The Bridge BIM

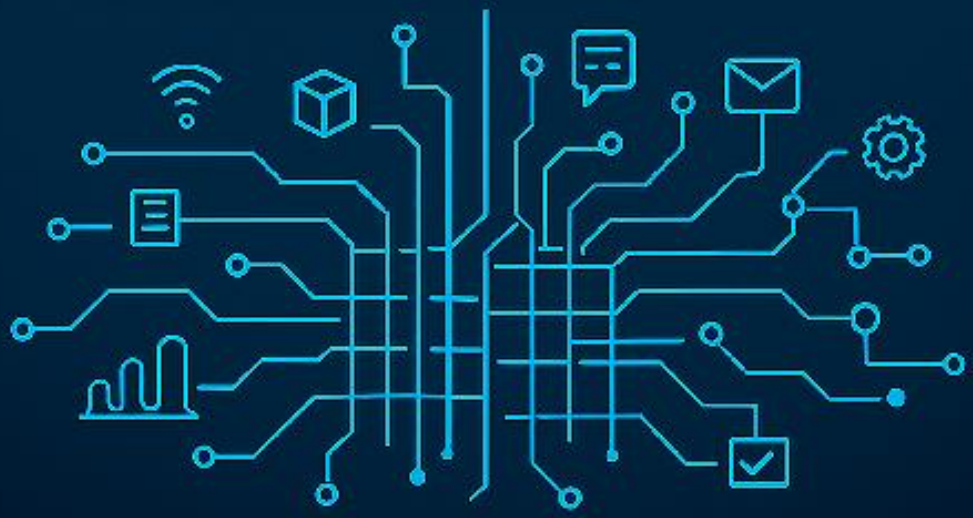
architecture
engineering
construction

Co-funded by the European Union

BIM

Building Information Modeling

ЦИФРОВА ІНФРАСТРУКТУРА БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ



BIM: ЦИФРОВА ІНФРАСТРУКТУРА БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ

BIM: THE DIGITAL INRASTRUCTURE OF CONSTRUCTION PROJECTS

The project is co-funded by the European Union, but all expressed views and opinions are strictly the authors' responsibility and do not necessarily reflect the views of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency. Neither the European Union nor the grant provider can be held responsible for them.

Co-funded by the European Union

The Bridge BIM architecture engineering construction

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Зіновій Бліхарський, Сергій Була,
Ярослав Бліхарський, Надія Копійка

BIM:
ЦИФРОВА ІНФРАСТРУКТУРА БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ

Навчальний посібник

Львів
Видавництво Львівської політехніки

2025

УДК
Б 36

Бліхарський Зіновій Ярославович, д-р техн. наук, професор
Була Сергій Степанович, канд. техн. наук, доцент;
Бліхарський Ярослав Зіновійович, д-р техн. наук, професор
Копійка Надія Сергіївна, PhD, асистент;

Рекомендувала Науково-методична рада
Національного університету «Львівська політехніка» як навчальний посібник
для здобувачів вищої освіти спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія»
(протокол № 3/2025 від 22.10.2025 р.)

Бліхарський Зіновій

Б 36 BIM: Цифрова інфраструктура будівельних проєктів: навч. посібник / Зіновій Бліхарський, Сергій Була, Ярослав Бліхарський, Надія Копійка. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. Режим доступу: vlp.com.ua/node/20999

ISBN 978-966-994-092-6

Посібник призначено для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія», а також для викладачів, проєктувальників та фахівців, які працюють із цифровими технологіями в будівництві, і видано за кошти проєкту № 101127884 «Подолання розриву між університетом і промисловістю: інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток «зелених» робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі» (ERASMUS-EDU-2023-CBHE-STRAND-2).

УДК

Lecture notes are intended for students of higher education institutions majoring in G19 «Construction and Civil Engineering», as well as for educators, designers, and specialists working with digital technologies in construction. They were published with the support of Project No. 101127884, titled «The BRIDGE – Bridging the Gap Between University and Industry: Master Curricula Supporting the Development of Green Jobs and Digital Skills in the Ukrainian Building Sector» (ERASMUS-EDU-2023-CBHE-STRAND-2).

Co-funded by the European Union

The Bridge BIM architecture engineering construction

© Бліхарський Зіновій, Була Сергій,
Бліхарський Ярослав, Копійка Надія, 2025
© Національний університет
«Львівська політехніка», 2025

ISBN 978-966-994-092-6

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТА СТАНДАРТИ ЦИФРОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В БУДІВНИЦТВІ 8

1.1. Вступ. Стандарти, настанови та нормативно-правові рамки BIM 8

1.2. Архітектура цифрової інфраструктури у будівельних проєктах 12

Рівні зрілості BIM (BIM Maturity Levels): від фрагментованих даних до інтегрованої реалізації 15

Виміри BIM (BIM Dimensions): Виміри BIM 17

Рівень опрацювання моделі (Level of Development LOD): структурований шлях до зрілості моделі 21

Від LOD до LOIN: визначення рівня інформації в BIM 25

1.3. Дані як актив життєвого циклу: від проєктування до виведення з експлуатації 29

Дані в BIM: основи 29

Типи та формати даних у BIM 31

Дані протягом життєвого циклу 37

1.4. Інтеграція «розумних» систем (Smart Systems) у BIM: синергії IoT, SCADA та BMS 46

Інтернет речей (Internet of Things, IoT): фундамент розумної інфраструктури 47

SCADA-системи у BIM-робочих процесах: до інтелектуального управління в реальному часі 50

Роль BMS у середовищах з BIM 55

Цифрові двійники для управління активами в режимі реального часу 63

РОЗДІЛ 2. РОЗУМНІ СИСТЕМИ, ХМАРНІ РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ТА СПІВПРАЦЯ В BIM 68

2.1. Хмарні BIM-платформи та пов’язані робочі процеси 68
Підходи Cloud-BIM для інтеграції потоків даних 70
Хмарний BIM: виклики, переваги та стратегії пом’якшення ризиків 73
2.2. BIM-інформаційні моделі та середовища: пояснення PIM, AIM, CDE та BEP78
Роль спільного середовища даних (CDE) та плану виконання BIM (BEP) у цифрових будівельних робочих процесах 79
Поєднання проєктування, будівництва та експлуатації через інформаційні моделі 86
2.3. Визначення ролей у BIM-командах: забезпечення співпраці та відповідальності 89
BIM Manager (BIM-менеджер)..... 90
BIM-координатор (BIM Coordinator)..... 91
BIM Specialist (Author, Modeler)-Спеціаліст з BIM (автор, моделер)..... 93
РОЗДІЛ 3. ЦИФРОВІ ПЛАТФОРМИ В BIM-СЕРЕДОВИЩАХ..... 101
3.1. Огляд BIM‑інструментів..... 101
3.2. BIM‑застосунки..... 102
3.2.1. Інструменти моделювання 102
3.2.2. Інструменти координації (перевірки)..... 113
3.2.3. Інструменти для будівництва та польових робіт 119
3.3 Платформи для співпраці 126
3.4 Інструменти структурування та управління даними 129
РОЗДІЛ 4. ОБМІН ДАНИМИ ТА ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНІСТЬ 131
4.1. Огляд форматів обміну 131
4.2. Формати даних 133
4.2.1 Industry Foundation Classes (IFC) 133

4.2.2 BIM Collaboration Format (BCF) 136

4.2.3 Construction Operations Building Information Exchange (COBie)..... 138

4.2.4 Data Sheets and Product Data Templates (PDTs) 139

4.2.5 Семантичні сервіси 140

4.3 Методології та специфікації для обміну інформацією..... 143

4.3.1. Information Delivery Manual (IDM) 143

4.3.2. Model View Definitions (MVDs) 145

4.3.3. Information Delivery Specification (IDS) 147

4.3.4. Сертифікація програмного забезпечення 150

ГЛОСАРІЙ 152

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 162

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТА СТАНДАРТИ ЦИФРОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В БУДІВНИЦТВІ

1.1. Вступ. Стандарти, настанови та нормативно-правові рамки BIM

Інформаційне моделювання будівель (Building Information Modelling, BIM) стало трансформаційним підходом у будівництві, що виходить за межі традиційного 3D-моделювання, забезпечуючи співпрацю, ефективність та управління життєвим циклом. Завдяки BIM усі учасники — архітектори, інженери, підрядники та власники — можуть ділитися точними цифровими відображеннями створюваних об’єктів, що сприяє узгодженому прийняттю рішень від етапу проєктування через будівництво, експлуатацію та подальше виведення з експлуатації. Хоча BIM часто асоціюється із сучасними технологіями, його витоки сягають кількох десятиліть.

Концепція BIM почала формуватися у 1970-х роках, зумовлена потребою у більш ефективних процесах проєктування та будівництва. Чарльз М. Істмен, піонер комп’ютерного проєктування, у 1975 році представив концепцію інформаційної моделі. Ця система використовувала графічний інтерфейс користувача та реляційну базу даних для управління будівельними даними, закладаючи основу для того, що згодом стало відомим як BIM [1]. У наступні роки Істмен розробив Graphical Language for Interactive Design (GLIDE), яка розширила можливості BDS, включивши більше будівельних елементів і підвищивши точність даних. Ці ранні системи прагнули інтегрувати різні аспекти будівельного проєкту в єдину узгоджену модель, виходячи за межі обмежень традиційних 2D-креслень.

У 1980–1990-х роках відбулися суттєві досягнення у програмному забезпеченні BIM. У 1987 році Graphisoft випустила ArchiCAD, один з перших додатків BIM, який дозволяв архітекторам створювати віртуальні моделі будівель. Це стало зсувом від простих 2D CAD-інструментів до більш складних 3D-платформ [1]. У 1990-х роках з’явилися інші значущі інструменти BIM, зокрема RUCAPS, Sonata та Reflex. Ці додатки дозволяли користувачам моделювати будівельні компоненти та системи, забезпечуючи більш детальне і точне відображення

будівель. Розробка стандарту Industry Foundation Classes (IFC) у середині 1990-х років ще більше сприяла інтероперабельності між різними BIM-програмами, що забезпечило більш безперешкодний обмін даними [2].

Початок 2000-х років став поворотним моментом для BIM із появою Autodesk Revit у 2002 році. Revit був спеціально розроблений для BIM, пропонуючи інтегровані інструменти для 3D-моделювання, управління даними та співпраці. Його придбання компанією Autodesk у 2002 році суттєво прискорило впровадження BIM у галузі архітектури, інженерії та будівництва (AEC). У цей період уряд Великої Британії зробив використання BIM обов'язковим для державних проєктів, що сприяло його поширенню та створило прецедент для інших країн. Водночас BIM розвинувся до включення додаткових вимірів: 4D (час), 5D (вартість) і 6D (сталий розвиток), надаючи комплексний інструментарій для управління всіма аспектами життєвого циклу будівлі [1]. Деталі розвитку наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Хронологія розвитку BIM

Рік	**Подія**
1975	Чарльз Істмен представляє концепцію BIM
1987	Graphisoft випускає ArchiCAD — один із перших BIM-додатків
1992	Уперше використано термін «Building Information Modeling»
1997	Заснування Revit Technologies, згодом придбано Autodesk у 2002 р.
2002	Autodesk купує Revit, що стало важливою віхою у впровадженні BIM
2003	Національний інститут будівельних наук засновує buildingSMART Alliance
2007	Уряд Великої Британії робить BIM обов'язковим для державних проєктів
2010-ті	Розширення BIM до 4D (час), 5D (вартість), 6D (сталий розвиток)
2020-ті	BIM стає стандартом у будівництві, вдосконалюється завдяки AI, ML і хмарним технологіям

У майбутньому BIM продовжить розвиватися. Очікується, що досягнення у сфері штучного інтелекту та машинного навчання автоматизуватимуть завдання, підвищуватимуть точність і забезпечуватимуть прогнозні аналітичні можливості. Хмарні платформи сприятимуть співпраці в реальному часі між усіма учасниками незалежно від їхнього розташування. Додаткова інтеграція Інтернету речей (IoT) з

BIM забезпечить моніторинг і управління системами будівлі у реальному часі, сприяючи підвищенню ефективності та сталості.

Успішне впровадження BIM залежить не лише від програмного забезпечення та навичок моделювання, а й від дотримання стандартів і нормативів. Ці рамки забезпечують інтероперабельність між платформами, правову відповідність і послідовність подання інформації, що дозволяє ефективно виконувати будівельні проєкти, мінімізуючи ризики помилок або втрати даних. Стандарти становлять основу структурованих робочих процесів, підтримуючи інтеграцію BIM із «розумними» технологіями, цифровими двійниками та системами управління об'єктами.

У світі існує низка стандартів, що регулюють використання BIM. Серія ISO 19650 є міжнародним еталоном управління інформацією за допомогою BIM. Вона визначає принципи та процеси управління інформацією протягом усього життєвого циклу будівлі — від задуму через проєктування, будівництво, експлуатацію та виведення з експлуатації. Серія наголошує на важливості співпраці, чіткого розподілу ролей і структурованої передачі даних для досягнення ефективних результатів.

Українські стандарти, що регулюють BIM

Україна розробила комплекс стандартів для впровадження BIM у будівельній галузі. Вони узгоджені з міжнародними практиками, водночас враховують національні особливості. Серед основних [3]:

- **ДСТУ EN ISO 16757-2:20XX** — регламентує геометричні параметри будівельних виробів і обладнання, визначаючи принципи їх моделювання для забезпечення обміну даними та інтероперабельності.
- **ДСТУ EN ISO 21597-1:20XX** — відкритий формат для передачі, зберігання та архівування документів, пов'язаних з об'єктами.
- **ДСТУ EN ISO 23386:20XX** — правила створення та підтримання словників даних, що використовуються в BIM.

- **ДСТУ EN ISO 23387:20XX** — принципи побудови шаблонів даних, що забезпечують цифрове представлення інформації у машиночитному форматі.
- **ДСТУ EN ISO 29481-2:20XX** — методологія інформаційної передачі між учасниками будівельного проєкту.
- **ДСТУ ISO 15686-4:2020** — планування терміну служби з використанням BIM, включаючи методи прогнозування та перевірки експлуатаційної довговічності будівель та споруд.

