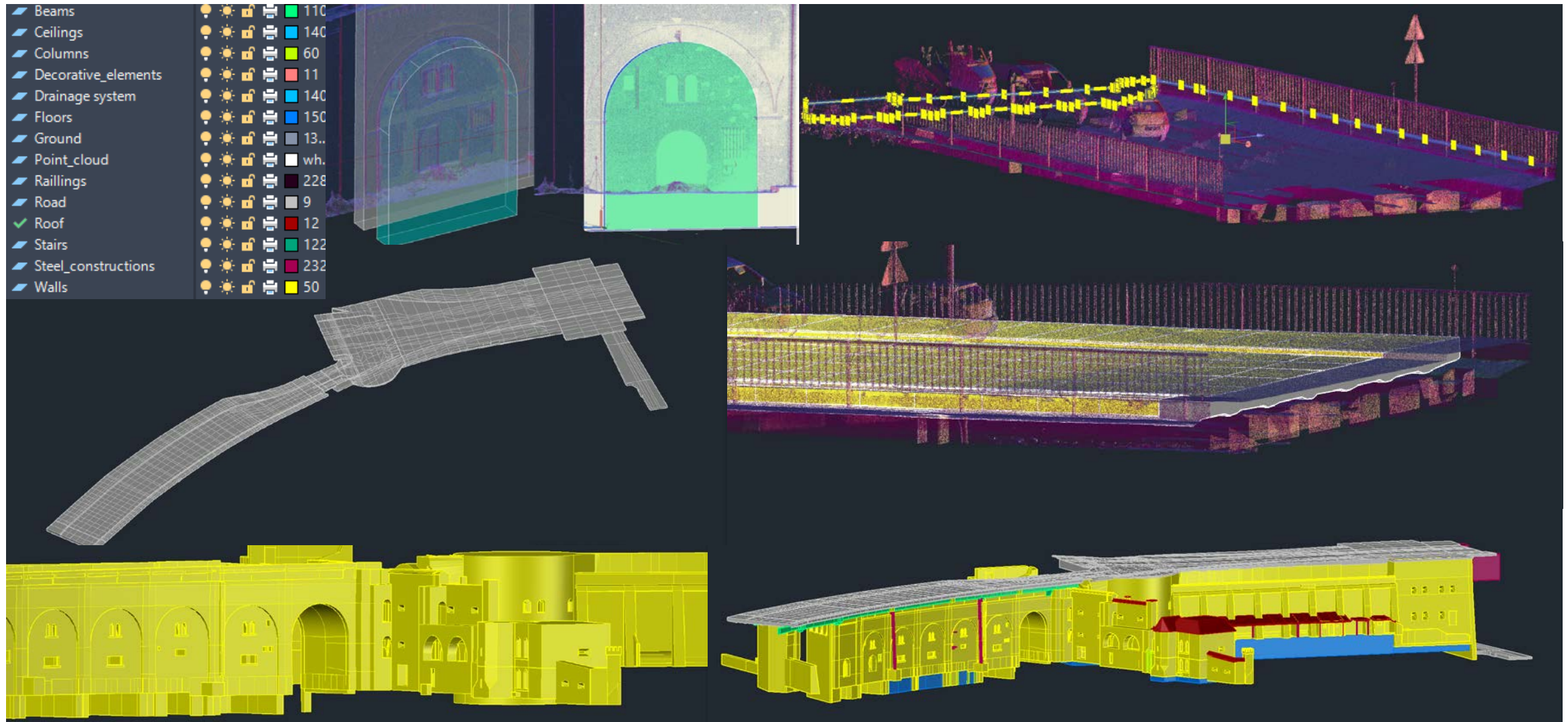
Стан: аварійний.

Призначення: оцінка деформацій.

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

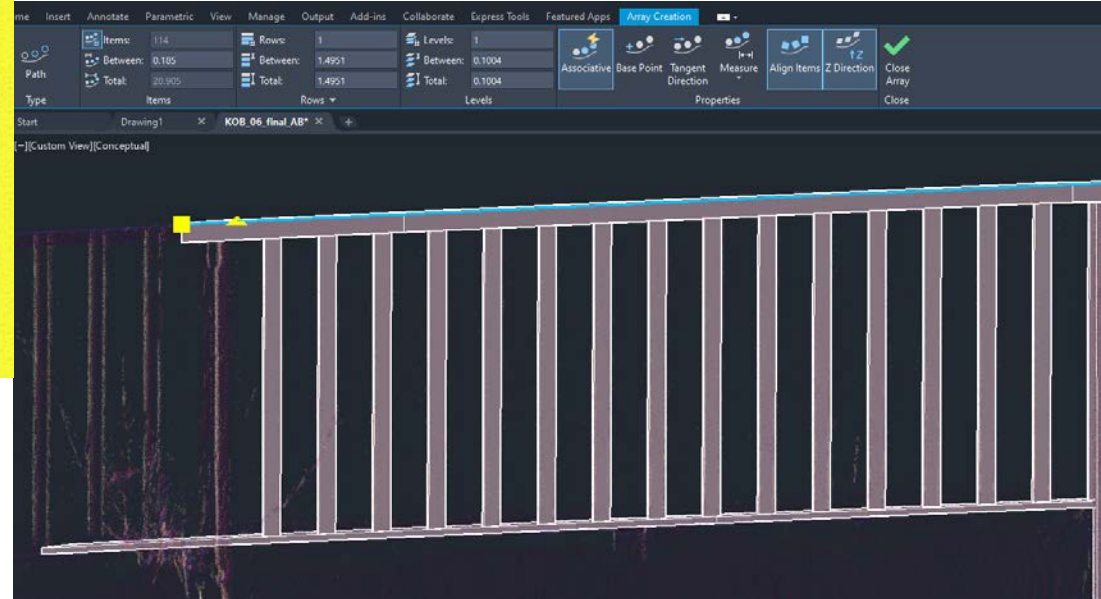
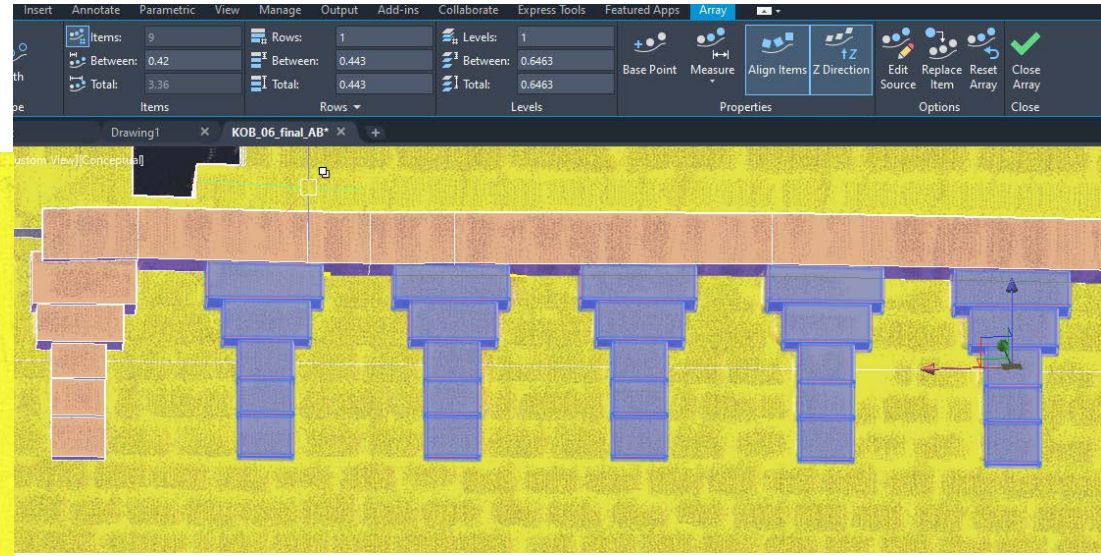
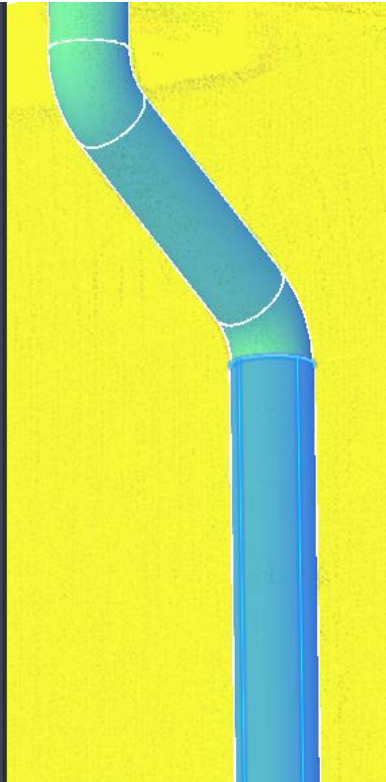


МОДЕЛЮВАННЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

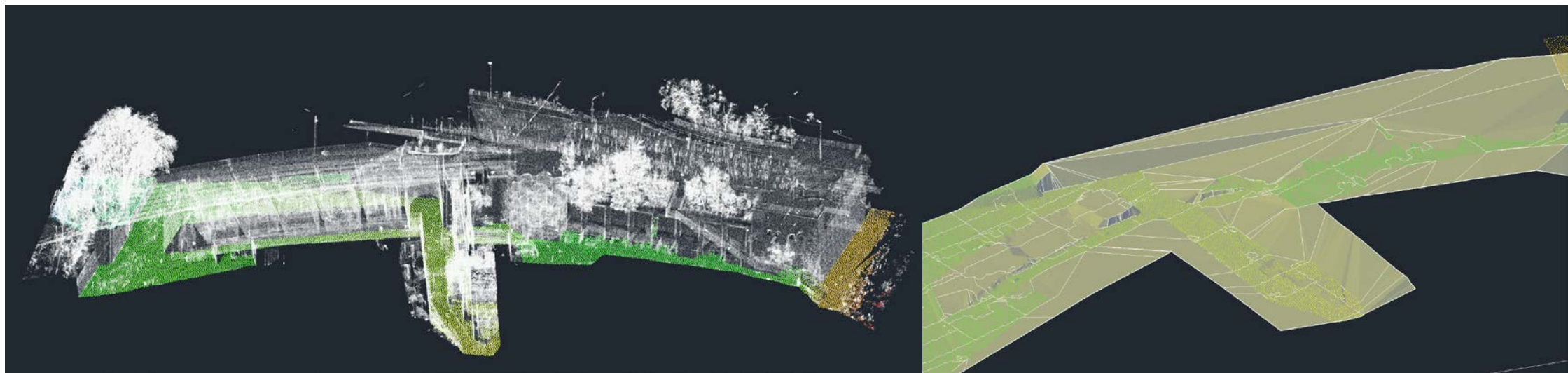
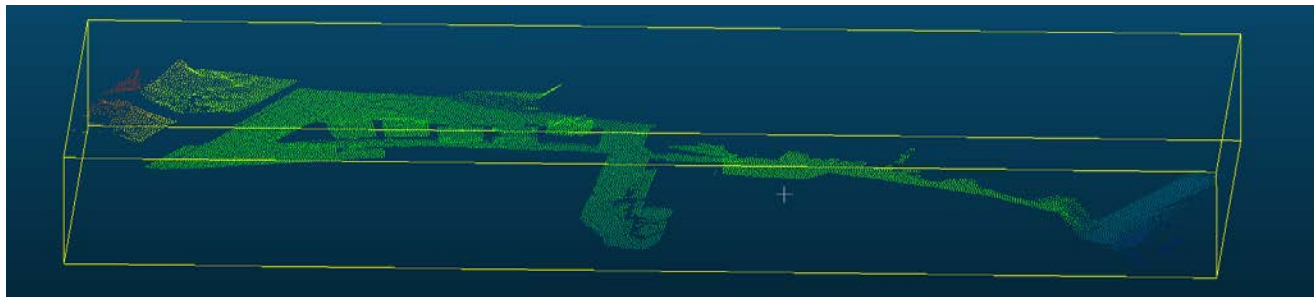