Ці стандарти формують надійну основу для впровадження BIM в Україні, сприяючи послідовності, ефективності та інтеграції в міжнародний контекст.

Європейський Союз: стандарти EN ISO для інформаційного моделювання

У ЄС впровадження BIM підтримується низкою EN ISO-стандартів, які гармонізують практики між країнами. Найбільш значущі:

- **EN ISO 16739** — визначає Industry Foundation Classes (IFC), відкриту специфікацію для обміну даними у будівництві та управлінні об’єктами.
- **EN ISO 19650** — серія стандартів, що визначає принципи управління інформацією за допомогою BIM.

IFC виступає нейтральною відкритою схемою для інтероперабельності між різними програмами, забезпечуючи обмін складними даними без втрат. COBie (Construction Operations Building Information Exchange) структурує дані для етапу експлуатації та технічного обслуговування, забезпечуючи наявність у менеджерів повних та точних відомостей про активи. Серед інших важливих стандартів — ISO 16739 (основа для IFC), PAS 1192 (Велика Британія, попередник ISO 19650), National BIM Standard (США).

Використання BIM пов’язане з юридичними питаннями щодо прав власності на дані, відповідальності та інтелектуальної власності. Стандарти й контрактні угоди уточнюють обов’язки зі створення, перевірки та оновлення даних, а також відповідальність за помилки. Плани виконання BIM (BEP) формалізують робочі процеси, ролі та deliverables для кожного проєкту. Загальне середовище даних

(CDE) забезпечує централізоване зберігання та обмін, контроль версій, відстежуваність і безпечну співпрацю. Стандарти визначають, як моделі BIM створюються, передаються та використовуються. Вони гарантують їх узгодженість, сумісність та готовність до інтеграції з «розумними» системами — IoT, SCADA, BMS, цифровими двійниками. Відповідність стандартам також підтримує управління життєвим циклом, забезпечуючи ефективну експлуатацію, обслуговування та довгострокове управління активами. Ці теми будуть детальніше розглянуті у наступних розділах.

Спираючись на цю основу, наступний підрозділ розкриє технічну структуру цифрових моделей, зрілість BIM, визначення LOD/LOIN та інтеграцію життєвого циклу, поєднуючи нормативні рамки з практичними робочими процесами.

1.2. Архітектура цифрової інфраструктури у будівельних проєктах

Цифрова трансформація галузі архітектури, інженерії та будівництва (англ. Architecture, Engineering, and Construction,-AEC) зумовлена розвитком технологій та зростаючими вимогами до ефективності, прозорості та сталості [4]. У центрі цієї трансформації перебуває інформаційне моделювання будівель (англ. Building Information Modelling,-BIM)—процес та екосистема, що об’єднують цифрові інструменти, структуровані дані та колаборативні робочі процеси на всіх етапах життєвого циклу проєкту [5]. Зростаюче стратегічне значення BIM підтверджується сучасними ринковими прогнозами: за даними Allied Market Research (2023), глобальний ринок BIM досягне 34,2 млрд дол. США до 2032 року (див. табл. 1.2) [6]. Така виразна тенденція зростання підкреслює нагальну потребу у чіткому та глибокому розумінні принципів і цифрової інфраструктури, що лежать в основі BIM-орієнтованих проєктних середовищ.

Таблиця 1.2. Основні показники ринку інформаційного моделювання будівель за [6]

Аспект	Показники
Розмір ринку до 2032 р.	34,2 млрд дол. США
Темп зростання	Середньорічний приріст (CAGR) — 16%

За способом розгортання	• Локальне розгортання • Хмарне розгортання
За типом будівель	• Комерційні • Житлові
За застосуванням	• • Планування та моделювання • Проєктування та будівництво • Управління активами • Аналіз будівельних систем та планування техобслуговування
За кінцевим користувачем	• Архітектори/інженери • Підрядники • Інші
За компонентом	• Рішення • Послуги
За регіоном	• Північна Америка (США, Канада) • Європа (Велика Британія, Німеччина, Франція, Італія, Іспанія, решта Європи) • Азійсько-Тихоокеанський регіон (Китай, Японія, Індія, Південна Корея, Австралія, решта регіону) • LAMEA (Латинська Америка, Близький Схід, Африка)
Провідні гравці ринку	Autodesk Inc., HEXAGON AB, Dassault Systèmes, Beck Technology Ltd., Asite Solutions Ltd., Trimble Inc., Pentagon Solutions Ltd., Nemetschek Group, Bentley Systems Incorporated, AVEVA Group PLC

За визначенням Autodesk (2025) [7], BIM — це «комплексний процес створення та управління інформацією про об’єкт будівництва. Заснований на інтелектуальній моделі та підтримуваний хмарною платформою, BIM інтегрує структуровані, мультидисциплінарні дані для створення цифрового представлення об’єкта протягом усього його життєвого циклу — від планування і проєктування до будівництва та експлуатації».

Однак BIM — це не лише інструмент моделювання. Він є соціотехнічною системою, у якій поєднуються цифрова інфраструктура, людські ресурси та управлінські рамки. BIM дає змогу мультидисциплінарним командам спільно розробляти, обмінюватися та управляти цифровим двійником об’єкта, який постійно оновлюється на всіх етапах — від планування і проєктування до будівництва, експлуатації та виведення з експлуатації.

BIM-модель (рис. 1.1) складається з інтелектуальних об’єктів, які є одночасно параметричними та інформаційно насиченими. Ці об’єкти —

конструктивні елементи, інженерне обладнання, меблі або енергетичні системи — мають як графічні атрибути (геометрія), так і неграфічні дані (матеріальні характеристики, показники ефективності, вартість життєвого циклу, графіки обслуговування). Виділяють два основні типи BIM-об'єктів [8]:

- **Узагальнені об'єкти** — застосовуються на ранніх етапах проєктування, відображають просторові та функціональні взаємозв'язки без деталізації експлуатаційних показників. Використовуються для дослідження варіантів планувальних рішень та об'ємно-просторової структури.
- **Об'єкти конкретних виробників** — вводяться на етапах детального проєктування та закупівель, мають точні геометричні характеристики і містять реальні технічні дані: несучу здатність, сертифікати відповідності, екологічні показники тощо. Служать основою для закупівель, виготовлення та оцінки вартості життєвого циклу.

BIM-об'єкти містять як графічну інформацію (2D-плани, розрізи, фасади, 3D-геометрія), так і неграфічні метадані (властивості матеріалів, технічні параметри, дані виробника, вимоги до планування робіт, вартість, енергоспоживання, вуглецевий слід, графіки техобслуговування) на визначеному рівні деталізації.

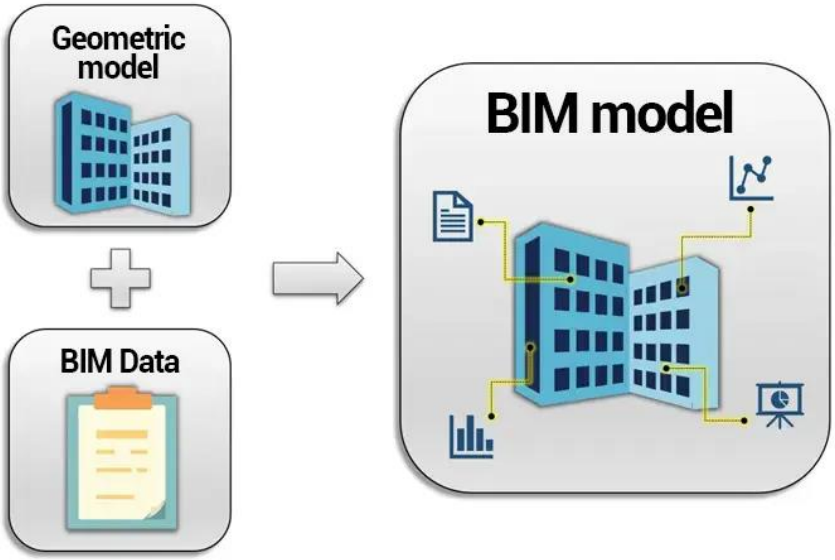


Рис. 1.1. Різні типи даних в BIM- моделі [9]

Рівні зрілості BIM (BIM Maturity Levels): від фрагментованих даних до інтегрованої реалізації

Концепція рівнів зрілості BIM описує поступові стадії розвитку галузі у сфері співпраці, обміну інформацією та технологічної інтеграції. Рівні від 0 до 3 і вище (рис. 1.2) використовуються як еталонні показники для оцінки впровадження BIM-методологій у проєктах та організаціях [10,11-16].

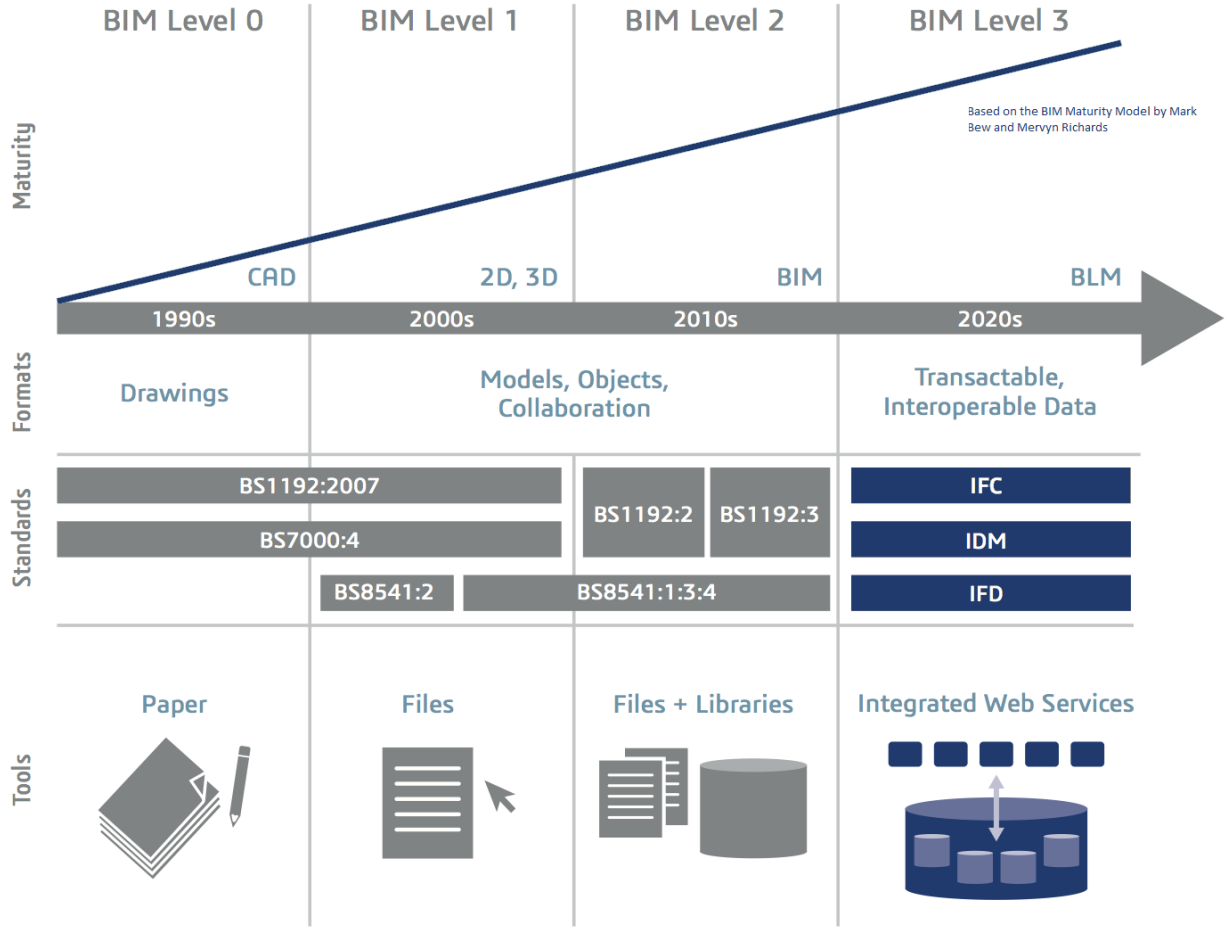


Рис. 1.2. Рівні зрілості в BIM Maturity (Mark Bew і Mervyn Richards в [10]):Tools: paper, files, integrated web services; Standards; Formats: drawings, models, objects, collaboration, transactable interoperable data (Інструменти: паперові носії, файли, інтегровані вебсервіси; Стандарти; Формати: креслення, моделі, об'єкти, співпраця, транзакційні інтероперабельні дані)

Рівень 0 (Level 0): традиційні практики з мінімальною співпрацею. На початковому рівні 0 галузь переважно працює за традиційними методами, головним нововведенням є створення 2D-креслень за допомогою систем

автоматизованого проєктування (САПР). Обмін інформацією обмежується ручними кресленнями, паперовими документами або електронними копіями креслень, при цьому цифрова взаємодія між учасниками майже відсутня [17]. Кожен учасник працює ізольовано, що призводить до можливих розбіжностей та неефективності через відсутність інтегрованих робочих процесів і спільних середовищ даних [18].

Рівень 1 (Level 1): поява цифрових інструментів та часткова співпраця. На рівні 1 помітний зсув у бік цифровізації — запроваджуються як 2D-, так і 3D-CAD інструменти. Окремі дисципліни починають використовувати цифрові методи, але співпраця залишається обмеженою. Обмін даними здійснюється через спільне середовище даних (Common Data Environment, CDE), що покращує управління інформацією. Однак моделі все ще розробляються відокремлено (in silos), і немає єдиного підходу до інтеграції даних між командами.

Рівень 2 (Level 2): посилена співпраця через федеративні моделі. Рівень 2 означає суттєвий прогрес у зрілості BIM та акцентує увагу на колаборативних практиках роботи. Тут усі учасники створюють власні 3D-моделі, які потім об’єднуються у федеративну модель. Такий підхід забезпечує кращу координацію та виявлення колізій, оскільки моделі різних дисциплін інтегруються у спільному середовищі [18,19]. Використання стандартизованих форматів, таких як IFC (Industry Foundation Classes), гарантує сумісність та ефективний обмін інформацією. Цей рівень також відповідає принципам, викладеним у ISO 19650, що сприяє структурованому управлінню інформацією протягом усього життєвого циклу проєкту.