МОДЕЛЮВАННЯ ДРУГОРЯДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

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

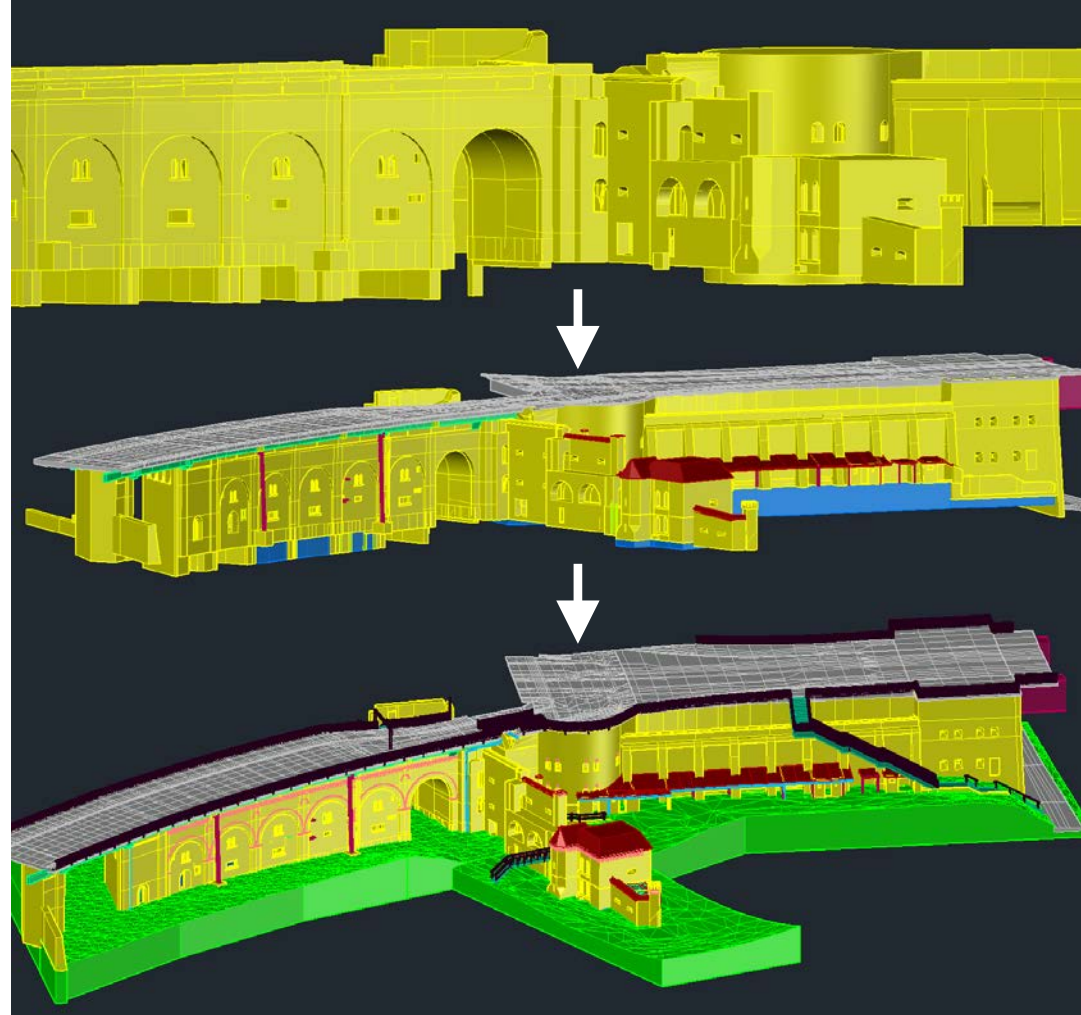


ПРОЦЕС МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ

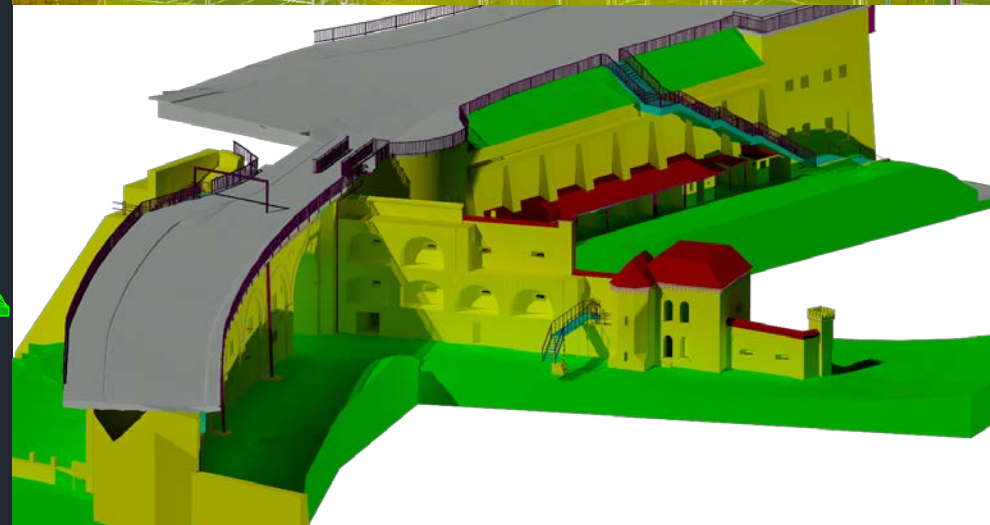
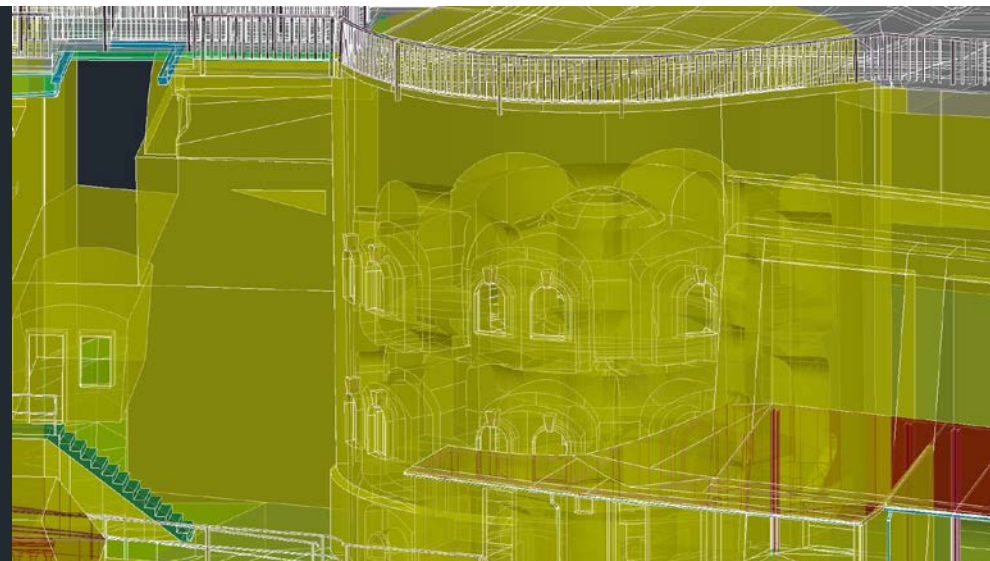
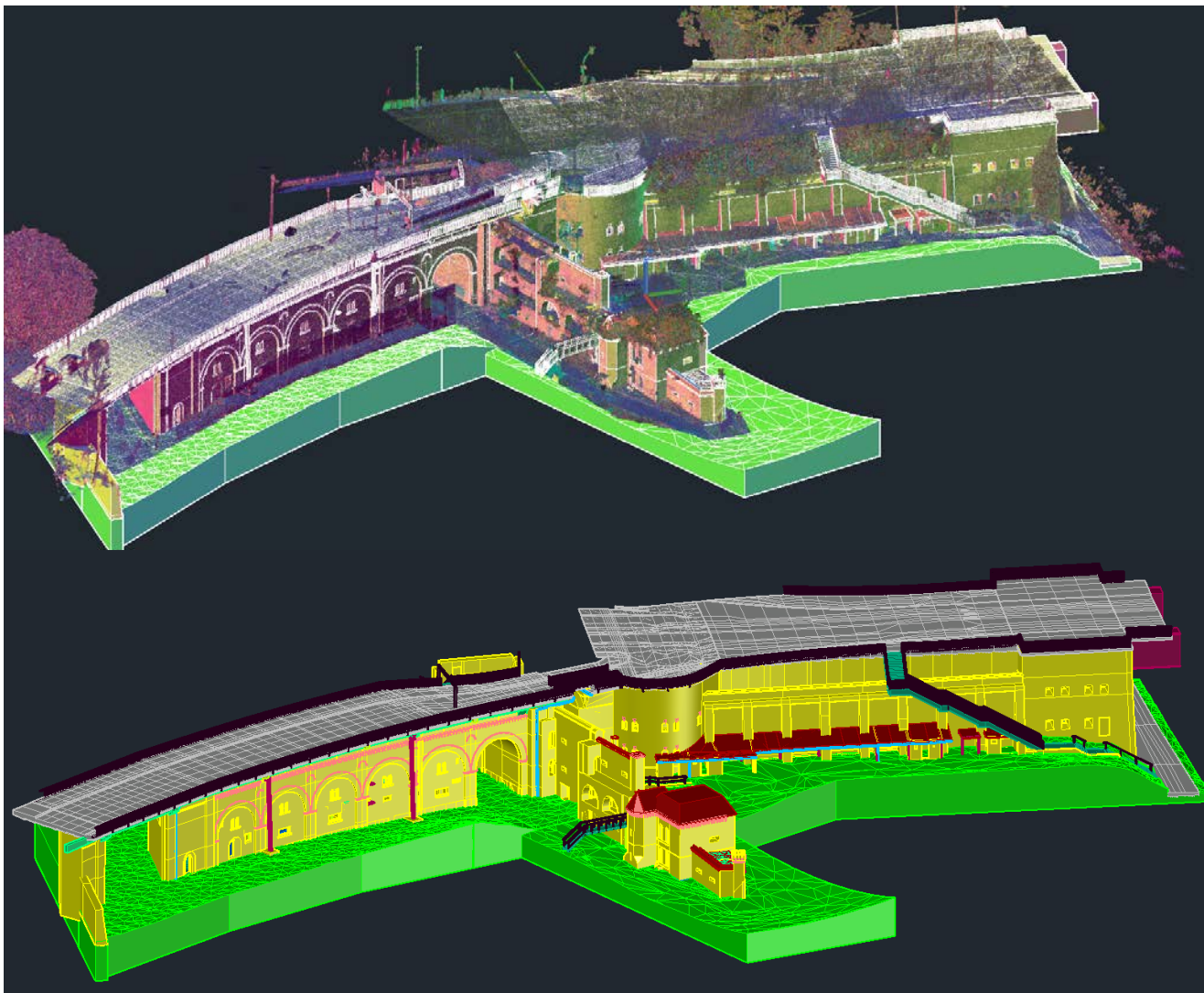
**1. МОДЕЛЮВАННЯ
ОСНОВНИХ
КОНСТРУКТИВНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ**

**2. МОДЕЛЮВАННЯ
ДОДАТКОВИХ
КОНСТРУКТИВНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ**

**3. МОДЕЛЮВАННЯ
ДРУГОРЯДНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ТА
РЕЛЬСФУ**

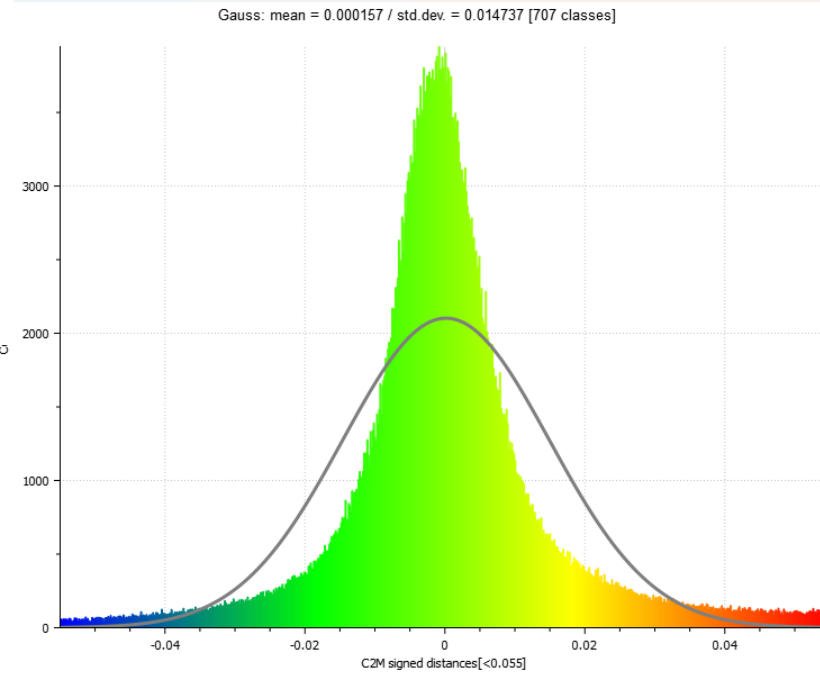
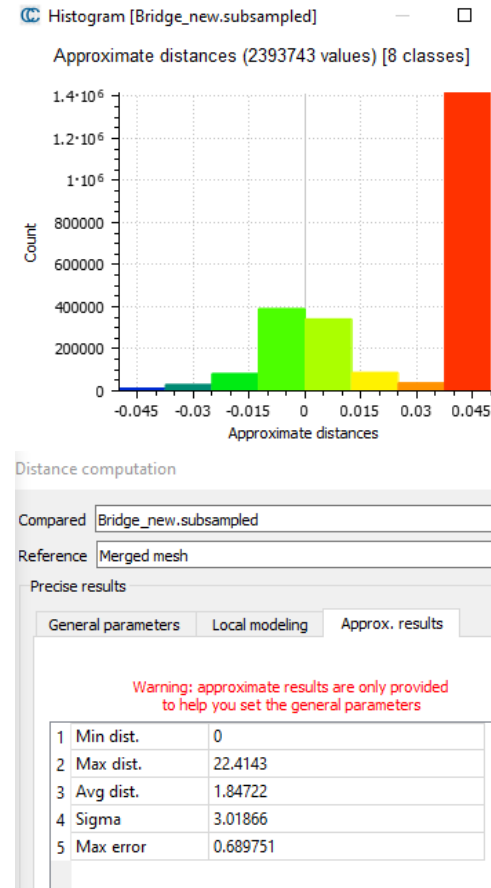
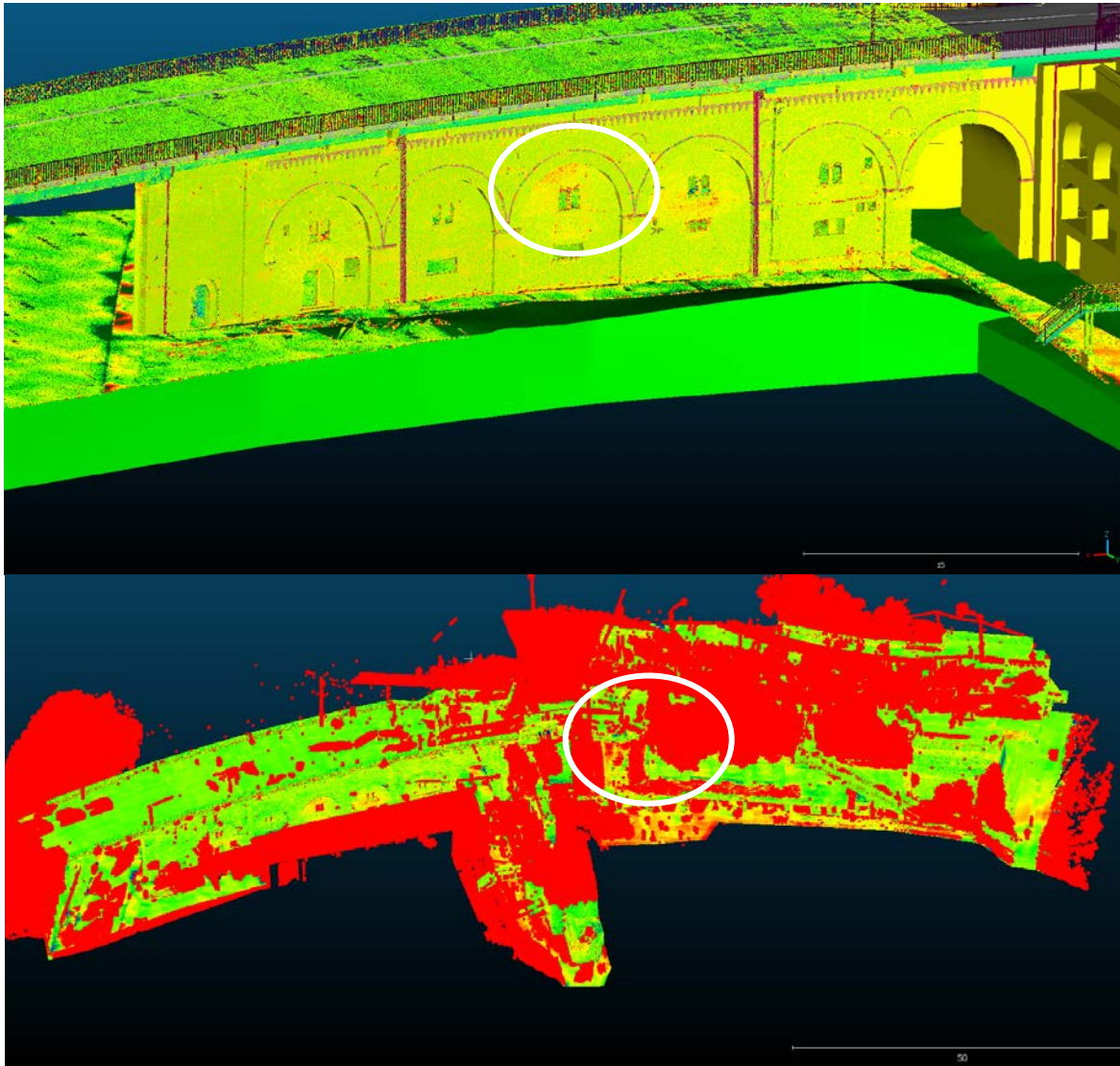


РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ





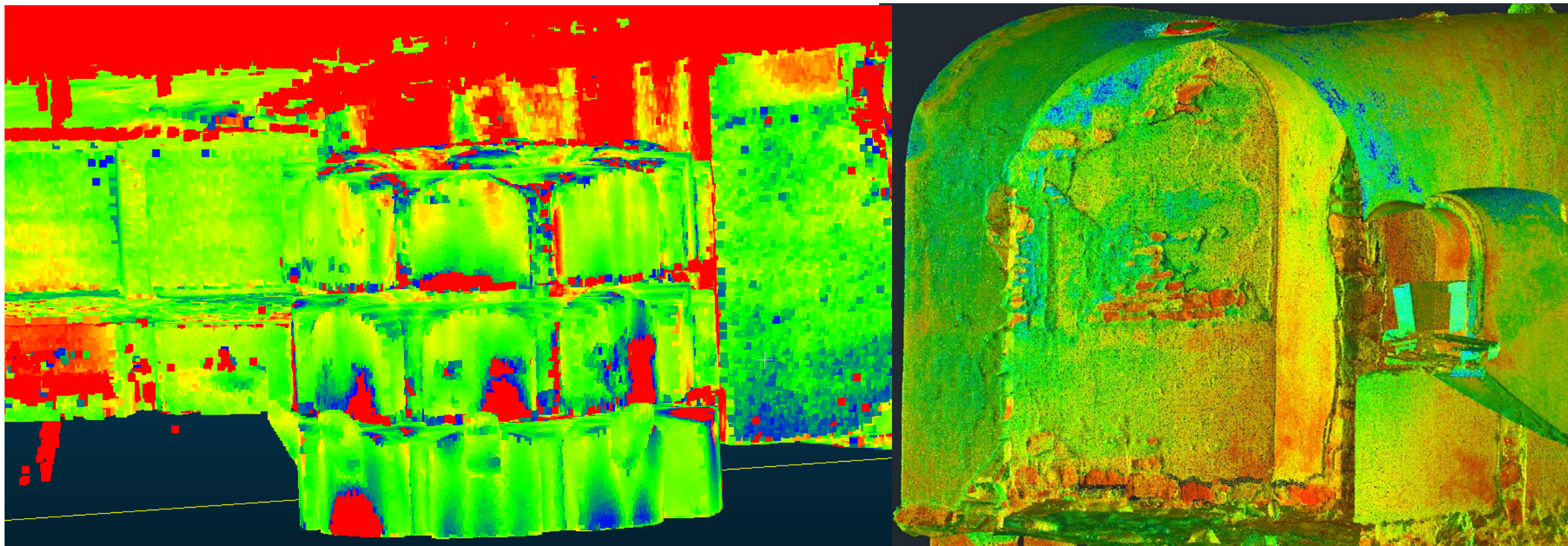
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ПФАФФЕНДОРФ



Як видно з рисунків та гістограми, 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)

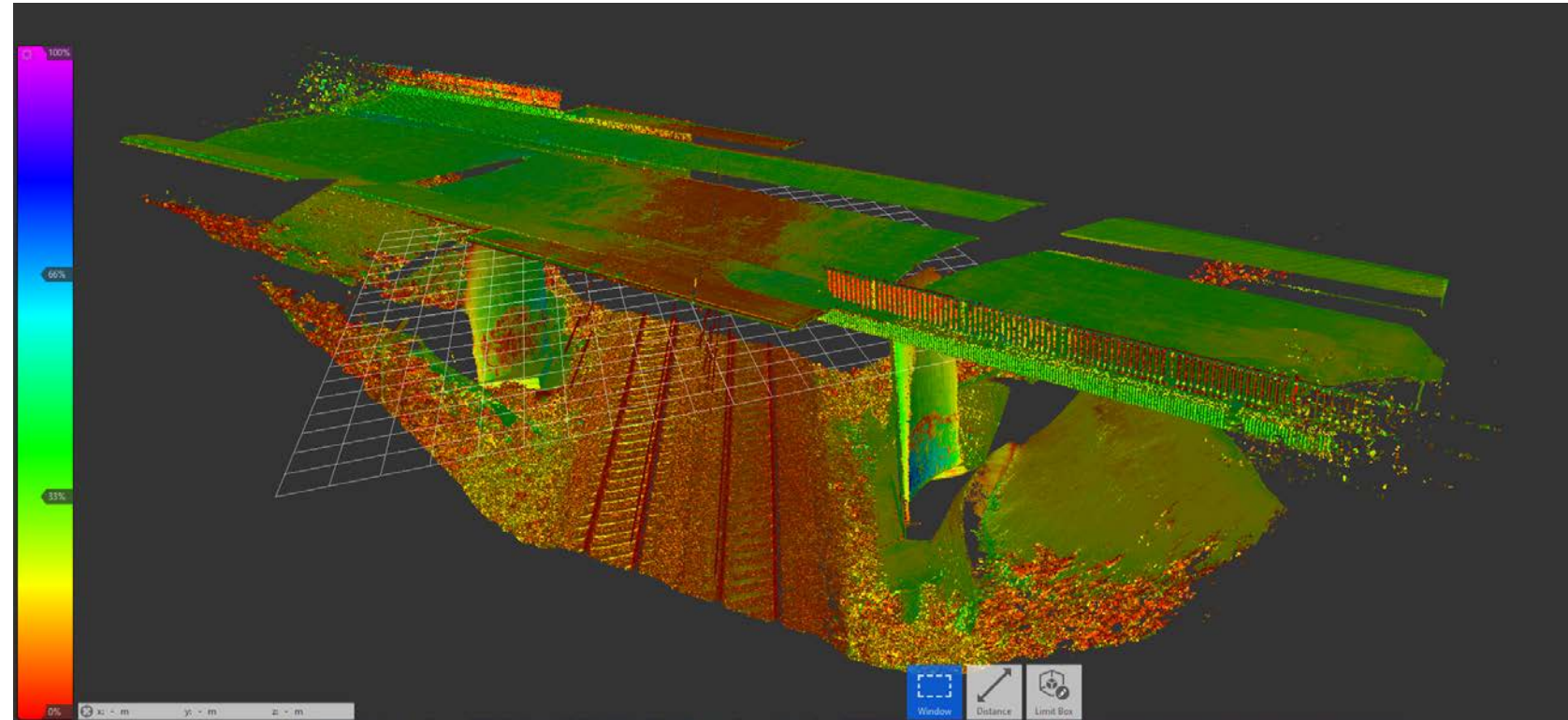
Габарити мосту: 50x10x8 м

Тип: балковий міст.