Рівень 3 (Level 3): повна інтеграція та управління життєвим циклом. На рівні 3 BIM досягає свого найбільш розвиненого стану, який характеризується повною інтеграцією та співпрацею в режимі реального часу між усіма учасниками проєкту. Єдина, спільна модель служить центральним сховищем інформації, доступним для всіх зацікавлених сторін. Такий підхід на основі моделі забезпечує безшовний обмін даними та комплексне управління життєвим циклом — від проєктування і будівництва до експлуатації та обслуговування. Інтеграція

технологій, таких як хмарні обчислення та цифрові двійники, додатково розширює можливості BIM на цьому рівні, дозволяючи використовувати прогнозну аналітику та оптимізувати управління активами [8, 17]. Хоча рівень 3 є вершиною поточної зрілості BIM, галузь продовжує досліджувати перспективи розвитку за межами цього етапу [20].

Виміри BIM (BIM Dimensions): Виміри BIM

Як було пояснено в попередньому підрозділі, BIM представляє зсув парадигми від традиційних 2D-креслень до інтегрованих цифрових подань будівельних проєктів. Замість простого надання візуальних планів, BIM пропонує середовище, насичене даними, яке підтримує всі фази життєвого циклу споруди — від задуму до виведення з експлуатації. З часом BIM розширився, включивши декілька «вимірів», кожен з яких являє собою шар інформації, що підсилює планування, виконання та управління (рис. 1.3). Поширеною помилкою є ототожнення рівнів зрілості BIM із вимірами BIM, хоча це принципово різні поняття. Виміри BIM — це шари інформації, інтегровані у цифрову модель будівництва, кожен з яких підвищує цінність моделі на різних етапах життєвого циклу. BIM значно виходить за межі базового тривимірного (3D) моделювання — він охоплює додаткові «виміри», такі як час (4D), вартість (5D), сталість (6D) та інші. Ці виміри збагачують модель даними, які підтримують планування, виконання, експлуатацію та управління створеним активом.

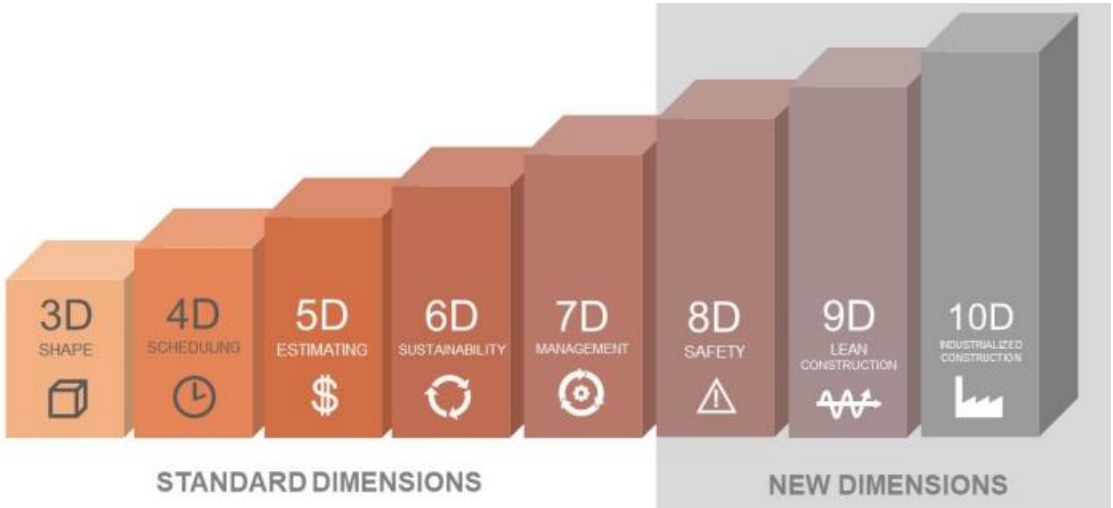


Рис. 1.3. Десять вимірів (BIM Dimensions) [19]: shape, scheduling, estimating, sustainability, management, safety, new construction, industrialised construction (форма, планування, оцінка, сталий розвиток, управління, безпека, нове будівництво, індустріальне будівництво)

Еволюція BIM зазвичай починається з **1D**, що стосується управління інформацією та документацією. Це забезпечує збір, структурування та поширення даних у межах команди проєкту, підтримуючи співпрацю через централізовані платформи обміну даними [21, 22]. **2D BIM** відповідає традиційним технічним кресленням — планам, фасадам і розрізам — які залишаються необхідними, але обмеженими у передаванні складних просторових взаємозв'язків або показників ефективності. Хоча 2D усе ще поширений на практиці, йому бракує глибини для задоволення сучасних потреб будівництва, таких як автоматизовані підрахунки обсягів. Отже, 2D надає статичний знімок, а не динамічний огляд проєкту [23]. Перехід до **3D BIM** запроваджує тривимірну геометрію, що дозволяє точну візуалізацію архітектурних, конструктивних і MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) компонентів. Це підсилює координацію між дисциплінами, підтримує виявлення колізій і забезпечує спільне розуміння проєктного задуму [25]. Важливо зазначити, що 3D BIM суттєво зменшує помилки проєктування та переробки, забезпечуючи спільну, точну модель [19]. Вимір 3D BIM визнається найпопулярнішим і найпоширенішим, запроваджуючи мінімальну вимогу для будівельного проєкту в більшості країн. Однак додаткові рівні інформації пропонують унікальний потенціал для подальшого збагачення цифрової моделі, значно виходячи за межі простого геометричного подання.

Включаючи часовий вимір, **4D BIM** інтегрує елементи 3D-моделі з календарним планом проєкту. Це дає змогу моделювати послідовності будівництва, планувати логістику та візуалізувати діяльність на майданчику в часі. Це покращує комунікацію між підрядниками та замовниками, прогнозуючи, як проєкт розгортатиметься день за днем [26]. **5D BIM** інтегрує кошторис у модель, пов'язуючи компоненти з питомими вартісними показниками та забезпечуючи

бюджетування в реальному часі. Це підтримує точніше тендерування, фінансове планування та вартісну інженерію. Кількості можна автоматично витягувати й пов'язувати з ціновими базами даних, що дає змогу в режимі реального часу здійснювати бюджетування та оптимізацію витрат протягом процесів проєктування і будівництва [27]. Більш того, 5D BIM дозволяє прогнозування вартості на основі змін у проєкті, підвищуючи прозорість і контроль упродовж бюджетного процесу [25]. Вимір **6D** вводить параметри сталості та енергетичної ефективності. Пов'язуючи елементи будівлі з екологічними даними — такими як теплотехнічні показники, викиди протягом життєвого циклу та споживання енергії — проєктувальники можуть оцінювати екологічний слід матеріалів і систем [28]. Щодо цього виміру важливо зазначити, що 6D BIM підтримує сертифікації на кшталт LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) або BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), забезпечуючи екологічне моделювання на ранніх етапах проєктування. **7D BIM** зосереджується на управлінні об'єктом, інтегруючи інформацію про гарантії, графіки обслуговування, специфікації продукції та протоколи експлуатації. Власники й оператори можуть використовувати BIM-модель і після будівництва для оптимізації ефективності активу впродовж його життєвого циклу. Цей вимір є критично важливим для прогнозного обслуговування та довгострокового управління активами [17, 21].

На додаток до 7 стандартних вимірів, описаних вище, тривають відкриті обговорення щодо трьох «нових вимірів BIM» (new dimensions of BIM), які наразі не стандартизовані, однак привертають широку увагу (рис. 1.3). Отже, **8D BIM** зосереджується на плануванні й управлінні охороною праці. Зони з підвищеним ризиком і небезпечні завдання можна моделювати та візуалізувати, що дозволяє фахівцям із безпеки пом'якшувати потенційні загрози ще до початку будівництва. Такий проактивний підхід підтримує впровадження специфічних для майданчика заходів безпеки та дотримання регуляторних вимог [29]. **9D BIM** відображає принципи ощадливого будівництва (lean construction) — усунення втрат, покращення логістики та максимізацію цінності. Він підкреслює колаборативні

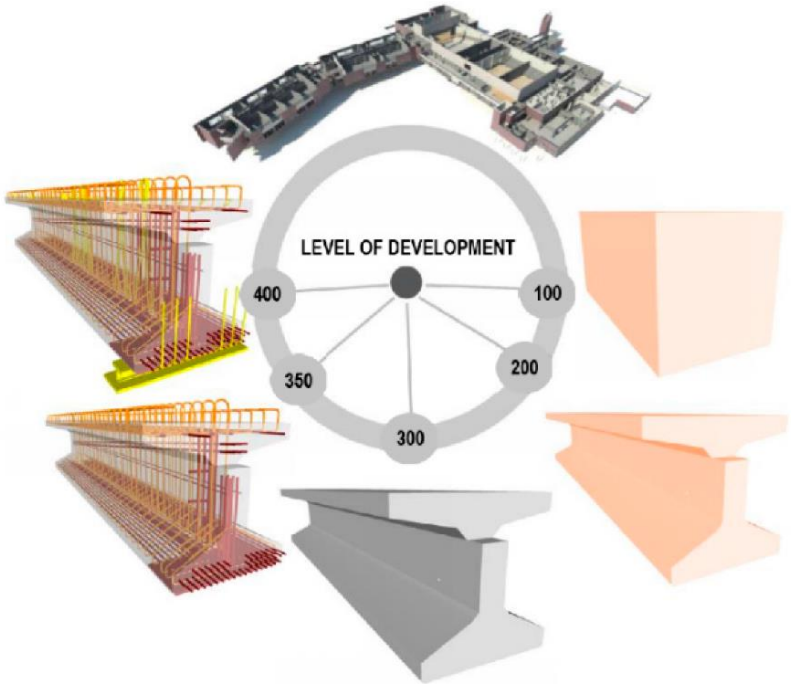
робочі процеси та цикли зворотного зв'язку в реальному часі, які часто забезпечуються завдяки мобільним застосункам і хмарним платформам [30]. Інтеграція ощадливих методологій у BIM забезпечує ефективніше використання ресурсів і впорядкованість операцій на майданчику. Нарешті, **10D BIM** позначає рубіж цифрової трансформації у будівництві, націлений на індустріалізацію сектору та радикальне підвищення продуктивності, координації та якості. Він являє собою конвергенцію передових технологій, потоків даних у реальному часі та стандартизованих процесів для підтримки управління повним життєвим циклом — від проєктування до демонтажу — через інтегровану цифрову екосистему [31]. У своїй основі 10D BIM інтегрує розумні системи, такі як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), робототехніку та цифрових двійників. Ці технології забезпечують моніторинг у реальному часі, прогнозну аналітику та автономні реакції на зміни у фізичних, комерційних та екологічних даних. Поза покращенням виконання, 10D BIM також підтримує стійкість і адаптивне планування, особливо в ініціативах «розумних міст» і великомасштабних інфраструктурних проєктах, де системи мають динамічно реагувати на запити користувачів, впливи довкілля чи надзвичайні ситуації.

Отже, ці «нові виміри» — це не просто еволюція можливостей BIM; вони сигналізують про трансформацію будівельної галузі в цифрово інтегроване, кероване даними та високорівнево автоматизоване виробниче середовище, де ефективність, якість і сталість закладені за замовчуванням. Поступове збагачення вимірів BIM відображає його перехід від інструмента проєктування до всеохопної системи інтелекту інфраструктури. Вбудовуючи багатовимірні дані в уніфіковану модель, BIM надає стейкхолдерам змогу проєктувати розумніше, будувати швидше та експлуатувати ефективніше — водночас відповідаючи на еволюційні вимоги сталості, безпеки та стійкості.

Рівень опрацювання моделі (Level of Development LOD): структурований шлях до зрілості моделі

У контексті BIM, the Level of Development (LOD) — це системний підхід до визначення надійності, повноти та придатності елементів моделі на кожному етапі будівельного проєкту. Концепція LOD слугує основою для узгодження очікувань між учасниками проєкту, забезпечуючи відповідність даних у моделі їхньому призначенню — чи то для концептуальної візуалізації, кошторису, будівництва, чи експлуатації та обслуговування (див. рис. 1.4).

а)



б)

Рис. 1.4. Рівень опрацювання моделі (Level of Development LOD) (а) загальний перелік [32]; б) візуалізація [33]: pre design, schematic design, design development, construction documents, construction stage, as built (передпроектне

проектування, креслення, розробка проекту, будівельна документація, стадія будівництва, фактичний стан виконання робіт)

IFC спрощує комунікацію між інформаційними моделями будівель та програмними платформами, забезпечуючи стандартизовані дані. Однак самі моделі повинні мати достатній та узгоджений рівень деталізації, щоб відповідати BIM-орієнтованим робочим процесам або інтегруватися із зовнішніми базами даних, сумісними з BIM, наприклад, банками матеріалів/компонентів (M/C) Для цього необхідно обрати відповідний Level of Development або Level of Detail (LoD) [33]. Чим вищий LoD, тим детальніший кожен об’єкт, що ілюструється на рис. 1.4б.

У BIM рівень LOD надає структурований і стандартизований підхід для опису розвитку елементів моделі — від концептуальних ескізів до виконавчої документації. Він визначає ступінь деталізації, точності та інформаційного наповнення кожного елемента, що дозволяє учасникам проєкту приймати обґрунтовані рішення на всіх етапах життєвого циклу активу — від проєктування та будівництва до експлуатації та технічного обслуговування. LOD виступає спільною мовою між архітекторами, інженерами, підрядниками, замовниками та менеджерами об’єктів, чітко визначаючи, скільки інформації повинна містити модель на різних стадіях і наскільки вона має бути надійною для конкретних завдань, таких як кошторис, планування графіка, закупівлі, виготовлення або управління активами.

Важливо розрізняти терміни Level of Development та Level of Detail, які іноді помилково вживають як синоніми. Хоча вони тісно пов’язані, їх фокус відрізняється [32]. Level of Detail стосується саме візуальної та графічної складності BIM-елементів — наскільки реалістично та детально об’єкт змодельований з точки зору візуалізації. Натомість Level of Development підкреслює точність, повноту та достовірність як графічного подання, так і пов’язаних із ним даних. Саме LOD визначає, чи придатний елемент моделі для конкретних завдань, наприклад, планування виготовлення чи управління об’єктом. Як наголошується у специфікації BIMForum LOD, LOD — це не лише про зовнішній вигляд об’єкта, а

про те, що він здатен передати та підтримати в контексті реальних рішень проєкту [34].

Історія розвитку концепції LOD почалася ще до її офіційної стандартизації. У 2008 році Американський інститут архітекторів (AIA) запровадив п'ятирівневу систему класифікації, яка стала основоположним орієнтиром для галузі архітектури, інженерії та будівництва (AEC) [35]. Сьогодні LOD широко визнано галузевим стандартом, що охоплює рівні від LOD 100 до LOD 500. Кожен рівень відповідає певному етапу зрілості моделі та описує графічне подання, пов'язані метадані та призначення кожного елемента (див. табл. 1.3).

LOD 100 — на ранньому етапі модель містить базову концептуальну геометрію, що символічно представляє елемент будівлі. Вона відображає загальні розміри, форму, розташування, орієнтацію та об'єм. Призначення цього рівня — підтримка просторового планування та попередніх досліджень здійсненності. Геометрія ще не деталізована, але достатньо абстрактна для обговорення та пошуку варіантів [32,36]. **LOD 200** — на стадії ескізного проєктування геометрія уточнюється, з'являються більш чіткі форми, розташування та узагальнені системи. Елементи починають нагадувати реальні аналоги, але залишаються узагальненими. Можливе виконання попередніх підрахунків обсягів, базового виявлення колізій і початкової міждисциплінарної координації. Може бути додано обмежений набір властивостей, таких як типи матеріалів чи орієнтовні характеристики [37].

LOD 300 — точна геометрія, придатна для робочої документації. Елементи представлені конкретними системами чи вузлами з визначеними розмірами, геометрією та розташуванням. Інтегрується і неграфічна інформація — технічні характеристики, матеріали. На цьому етапі модель слугує основою для креслень, координації між розділами та точного кошторису. Це мінімальний рівень, достатній для LCA та оцінок сталості [38].

LOD 350 — моделювання інтерфейсів. Додається інформація про взаємодію з сусідніми системами, кріплення, стики та інші аспекти, важливі для монтажу. Це необхідно для робочих креслень і планування виконання робіт.

LOD 400 — рівень виготовлення. Модель містить точні дані для виробництва та монтажу: розміри, кількість, матеріали, інструкції з монтажу. Використовується безпосередньо для фабрикації та будівництва. На цьому рівні часто додаються специфікації виробників та дані для контролю виробництва [39].

LOD 500 — виконавча модель, що відображає фактично збудовану конструкцію. Всі елементи перевірені на місці. Містить реальні параметри, зміни, внесені під час будівництва, і повну експлуатаційну інформацію. Використовується для управління об'єктом, планування техобслуговування, створення цифрових двійників.

Таблиця 1.3.

Рівні опрацювання моделі (LOD)

LOD	Опис	Типові застосування
LOD 100 — концептуальний	Загальні маси, орієнтація, об'єм. Символічні елементи.	Попереднє планування, аналіз здійсненності.
LOD 200 — приблизна геометрія	Узагальнені форми, приблизне розташування.	Ескізне проєктування, попереднє виявлення колізій, базовий кошторис.
LOD 300 — точна геометрія	Точні розміри та розташування. Конкретні системи.	Робоча документація, точні підрахунки обсягів.
LOD 350 — змодельовані інтерфейси	Деталі взаємодії компонентів.	Аналіз збірності, планування монтажу.
LOD 400 — готовий до виготовлення	Повні дані для виробництва.	Фабрикація, монтаж, закупівля.
LOD 500 — виконавчий	Фактично побудоване, перевірене на місці.	Експлуатація, цифрові двійники.

Структурований характер системи LOD забезпечує кілька ключових переваг. По-перше, він покращує комунікацію та координацію між учасниками проєкту, надаючи спільну мову та узгоджений набір очікувань щодо змісту та використання моделі. По-друге, він підтримує обґрунтоване прийняття рішень, гарантуючи, що для критично важливих рішень використовуються лише належним чином

деталізовані та надійні дані. По-третє, він пропонує методичний підхід до розробки моделі, що дає змогу ефективно планувати, відстежувати та контролювати якість. Нарешті, визначаючи призначення моделі на кожному етапі, LOD сприяє кращим результатам проєкту, зменшуючи ймовірність переробок, затримок та перевищення кошторису. У міру того, як BIM виходить за межі простої візуалізації в області прогнозної аналітики, сталого розвитку та оптимізації життєвого циклу, рівень опрацювання моделі стає дедалі більш важливим. Він перетворює модель з візуального артефакту на орієнтований на продуктивність, насичений інформацією актив. Формалізуючи процес дозрівання інформації з часом, LOD підвищує довіру, ефективність та цінність на кожній фазі будівельного проєкту.

Від LOD до LOIN: визначення рівня інформації в BIM

Хоча система рівня опрацювання моделі LOD тривалий час слугувала практичним інструментом для визначення рівня деталізації та надійності елементів моделі, її часто трактували по-різному в межах різних проєктів та регіонів. Зі зростанням поширення ISO 19650 як міжнародного стандарту з управління інформацією в будівельному середовищі з’явилося більш структуроване, гнучке та орієнтоване на результат поняття — рівень інформації, **Level of Information Need (LOIN).**

LOIN виходить за межі геометрично орієнтованої логіки LOD та зміщує акцент на те, **чому** потрібна інформація, **який** саме тип інформації необхідний і **коли** вона має бути надана (рис. 1.5). Це — об’єднуючий принцип, який узгоджує потреби у графічній (геометрія), алфавітно-цифровій (дані) та документальній (файли чи звіти) інформації в єдину узгоджену систему, адаптовану до конкретних рішень, пов’язаних із проєктом або активом [40,41]. Ця еволюція — не просто зміна термінів, а важливий зсув у BIM-практиці: від створення інформації заради самого створення — до надання цільової інформації, яка відповідає визначеним сценаріям використання.

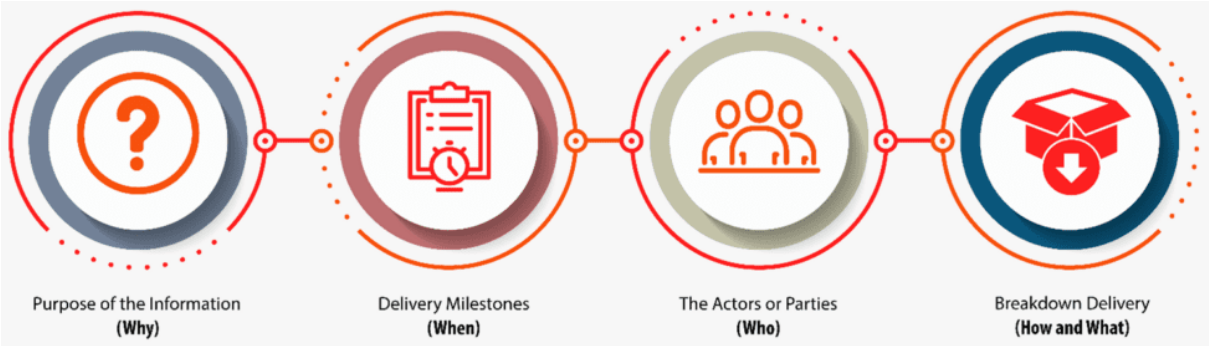


Рис. 1.5. Практична 4-етапна схема застосування LOIN у будівельних проєктах [42]: purpose of information-why, delivery milestones-when, the actors or parties- who, breakdown delivery- how and what (мета інформації – чому, етапи доставки – коли, учасники або сторони – хто, розбивка доставки – як і що)

Традиційні специфікації LOD безперечно сприяли стандартизації BIM-процесів, проте часто були надто жорсткими або, навпаки, надто вільно трактувалися — особливо у складних чи міжнародних проєктах. Стандарт ISO 19650 вирішує цю проблему, запроваджуючи LOIN як орієнтований на результат підхід до моделювання інформації, наголошуючи на принципі: *"правильна інформація, у правильний час, для правильних людей"*.

Згідно з ISO 19650, кожна інформаційна вимога має бути сформульована з урахуванням:

- **Призначення:** яке рішення чи дію підтримує ця інформація?
- **Форми:** який формат потрібен — геометрія моделі, властивості, звіти чи пов’язані документи?
- **Якості:** наскільки повною, точною та перевірюваною має бути інформація?

Цей підхід є ключовим для скорочення витрат, покращення координації та узгодження BIM-результатів із очікуваннями замовника, особливо коли проєкти стають більш орієнтованими на дані та життєвий цикл. LOIN пропонує масштабований та контекстно-залежний альтернативний варіант LOD, що дозволяє учасникам точно визначати потрібний рівень графічної та неграфічної інформації для конкретного завдання — чи то енергетичне моделювання, закупівлі, планування обслуговування, чи відповідність нормативним вимогам.

Рівень інформаційної потреби (Level of Information Need) включає три взаємопов’язані компоненти [40]:

- **Геометрія (графічні дані)** — потрібний рівень деталізації візуального представлення елемента (аналогічно до традиційного LOD).
- **Алфавітно-цифрова інформація** — структуровані неграфічні дані, прикріплені до елементів моделі (наприклад, експлуатаційні характеристики, вартість, дані виробника).
- **Документація** — зовнішні файли або документи, що посилаються на елемент або пов’язані з ним (наприклад, сертифікати, технічні паспорти, інструкції з монтажу).

На відміну від LOD, який часто об’єднує ці аспекти в одному загальному понятті, LOIN дозволяє визначати кожен компонент окремо та перевіряти його незалежно, що забезпечує набагато більшу точність і гнучкість. Наприклад, елемент може мати низький рівень геометричної деталізації, але високий рівень неграфічних даних для потреб закупівель.

Традиційно проєкти значною мірою спиралися на статичні документи. Сьогодні цифрові моделі домінують у комунікації, але саме алфавітно-цифровий контент є основною зоною зростання. Структуровані, інтероперабельні дані дають змогу моделям функціонувати як насичені даними активи, що підтримують прогнозне техобслуговування та оптимізацію життєвого циклу. У той час як геометричні моделі дедалі частіше розглядаються як контейнери для цієї інформації, значення документальної передачі поступово зменшується [41,43]. Ця зміна підкреслює цінність LOIN: надавати лише потрібну інформацію, у потрібний час, для потрібної мети — уникаючи перевантаження даними та забезпечуючи результативність (рис. 1.6).

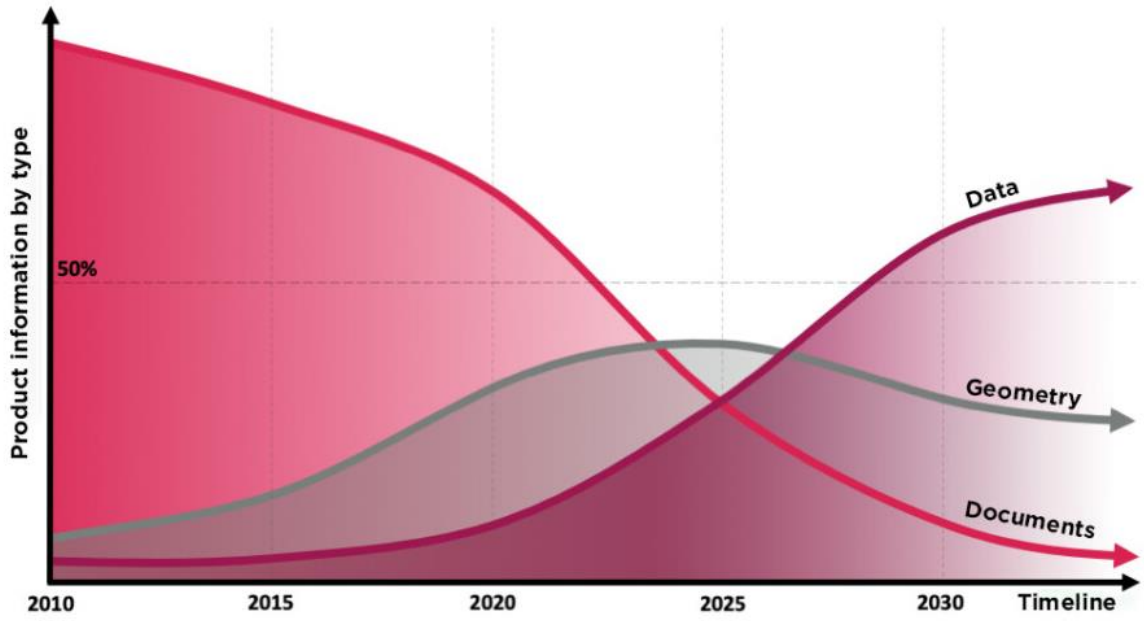


Рис. 1.6. Тенденції у наданні інформації [41]: product information by type vs timeline-data, geometry, documents (інформація про продукт за типом проти часової шкали – дані, геометрія, документи)

Одним із постійних викликів LOIN є його абстрактність — він вимагає культурного та процесного переходу від мислення, зосередженого на моделі, до планування інформації, заснованого на її цінності [43]. Проте при правильному впровадженні він істотно підвищує ясність проєкту та зменшує перевантаження даними, гарантуючи створення лише релевантної та корисної для прийняття рішень інформації. Відповідність стандарту ISO 19650 також дає змогу автоматично перевіряти моделі на відповідність заздалегідь визначеним вимогам, зменшуючи суб’єктивність та ручну роботу. Інструменти, що підтримують цей підхід, зокрема платформи для автоматизованої перевірки BIM на основі правил, стають дедалі поширенішими в цифрових процесах постачання.

Запровадження Level of Information Need є фундаментальним кроком у розвитку BIM-практик. Якщо LOD забезпечував структуру еволюції моделі, то LOIN закладає призначення у кожен створений фрагмент інформації. Це гарантує, що BIM — це не лише створення кращих моделей, а й формування кращих рішень, ефективнішої співпраці та, зрештою, кращих активів.