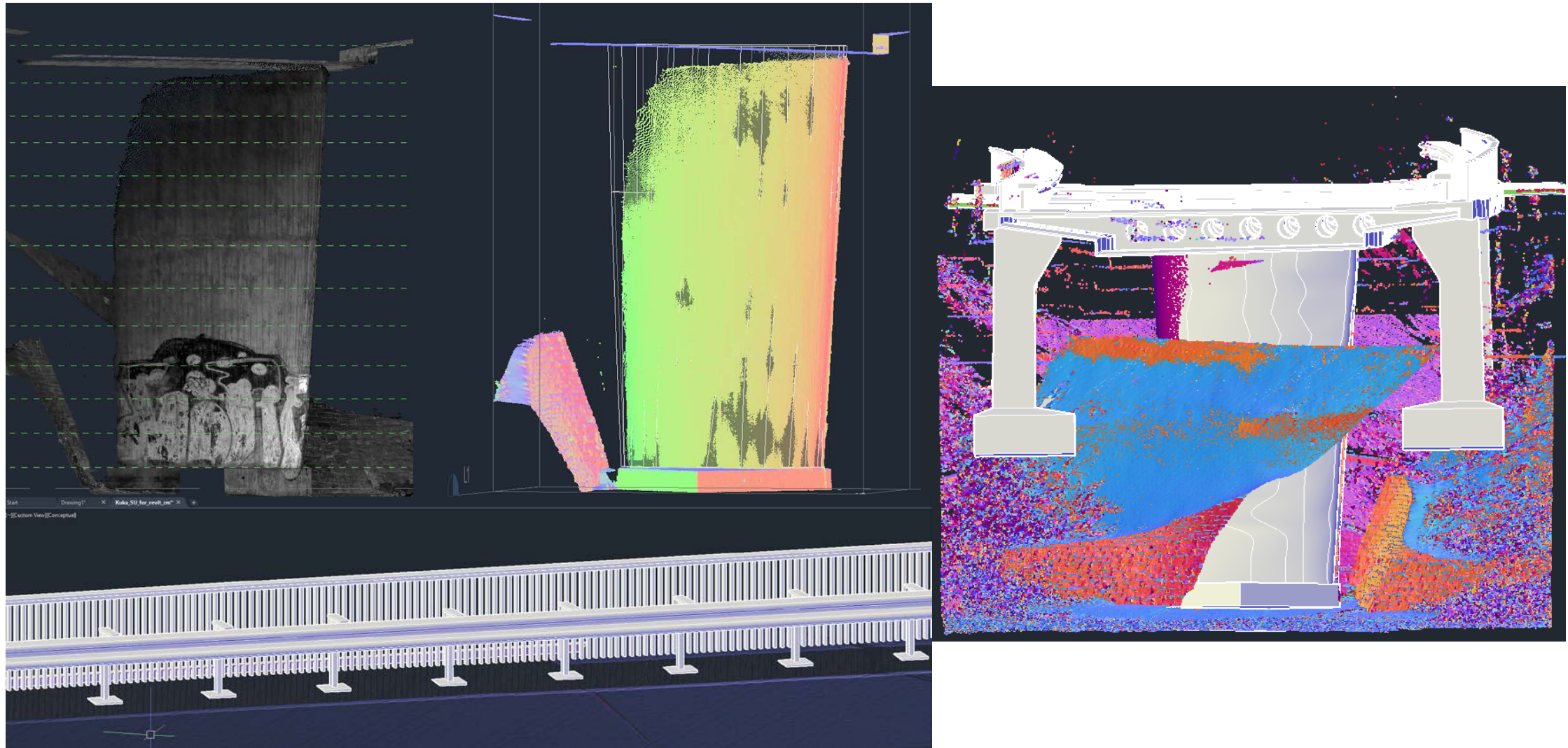
Стан: задовільний

Призначення моделі: для прокладання комунікацій.

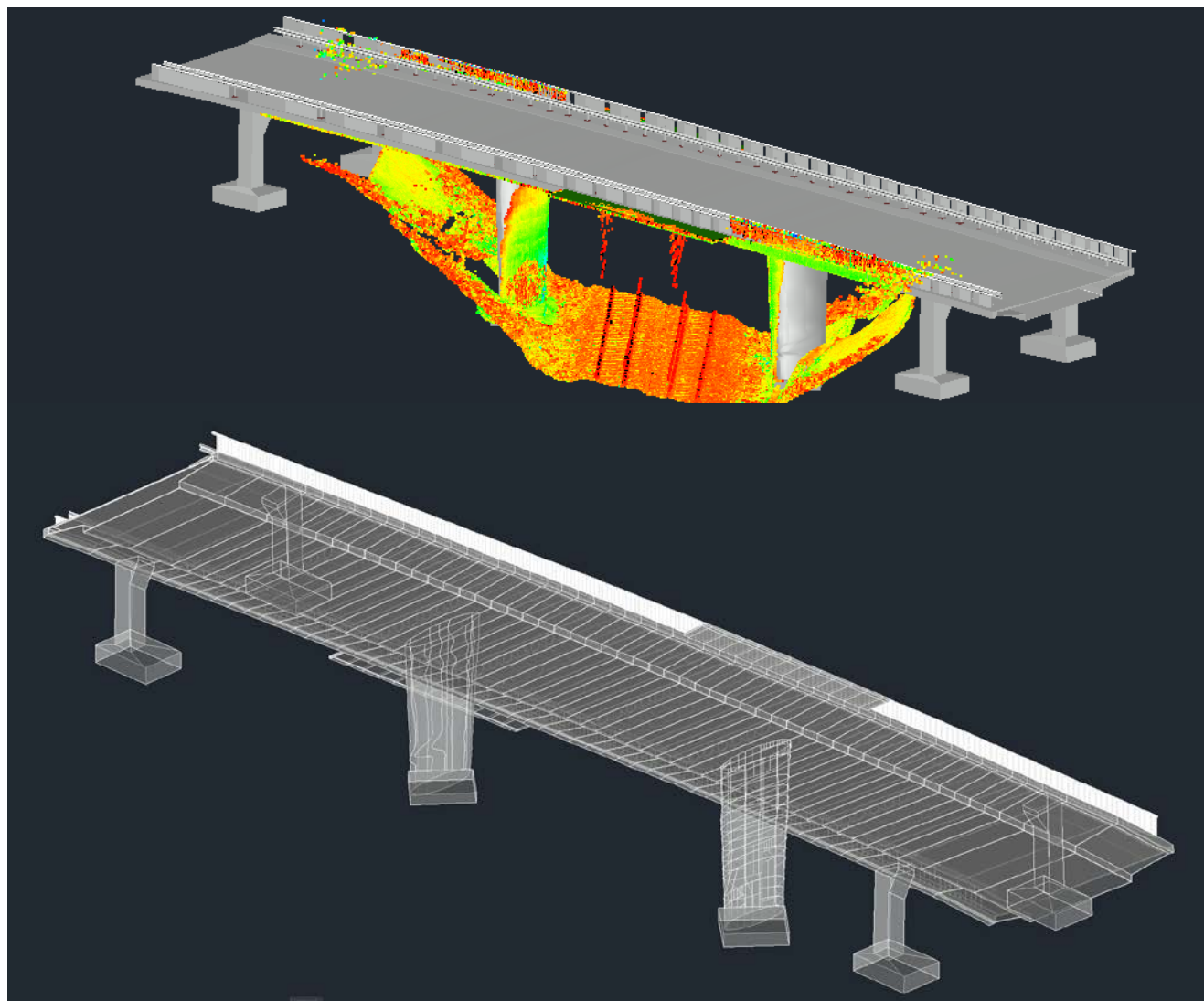
Точність моделювання: 1 см.



МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ (НІМЕЧЧИНА)

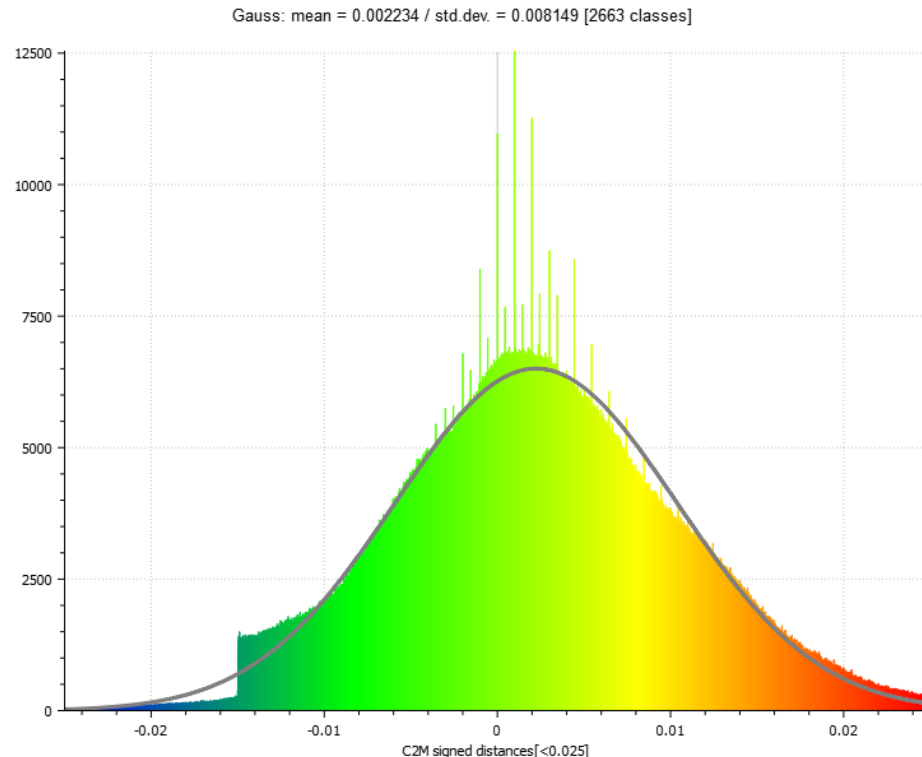
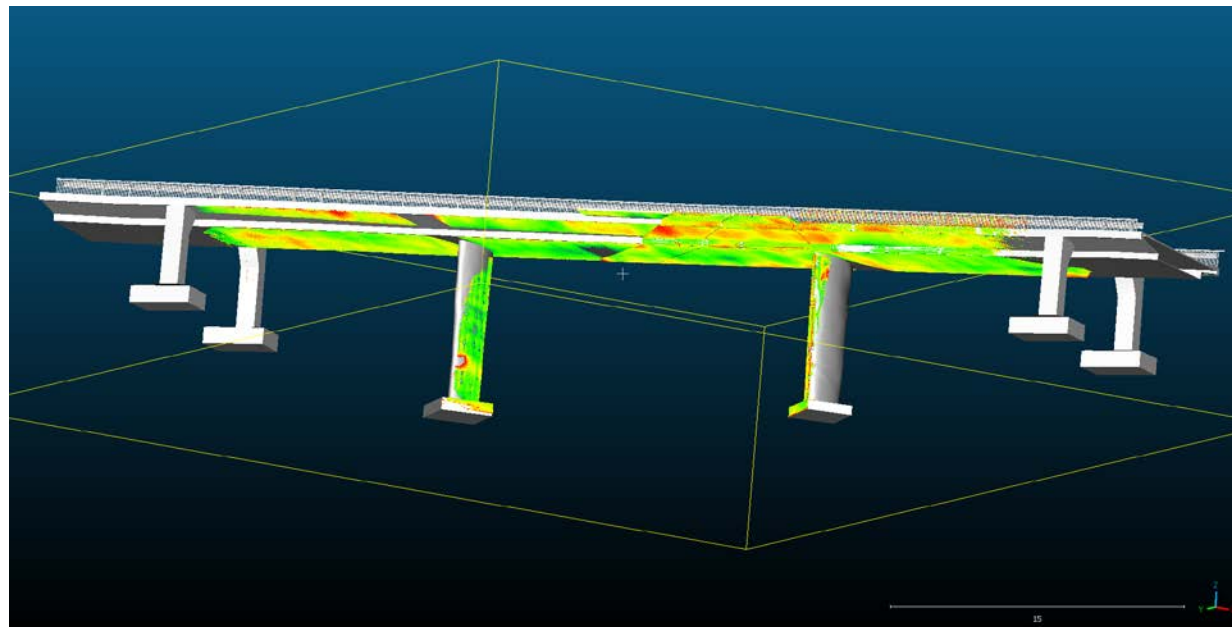


РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ





ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ У МІСТІ ШТУТГАРТ



Distance computation

Compared: SÜ K35

Reference: Merged mesh

Precise results

General parameters Local modeling Approx. results

Warning: approximate results are only provided to help you set the general parameters

1 Min dist.	0
2 Max dist.	9.36768
3 Avg dist.	3.11041
4 Sigma	2.95188
5 Max error	0.217208

Histogram [SÜ K35]

Approximate distances (19786523 values) [8 classes]

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 вагомe значення для сучасної інженерної практики.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