1.3. Дані як актив життєвого циклу: від проєктування до виведення з експлуатації

Дані в BIM: основи

У контексті BIM дані — це не просто цифровий побічний продукт проєктування, а фундаментальний актив, який супроводжує та підтримує об’єкт протягом усього його життєвого циклу — від раннього планування до експлуатації та остаточного демонтажу. Розуміння даних як активу життєвого циклу означає усвідомлення їхньої змінної ролі на різних етапах проєкту та того, як вони забезпечують ухвалення рішень, ефективність і довгострокову цінність. У своїй основі дані складаються з фактів, значень або вимірювань, які описують фізичні чи абстрактні характеристики об’єктів — наприклад, розміри, матеріали або коди вартості.

У середовищах BIM ці дані вбудовуються у цифрові представлення будівель або пов’язуються з ними, роблячи їх дієвим та доступним для обміну ресурсом.

Кожен елемент моделі — чи то стіна, балка, чи компонент HVAC — може містити структуровані дані (наприклад, тип матеріалу, клас вогнестійкості) та неструктуровані дані (наприклад, зображення, PDF-файли або нотатки зі зборів).

Властивості у BIM логічно групуються у набори властивостей, які можуть бути як попередньо визначеними, так і користувацькими. Така гнучка структура даних дозволяє BIM враховувати специфічні вимоги проєкту, перетворюючи модель на живе джерело знань протягом усього життєвого циклу.

Дані BIM виходять далеко за межі геометричного моделювання [44]. Вони інтегрують кілька вимірів інформації, важливих для управління життєвим циклом споруд (рис. 1.7):

- **Матеріальні та проєктні дані:** визначають фізичні характеристики та проєктний задум.
- **Планувальні дані (4D):** додають інформацію про графіки, що дає змогу виконувати моделювання за часом.

- **Вартісні дані (5D):** пов’язують фінансову інформацію для розрахунку бюджетів і відстеження витрат.
- **Структурні та енергетичні дані:** підтримують аналіз та оптимізацію під час проєктування й експлуатації.
- **Екологічні, охоронні та безпекові дані:** забезпечують дотримання вимог і стійкі практики.
- **Дані для обслуговування та демонтажу:** сприяють управлінню об’єктом та плануванню завершального етапу його життєвого циклу.

Рис.1.7. Типи даних BIM [44] BIM Data: what are they, what are they used for and why are they so important?): materials, time, costs, structural features, energy performance, sustainability, production, delivery to site, installation and assembly, health and safety, quality, commissioning, maintenance, demolition (матеріали, час, витрати, структурні особливості, енергоефективність, сталий розвиток, виробництво, доставка на об'єкт, монтаж та складання, охорона здоров'я та безпека, якість, введення в експлуатацію, технічне обслуговування, демонтаж)

Важливо знайти правильний баланс у включенні даних. Надмірна деталізація може ускладнити керування та використання моделі, тоді як надто мала кількість даних зводить BIM лише до 3D-візуалізації без цінності для життєвого циклу. Кількість і тип даних мають відповідати етапу проєкту, його цілям, вимогам замовника та потребам зацікавлених сторін.

Незалежно від рівня деталізації, правильно структуровані дані BIM покращують результати проєкту на всіх етапах, забезпечуючи [44]:

- Кращий контроль та нагляд під час проєктування й будівництва.
- Точнішу документацію, включно з кількісними та специфікаційними даними.
- Спрощений аналіз і розрахунки, що підтримують перевірку проєкту та оцінку ефективності.
- Виявлення конфліктів між геометрією та метаданими, зменшуючи кількість помилок.
- Відстеження графіків, вартості та використання ресурсів у реальному часі.
- Підвищену інтероперабельність, що покращує комунікацію між різними учасниками.
- Надійне управління активами, особливо під час експлуатації та обслуговування.
- Забезпечення відповідності вимогам завдяки прозорим і відстежуваним потокам даних.
- Послідовну якість, що сприяє довготривалій ефективності та стійкості.

Типи та формати даних у BIM

Ефективне використання BIM залежить від того, наскільки добре проектні дані структуровані, передаються, змінюються та зберігаються між учасниками проєкту. Першим критично важливим кроком є визначення, які типи даних є релевантними для конкретного проєкту — від геометричних параметрів до вимог щодо життєвого циклу та обслуговування. Після цього дані BIM можуть бути організовані у двох основних конфігураціях: **інтегровані безпосередньо в модель або пов'язані з нею зовні** [44]**.**

Коли дані BIM **інтегровані в модель**, необхідні атрибути та властивості вбудовуються безпосередньо у цифрові елементи. Зазвичай це здійснюється з використанням схеми IFC (Industry Foundation Classes) — відкритого та стандартизованого формату, який дозволяє детально описувати кожен об'єкт,

включаючи його взаємозв’язки, функції та властивості. Така конфігурація гарантує, що вся інформація доступна безпосередньо в межах моделі, що дає змогу користувачам швидко отримувати дані про об’єкт через панелі метаданих або інформаційні картки. Однак, хоча цей метод підвищує доступність та інтероперабельність, він має недолік: вбудовування великих обсягів даних може зробити модель «важкою» та повільною. Це особливо критично для складних проєктів або при використанні обладнання з обмеженими ресурсами.

Щоб уникнути цього, використовується альтернативний підхід — **пов’язування даних BIM із моделлю** при зберіганні основного обсягу інформації **у зовнішньому середовищі**, зазвичай у Common Data Environment (CDE). У цьому випадку модель залишається «легкою» та керованою, але зберігає доступ до важливих даних проєкту через посилання або гіперпосилання. Наприклад, елемент BIM може бути пов’язаний із журналом технічного обслуговування, технічною специфікацією продукту чи звітом про інспекцію, що зберігаються в CDE. Така роздільна структура підтримує колаборативні робочі процеси та дозволяє здійснювати паралельне оновлення даних без постійної переробки центральної BIM-моделі. Деталі щодо CDE наведено в наступних розділах..

Вибір формату даних для обміну та передачі BIM-контенту значною мірою залежить від призначення та вимог до інтероперабельності [44]. Для підтримки співпраці між різними інструментами та учасниками проєкту надається перевага відкритим форматам, таким як IFC, який забезпечує узгоджений обмін даними між різними програмними платформами та є міжнародно визнаним, сприяючи більш плавним робочим процесам і зрозумілій комунікації. Іншим поширеним відкритим форматом є COBie (Construction-Operations Building Information Exchange). На відміну від IFC, COBie зазвичай представлений у вигляді електронної таблиці (у форматах XML або XLS), що містить не графічні дані, необхідні для управління об’єктом — наприклад, ідентифікатори активів, місця розташування, виробників і графіки технічного обслуговування. Це особливо цінно на етапі передачі об’єкта в експлуатацію, коли пріоритет мають зрозумілість та зручність використання інформації. Альтернативно можуть застосовуватися пропрієтарні формати

(наприклад, .RVT Revit або .PLA ArchiCAD), особливо у рамках робочих процесів одного розробника. Однак для доступу та роботи з такими файлами потрібне сумісне програмне забезпечення. Для довготривалої доступності, особливо під час експлуатації та обслуговування, відкриті формати зазвичай є більш стійким і доступним варіантом.

У BIM важливо розуміти відмінність між структурованими та неструктурованими даними для ефективного управління проєктом і потоками інформації ([45], див. Рис.1.8, Таблиця 1.4).

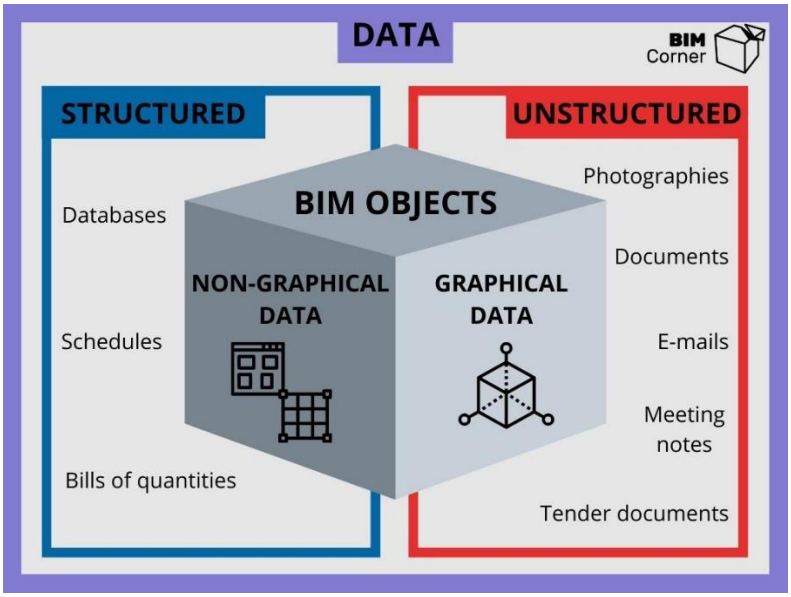


Рис.1.8.Структуровані та неструктуровані дані та об'єкти BIM [45]: структуровані/неграфічні бази даних, графіки, відомості робіт; неструктуровані/графічні фотографії, документи, електронні листи, нотатки зустрічей, тендерна документація

Таблиця 2.2. Порівняльна характеристика даних в традиційному та хмарному BIM [45]

Структуровані дані	Неструктуровані дані (Традиційі)

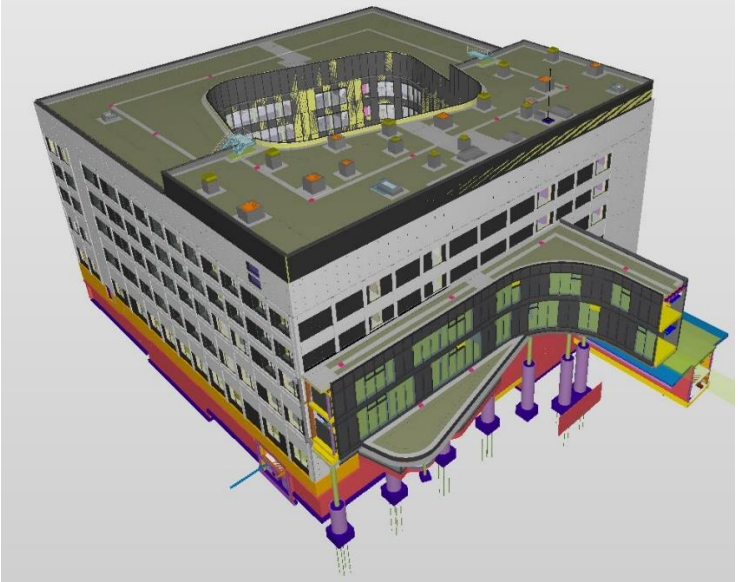
Об’єкти BIM (стіни, двері, інженерні елементи); BIM-моделі (IFC, RVT з метаданими); Відомості обсягів робіт (BOQs); Графіки виконання робіт (Primavera, MS Project); Тендерна документація (зі структурованими шаблонами); Структуровані файли Excel (з визначеними заголовками і типами даних)	Фотографії (хід будівництва, дефекти); Записи зустрічей (аудіо/відео); Нотатки (скановані або у вільній формі); Електронні листи (листування, інструкції); PDF-файли (незструктуровані специфікації, креслення); Неструктуровані файли Excel (з непослідовним форматуванням)

- **Структуровані дані** організовані за заздалегідь визначеною схемою, що дозволяє зберігати їх у базах даних та швидко отримувати через запити. У BIM це зазвичай об’єкти (стіни, двері, HVAC-елементи), кожен з яких описаний набором атрибутів — розміри, матеріал, вогнестійкість, розташування. Цей підхід називається schema-on-write, коли дані мають відповідати структурі перед внесенням. Перевага — простота запитів та автоматизації, що робить їх незамінними для планування, підрахунку обсягів, виявлення колізій та аналізу ефективності [45].
- **Неструктуровані дані** не мають формальної схеми — це фотографії, PDF, нотатки, електронні листи, скановані документи. Вони зберігаються у власних форматах і вимагають ручної інтерпретації або використання спеціалізованих інструментів для вилучення цінної інформації. Цей підхід відомий як schema-on-read, коли структура визначається лише під час доступу до даних. Наприклад, фото будмайданчика містить важливі відомості (матеріали, умови виконання робіт), але їх повинен інтерпретувати фахівець або AI-модель [45].

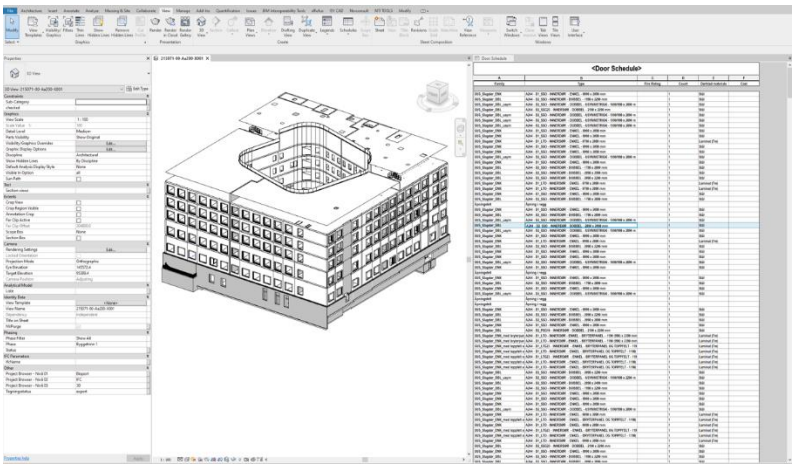
Дані BIM також поділяються на графічні та неграфічні (Рис. 1.9; [45]).

- **Графічні дані** — візуальні елементи (лінії, кольори, символи, геометрія), які допомагають розрізняти компоненти моделі та координувати просторові рішення, але зазвичай не містять структурованих метаданих. Рівень деталізації (LOD) у PAS1192-2 визначає обсяг графічної інформації на кожному етапі проєкту.
- **Неграфічні дані** — функціональні та описові характеристики елементів (матеріали, технічні показники, вимоги до обслуговування), що підтримують

ухвалення рішень упродовж усього життєвого циклу. Рівень інформації (LOI) у PAS1192-2 визначає обсяг таких даних на різних стадіях проєкту.



а)



б)

Рис.1.9.Графічні (а) та неграфічні (б) дані в BIM: приклад загального вигляду лікарні Нового університету Ставангера та розкладу дверей у проекті Nye SUS. [45]

Водночас термін «інформаційна модель» охоплює не лише ці два типи даних [46]. За PAS1192-2, інформаційна модель включає графічні та неграфічні дані, а також пов’язані документи, збережені у CDE (Рис. 1.10). Протягом життєвого циклу проєкту вона існує у двох ключових формах:

- **PIM (Project Information Model)** — формується на етапі проєктування та розвивається під час будівництва, акумулюючи всі проєктні дані.
- **AIM (Asset Information Model)** — створюється на основі перевірених даних as-built та використовується для експлуатації та обслуговування об’єкта згідно з PAS1192-3.

PIM та AIM разом утворюють повне цифрове представлення об’єкта. PAS1192-2 для визначення необхідної глибини інформації застосовує поняття LoMD (Level of Model Definition) — поєднання LOD для графіки та LOI для атрибутів. Детальнішу інформацію наведено в наступних розділах.

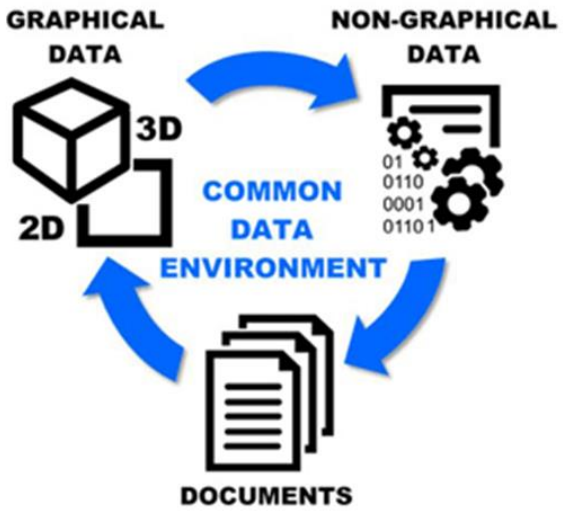


Рис.2.10. Графічні, неграфічні дані та документи (Graphical, non-graphical data and documents) в CDE [46]

Таким чином, інформаційна модель — це не просто 3D-файл BIM. Це федеративна структура взаємопов’язаних наборів даних — графічних видів, вбудованих метаданих та зовнішніх документів, які забезпечують ефективну співпрацю, контроль активів, дотримання вимог та обґрунтоване прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу об’єкта. Їхня реальна цінність розкривається тоді, коли ми розглядаємо, як вони розвиваються, взаємодіють і накопичують значення від концепції та проєктування до будівництва, експлуатації та виведення з

експлуатації. Це підводить нас до наступного ключового аспекту цифрового будівництва — Дані впродовж життєвого циклу.

Дані протягом життєвого циклу

Цифрові дані не є статичними — вони змінюються разом з активом, відображаючи його фізичний стан, продуктивність і контекстну значимість з часом. У BIM ці дані слідують траєкторії життєвого циклу активу, підтримуючи прийняття обґрунтованих рішень на кожному етапі — від початкового планування до стратегій кінця життєвого циклу (рис.1.11). Використання цього безперервного потоку даних є критично важливим для сталого розвитку, підвищення стійкості та інтеграції принципів циркулярної економіки. Детальний опис основних фаз та потоків обміну даними у BIM протягом життєвого циклу наведено на рис.1.12.

Рис.1.11. BIM протягом життєвого циклу [47]

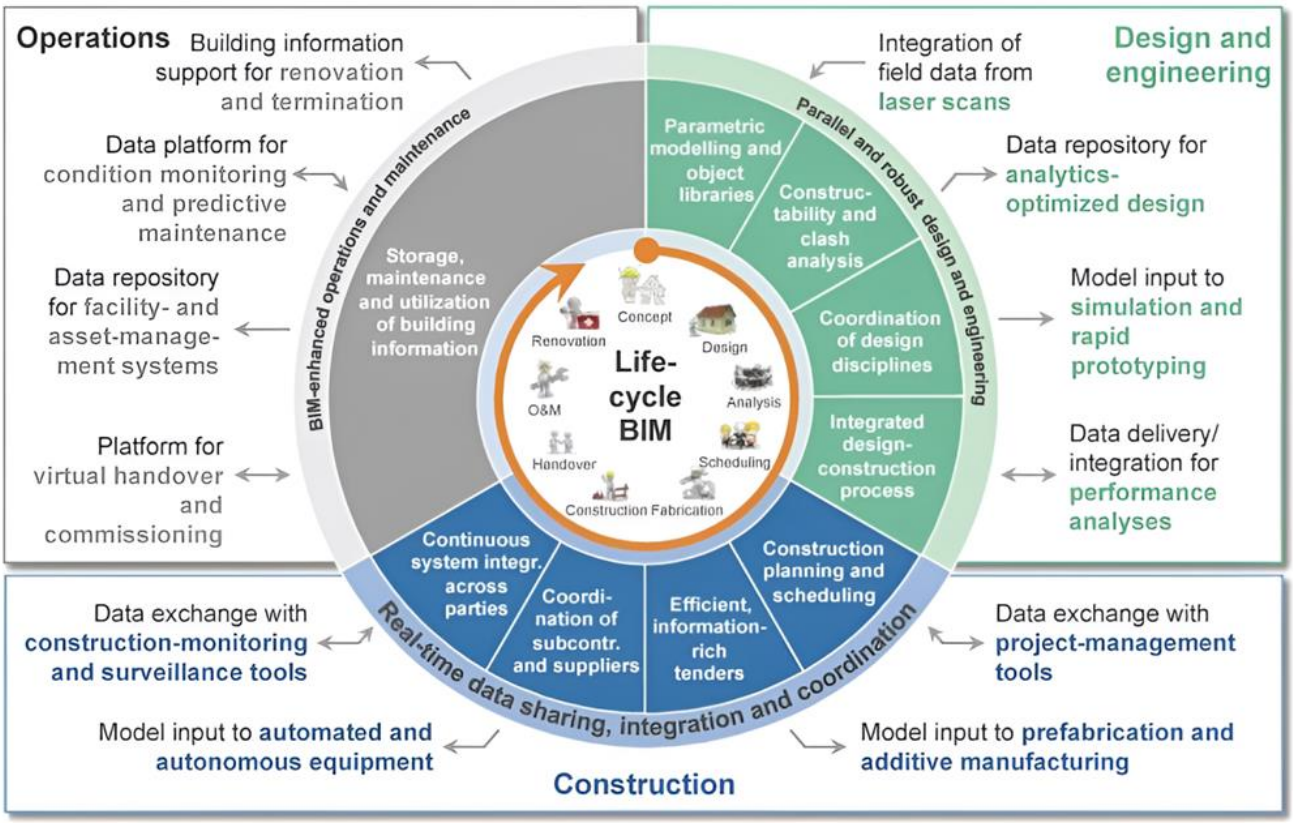


Рис.2.12. Основні фази та потоки обміну даними у BIM протягом життєвого циклу [48]

I. Фаза проєктування та планування

На стадіях концептуального та детального проєктування BIM-моделі є основою цифрового будівництва. Вони містять як геометричні (3D), так і параметричні метадані, такі як характеристики матеріалів, енергоефективність, екологічний вплив, кошториси (5D), графіки робіт (4D) та вуглецеві показники (6D). Останні дослідження підкреслюють потенціал BIM у прискоренні процесів оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) на ранніх етапах проєктування, коли рішення мають найбільший вплив. Проте більшість досліджень BIM-LCA все ще не враховують етап кінця життєвого циклу (End-of-Life, EoL). Наприклад, Hossain і Ng повідомили, що лише 27% досліджень LCA на основі BIM включали відходи будівництва та демонтажу (construction and demolition waste, CDW) [49]. Це вказує на необхідність розширення структур даних та схем найменувань у BIM-моделях для повної LCA. Крім того, стандартизовані онтології даних, запропоновані Röck та ін.. [50] та Densley Tingley & Davison [51],

підтримують створення матеріальних інвентарів для циркулярного проєктування та потенціалу повторного використання. Інструменти, як-от Sakura, що оцінюють варіанти «проєктування для розбирання» (Design for Disassembly, DfD), демонструють, як дані BIM можуть допомогти у виборі низьковуглецевих і високостійких рішень ще на ранніх етапах.

II. Фаза будівництва

Коли актив переходить до етапу будівництва, BIM змінюється від інструмента планування до динамічної системи контролю. Оновлення в реальному часі, що забезпечуються пристроями моніторингу та датчиками на майданчику, гарантують безперервний потік даних. На цьому етапі фіксуються:

- Дані про закупівлі та логістику
- Послідовність будівництва та оновлення за допомогою 4D/5D BIM
- Протоколи монтажу та документація з охорони праці та безпеки
- Зміни на майданчику та перевірка «as-built» за допомогою фотограмметрії або лазерного сканування

Інтегровані в BIM платформи інструменти для оцінки відходів (наприклад, розробки [52]) дозволяють розраховувати утворення відходів, співвідносячи дані моделі з базами даних коефіцієнтів утворення відходів (WGR) [33]. Це дає змогу зменшити кількість відходів ще на стадії будівництва. Порівняння альтернативних проєктних рішень з використанням BIM, як показано Cheng і Ma [53], може виявити екологічно вигідніші стратегії будівництва, впливаючи на матеріальний слід і логістику проєкту.

III. Експлуатація та технічне обслуговування (Operation and Maintenance, O&M)

На етапі експлуатації дані BIM перетворюються на ресурс для управління об’єктами (facility management, FM) (див. Рис.1.13). Вбудовані метадані — наприклад, дані виробника, серійні номери, очікуваний термін служби та графіки технічного обслуговування — підтримують прогнозне та превентивне

обслуговування, моніторинг продуктивності у режимі реального часу за допомогою цифрових двійників, планування перепрофілювання чи модернізації. Зокрема, FM у BIM дозволяє [54]:

- підвищувати рівень співпраці між учасниками процесу;
- покращувати процеси ухвалення рішень;
- зменшувати час і витрати на проведення робіт;
- забезпечувати більш ефективне технічне обслуговування;
- оптимізувати планування простору;
- знижувати енергоспоживання та підвищувати безпеку користувачів;
- виявляти потенційні проблеми.

Однак залишаються виклики. Як зазначають Re Cecconi та ін.. [55], інтеграція між BIM та застарілими інструментами CAFM часто є слабкою. Поєднання BIM з новими технологіями, такими як цифрові двійники (детальніше див. у наступному розділі), може вирішити це, забезпечивши актуальну, просторово прив'язану та орієнтовану на продуктивність систему управління. Дослідження, зокрема [56], показали, як дані BIM можуть фіксувати та відстежувати викиди на етапі кінця життєвого циклу (EoL) для окремих елементів, розширюючи роль BIM від управління активами до оцінки екологічного впливу.

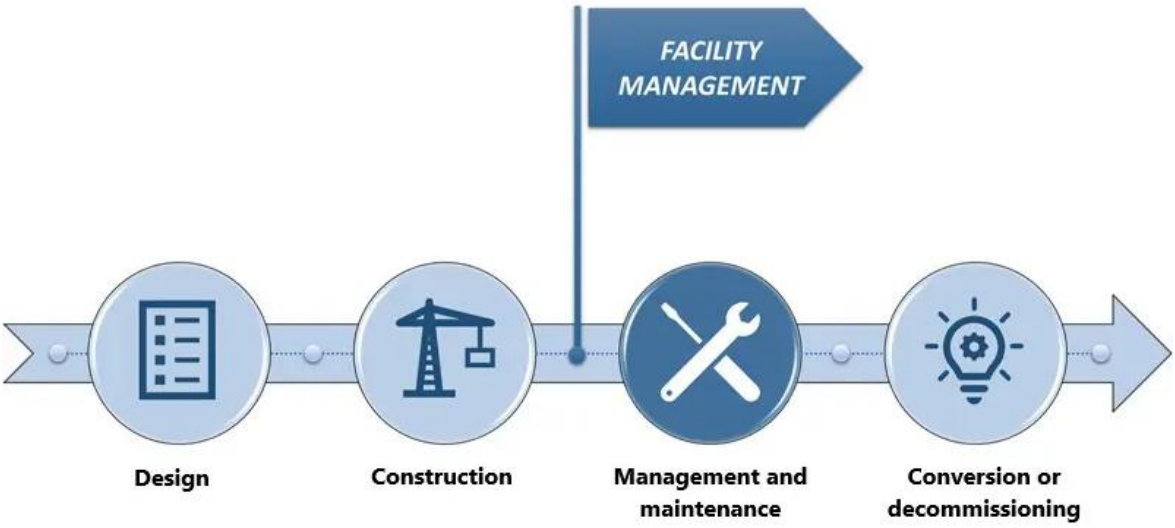


Рис.2.13. Управління об'єктами (facility management) в процесі BIM [54, 57]: phases of design, construction, management&maintenance, conversion or

decommissioning (фази проектування, будівництва, управління та обслуговування, переобладнання або виведення з експлуатації)

IV. Реконструкція та виведення з експлуатації

Наприкінці життєвого циклу (end-of-life, EoL) активу BIM зберігає стратегічну цінність. Він допомагає приймати рішення щодо переробки, модернізації або безпечного демонтажу. Якісні дані BIM можуть виявити придатні до повторного використання елементи, підтримати вибіркове розбирання та покращити управління відходами будівництва та демонтажу (construction and demolition waste, CDW) Це відповідає принципам циркулярної економіки та забезпечує дотримання норм, зменшуючи кількість відходів і негативний вплив на довкілля [33]. За [58], індекс сталості (Construction Waste LCA-based Sustainability Index CWLSI), заснований на LCA, може допомогти у прийнятті рішень щодо сортування матеріалів, потенціалу повторного використання та екологічних компромісів. Використання екологічних, соціальних та економічних субіндексів полегшує оцінку рішень щодо вибору матеріалів, їх сортування, переробки, повторного використання та утилізації відходів. Використання стандартних значень для демонтажу може призвести до ненадійних результатів LCA. Тому багатокрокові протоколи обміну інформацією на основі BIM і динамічні матеріальні паспорти можуть забезпечити точний підрахунок обсягів відходів..

У доповнення, на рис. 1.14 представлено цілісне бачення того, як дані «Big Data» проходять через життєвий цикл об’єкта, взаємодіючи з ключовими бізнес-процесами та цифровими технологіями. Діаграма підкреслює взаємодію між плануванням, проєктуванням, будівництвом, експлуатацією та виведенням з експлуатації, зіставлену з відповідними системами, що працюють з великими обсягами даних, такими як:

- CPMS (Capital Planning and Management System; Система планування та управління капіталом) використовується на ранніх етапах для аналізу «що-якщо» та прогнозування бюджету;

- IPD/JOC (Integrated Project Delivery / Job Order Contracting; Інтегроване проєктне виконання / Контракти на замовлення робіт) – застосовується для оцінки вартості та спільної реалізації проєктів;
- CAFM (Computer-Aided Facility Management; Комп’ютеризоване управління об’єктами) і CMMS (Computerized Maintenance Management System; Комп’ютеризована система управління технічним обслуговуванням) – критично важливі на етапі експлуатації та обслуговування (O&M);
- GIS (Geographical Information System; Геоінформаційна система) – забезпечує зв’язок просторових та автоматизованих даних для прийняття рішень.

Кожна фаза генерує, споживає та повторно використовує дані, які надходять у центральну екосистему «Big Data», підтримуючи управління активами на основі життєвого циклу та стратегії сталого розвитку. Такий підхід також підкреслює необхідність інтероперабельності даних між системами, що залишається серйозним викликом у реальних впровадженнях — особливо при модернізації або подовженні терміну служби старіючої інфраструктури. Також слід звернути увагу на кібер-фізичну інтеграцію, необхідну для стійкого управління активами.

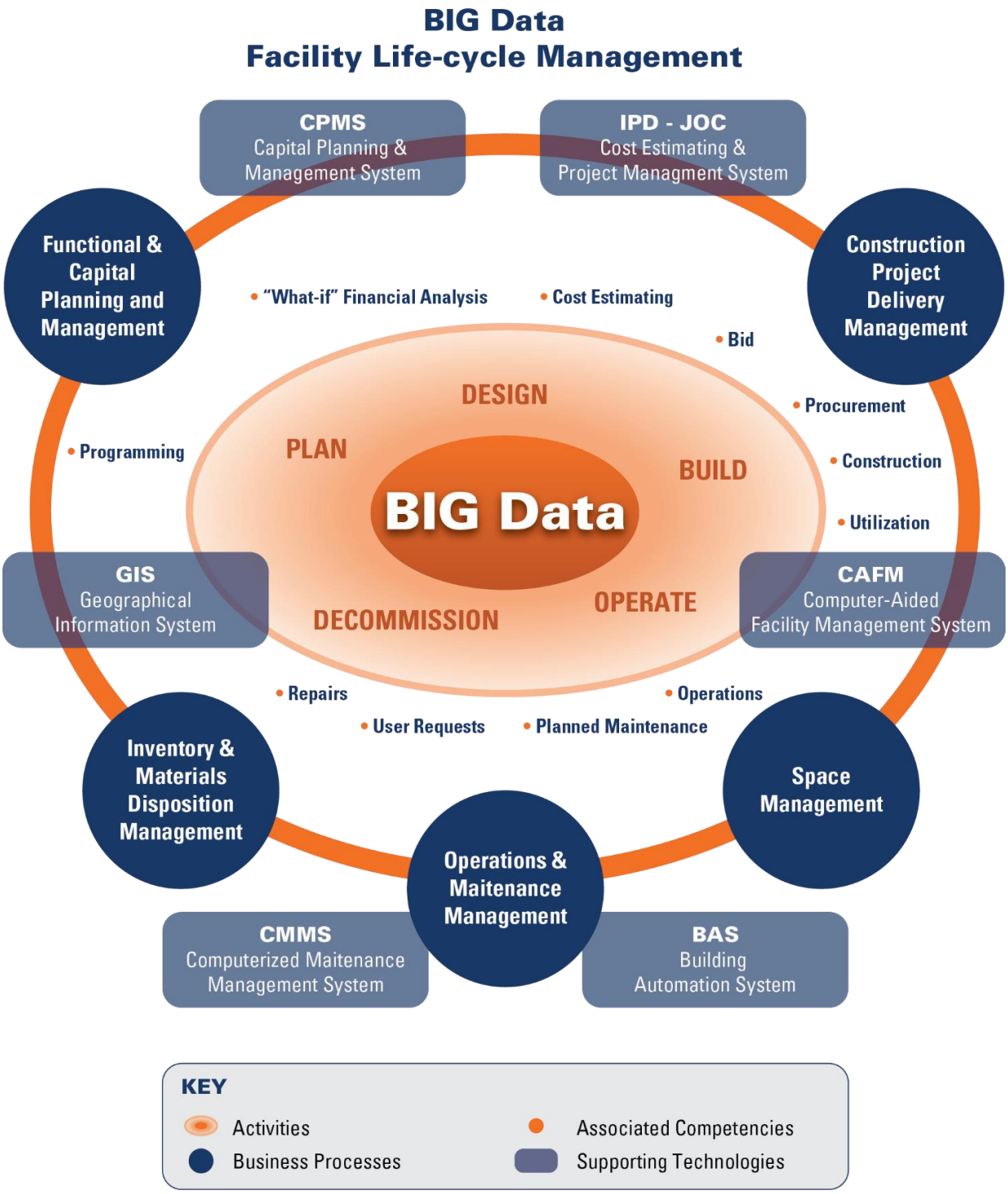


Рис.1.14. Дані в BIM у межах життєвого циклу: діяльність, бізнес-процеси, компетенції (activities, business processes, associated competencies) (4Clicks Solutions, LLC, 2012 [57])

Для всебічного розуміння ролі BIM-даних протягом життєвого циклу об'єктів, Таблиця 1.5 надає інтегрований огляд ключових діяльностей, типів даних,

переваг та викликів на кожному етапі — від планування до виведення з експлуатації.

Таблиця 1.53. Дані BIM протягом життєвого циклу об'єкта: переваги та виклики

Етап життєвого циклу	Ключові дії	Типи даних	Переваги	Виклики
Планування	Вибір ділянки, техніко-економічне обґрунтування, бюджетування	Просторові дані, топографія, вимоги до програми, зонування	Покращене стратегічне планування, точне прогнозування, раннє виявлення ризиків	Неповнота даних, відсутність інтеграції з GIS та фінансовими системами
Проєктування	Концептуальне, ескізне та детальне проєктування	3D-геометрія, специфікації матеріалів, енергетичні моделі, альтернативи проєктних рішень	Оптимізація проєктування, виявлення конфліктів, візуалізація для стейкхолдерів	Міждисциплінарна координація, складність моделі, невідповідність стандартам
Будівництво	Планування, закупівлі, будівництво	4D-розклад, 5D-вартість, логістика, дані QA/QC	Зменшення затримок і перевитрат, краща координація на майданчику	Оновлення в режимі реального часу, розрив між моделлю та польовими даними, проблеми впровадження BIM підрядниками
Експлуатація	Використання активів, моніторинг, хелпдеск, управління користувачами	Дані реального часу з сенсорів, реєстр активів, шаблони використання	Підвищена ефективність експлуатації, зменшення простоїв, комфорт користувачів	Інтеграція з застарілими системами, ризики кібербезпеки, великий обсяг даних

Обслуговування	Планове та аварійне обслуговування	Робочі замовлення, журнали ремонту, історія збоїв, ідентифікатори компонентів	Проактивне обслуговування, економія коштів, продовження строку служби активів	Непослідовний збір даних, необхідність постійних оновлень
Оптимізація	Управління енергоспоживанням, використання площ	Енергоспоживання, коефіцієнти заповнення, ключові показники ефективності	Економія енергії, відповідність стандартам сталого розвитку, ефективне використання простору	Складна аналітика, інтероперабельність систем, точність даних
Виведення з експлуатації	Перепрофілювання, утилізація, планування реконструкції	Дані LCA, інвентаризація матеріалів, звіти про стан	Стійке повторне використання, економічно ефективне планування завершення життєвого циклу	Неповні історичні дані, невизначеність у власності цифрових моделей

На завершення, ефективне використання даних протягом життєвого циклу об’єкта є фундаментальним для забезпечення обґрунтованого прийняття рішень, оптимізації розподілу ресурсів та продовження терміну служби активів. Як показано, інтеграція різних систем, орієнтованих на дані — від інструментів планування капіталу до автоматизованих платформ технічного обслуговування — підкреслює перехід до цифрово взаємопов’язаної екосистеми. Водночас повне використання потенціалу даних життєвого циклу залежить від того, наскільки безперешкодно ці системи можуть взаємодіяти та реагувати в реальному часі на змінні експлуатаційні потреби та зовнішні умови. Це створює підґрунтя для наступного розділу, який досліджує конвергенцію «розумних» систем у BIM-середовищі. Ці технології виступають критично важливими інструментами для моніторингу в режимі реального часу, автоматизації та адаптивного управління,

додатково зміцнюючи роль BIM як динамічної платформи для стійкого та інтелектуального управління інфраструктурою.

1.4. Інтеграція «розумних» систем (Smart Systems) у BIM: синергії IoT, SCADA та BMS

Суттєвим зрушенням у сучасному будівництві та управлінні інфраструктурою є інтеграція розумних експлуатаційних систем — зокрема IoT (Internet of Things; Інтернет речей), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition; Системи диспетчерського контролю та збору даних), і BMS (Building Management Systems; Системи управління будівлею— у хмарні BIM-середовища (Рис. 1.15). Така інтеграція означає відхід від статичних моделей проєктування до динамічних, багатих на дані екосистем, що забезпечують моніторинг у реальному часі, прогнозне обслуговування та адаптивне управління протягом усього життєвого циклу будівель та інфраструктури. Платформи BIM, пов’язані з IoT, штучним інтелектом (AI) та GIS, еволюціонують у взаємопов’язані цифрові двійники, здатні відтворювати фізичні системи в реальному часі [59]. Ця конвергенція підтримує не лише управління на рівні об’єктів, а й міські симуляції через Міські інформаційні моделі (City Information Models, CIM) [60]. Ці взаємопов’язані моделі є основою для міської стійкості, сталого розвитку та прийняття рішень на основі даних.

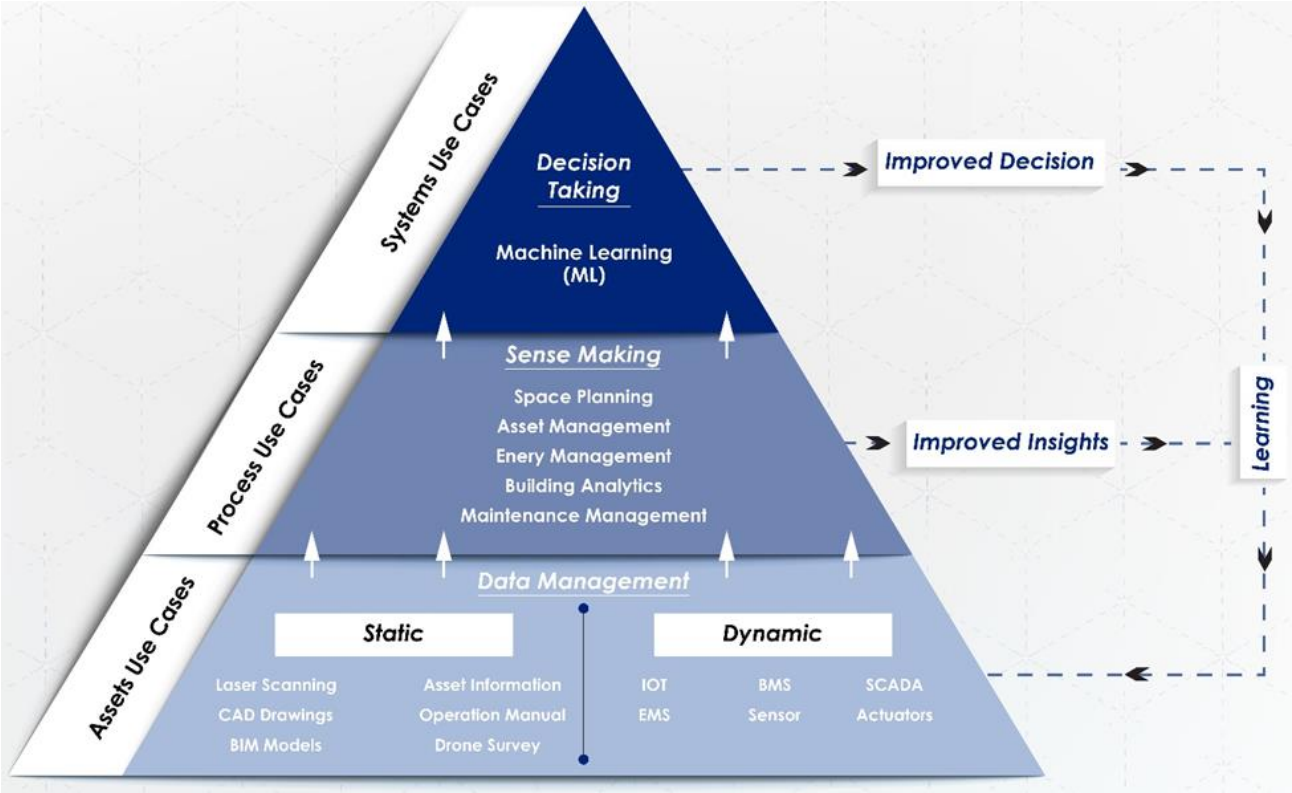


Рис.1.15. Інтеграція «розумних» систем (Smart Systems) у BIM для покращення процесу прийняття рішень [61]

Інтернет речей (Internet of Things, IoT): фундамент розумної інфраструктури

Інтернет речей (IoT) — це мережа фізичних об’єктів, таких як сенсори, пристрої та системи, обладнані програмним забезпеченням та засобами підключення, що дозволяють збирати, обмінюватися та реагувати на дані в реальному часі. У контексті побудованого середовища IoT дозволяє будівлям «відчувати» та контролювати параметри, такі як температура, вологість, структурні коливання, енергоспоживання та заповненість приміщень [59]. Ці взаємопов’язані пристрої передають дані через Інтернет або локальні мережі, що робить можливим автоматизацію операцій, підтримку прогнозного обслуговування та підвищення ефективності прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу будівлі (Рис. 1.16).

Інтеграція BIM з IoT є трансформаційним кроком у цифровому управлінні існуючими будівлями, особливо на етапі експлуатації та обслуговування (O&M) — найтривалішому та найвитратнішому періоді життєвого циклу будівлі. Як повідомляють Altohami та ін.. [62], O&M складає до 85% від загальної вартості

проєкту, переважно через витрати на працю, матеріали та постійне обслуговування. Проте дані, необхідні для ефективного управління на цьому етапі, часто залишаються фрагментованими, застарілими або збираються вручну, що ускладнює обґрунтоване прийняття рішень, особливо під час модернізації та реконструкції.

Рис.1.16. IoT для будівельного активу [63]

Щоб подолати ці обмеження, інтеграція BIM–IoT з'явилася як ефективне рішення, що забезпечує моніторинг у реальному часі, прогнозне обслуговування та розширене енергоменеджмент через конвергенцію цифрових моделей та даних з сенсорів у триетапній моделі [62]:

- **Створення відкритого сховища** — розробляються уніфіковані та семантично насичені сховища даних на основі промислових стандартів (наприклад, ISO 16739, ISO 12006), що забезпечує структуроване надходження та витяг даних.
- **Збір BIM- та живих даних** — архітектурні, структурні та MEP-дані цифровізуються та інтегруються з IoT-сенсорами за допомогою технологій лазерного сканування, фотограмметрії та цифрового картографування.
- **Передача живих даних у сховище** — постійний потік даних у реальному часі (наприклад, від HVAC, показників заповненості, лічильників енергії)

пов’язується з BIM-середовищем через API та реляційні бази даних, забезпечуючи актуальні цифрові двійники.

Окрім технічного аспекту, інтеграція BIM з IoT є концептуальною, оскільки будівельні системи стають все складнішими через зростаючі вимоги до сталого розвитку та безпеки. Вона передбачає перехід від статичних моделей до динамічних середовищ, керованих даними, де цифрові двійники дозволяють проводити симуляції, відстежувати продуктивність та планувати сценарії. Ці можливості критично важливі для оптимізації енергоспоживання, яке нині становить значну частку світового споживання в існуючих будівлях [62, 64].

Коли IoT інтегрований із BIM, він створює зворотний зв’язок між цифровою моделлю та фізичним середовищем. Сенсори IoT, вбудовані у конструкції, передають дані у BIM-платформи, дозволяючи візуалізувати ключові параметри в реальному часі, такі як температура, напруження, вологість та заповненість приміщень [61, 65]. Така інтеграція дозволяє зацікавленим сторонам:

- Виявляти неефективне використання енергії або простору;
- Моделювати продуктивність будівлі за різних умов;
- Запускати попередження та втручання у разі аномалій (наприклад, у зонах, схильних до стихійних лих);
- Інформувати про рішення протягом усього життєвого циклу — від проєктування до обслуговування.

У результаті виникає «самоусвідомлена» інфраструктура, де BIM функціонує не лише як інструмент проєктування, а як постійно оновлюваний цифровий двійник, що сприяє управлінню на основі даних..

Проте залишаються певні виклики. Інтероперабельність гетерогенних систем, кібербезпека та потреба у кваліфікованих фахівцях є постійними бар’єрами. Для повного розкриття потенціалу розумної інфраструктури необхідні стандартизовані протоколи, надійне управління даними та інвестиції у підготовку персоналу [61, 66]. Основні виклики інтеграції BIM–IoT включають:

- **Кібербезпека:** потік конфіденційних даних у реальному часі потребує надійного шифрування та управління;
- **Інтероперабельність:** системи повинні дотримуватись спільних стандартів і протоколів для безперебійної роботи;
- **Масштабованість та вартість:** високі початкові інвестиції та технічна складність можуть обмежувати впровадження;
- **Проблема кваліфікації:** управління цими технологіями потребує міждисциплінарної експертизи у сферах IT, інженерії та аналітики даних.

Підсумовуючи, інтеграція IoT та BIM — це не просто технологічне вдосконалення, а трансформаційний крок у тому, як інфраструктура проєктується, контролюється та управляється. Вбудовуючи потоки даних у реальному часі в структуру побудованого середовища, така конвергенція підтримує не лише операційну ефективність, а й ширші цілі сталого розвитку, стійкості та орі

SCADA-системи у BIM-робочих процесах: до інтелектуального управління в реальному часі

У міру зростання складності будівельних систем та підвищення потреби в прийнятті рішень на основі даних у реальному часі, системи диспетчерського контролю та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) стають ключовими компонентами середовищ, що підтримують BIM. Традиційно застосовувані в промисловій автоматизації та управлінні комунальними послугами, SCADA-платформи все частіше інтегруються у розумні будівельні екосистеми для моніторингу, контролю та оптимізації фізичних активів. Їх здатність централізувати телеметричні дані, виконувати командні дії та візуалізувати роботу систем у реальному часі органічно поєднується з цілями BIM — особливо на етапах експлуатації та обслуговування життєвого циклу будівлі [67].

У своїй основі SCADA-системи поєднують польові сенсори, віддалені термінальні пристрої (remote terminal units, RTUs) або програмовані логічні контролери (programmable logic controllers, PLCs), комунікаційну інфраструктуру та інтерфейс «людина-машина» (human-machine interface, HMI). Сенсори фіксують

фізичні параметри, такі як температура або витрата, які обробляються RTU або PLC ([68]; Рис. 1.17). Дані передаються через комунікаційні мережі на HMI, де оператори можуть візуалізувати їх та приймати обґрунтовані рішення. Така взаємопов'язана архітектура забезпечує як моніторинг у реальному часі, так і автоматизовані реакції, дозволяючи своєчасно втручатися та забезпечувати плавну роботу систем.

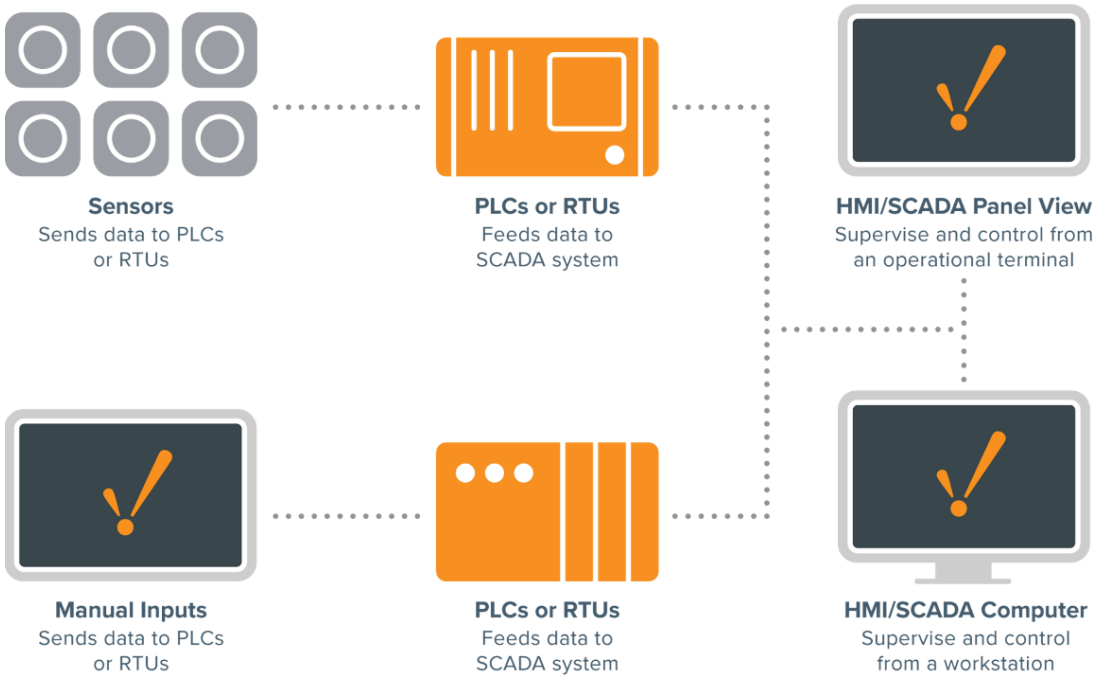


Figure 17. Базова діаграма SCADA [68]: sensors, remote terminal units RTUs, programmable logic controllers PLCs, human-machine interface HMI (сенсори, віддалені термінальні пристрої, програмовані логічні контролери, інтерфейс «людина-машина»)

Проєктування SCADA-системи для будівництва вимагає ретельного підбору обладнання, сумісного з умовами майданчика, надійних і масштабованих комунікаційних мереж та чіткого визначення логіки керування, адаптованої до потреб проєкту. Кібербезпека та обслуговуваність також є критично важливими, враховуючи вплив цифрових та екологічних ризиків.

Архітектура SCADA — часто узгоджена з Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) [69] — охоплює рівні від 0 (польові пристрої) до 4 (бізнес-системи), забезпечуючи ієрархічну структуру, яка гарантує послідовний потік

даних та управління від фізичного рівня до стратегічного менеджменту ([70], Рис. 1.18):

- **Рівень 0 – Польові пристрої (Field Devices):** цей базовий рівень включає фізичні пристрої, такі як сенсори, що збирають дані в реальному часі з навколишнього середовища, та виконавчі механізми, які виконують контрольні дії на основі команд системи.
- **Рівень 1 – Прямий контроль (Direct Control):** на цьому рівні локальне обладнання, наприклад PLC і RTU, взаємодіє безпосередньо з польовими пристроями, збирає дані сенсорів та подає сигнали на виконавчі механізми, часто з використанням спеціальних процесорів або вбудованих систем для конкретних завдань.
- **Рівень 2 – Локальний нагляд (Local Supervision):** включає системи нагляду, що координують та моніторять контролери рівня 1. Містить інструменти управління тривогами, базовий аналіз даних та візуалізацію процесів для ефективної локальної роботи.
- **Рівень 3 – Контроль на рівні майданчика (Site-Wide Control):** централізовані платформи консолідують дані з усієї ділянки чи об’єкта. Вони забезпечують високорівневий контроль, звітність та взаємодію з HMI, підтримуючи системи оповіщення та інтеграцію з комплексними операціями.
- **Рівень 4 – Управління операціями (Operations Management)**: зосереджений на плануванні та координації виробництва, поєднує реальні операції з бізнес-системами. Містить інструменти для розкладів, логістики та оптимізації процесів.
- **Рівень 5 – Корпоративні IT-системи (Enterprise IT, поза SCADA):** хоча зазвичай не входить до домену SCADA, включає корпоративні сервіси, такі як HR-системи, CRM, внутрішні комунікації та кібербезпеку, зазвичай розміщені у корпоративних дата-центрах.

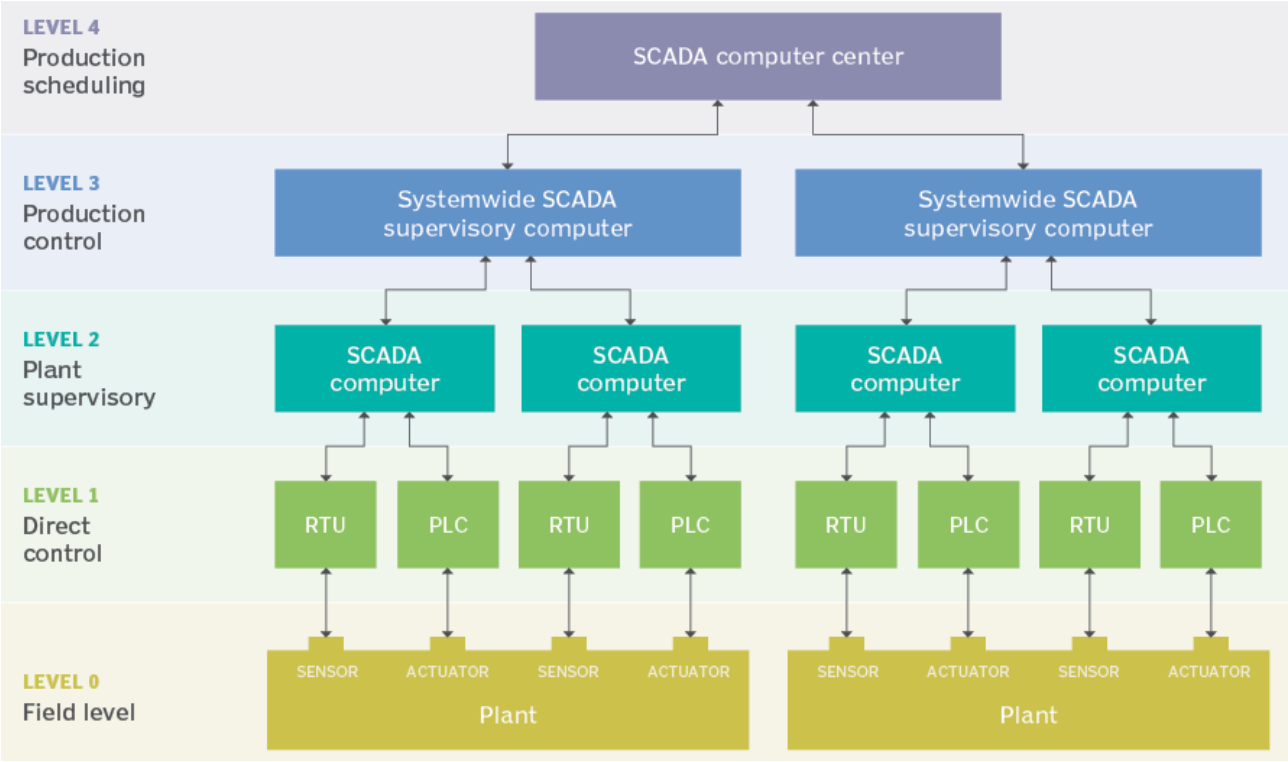


Рис.2.18. Рівні архітектури SCADA-системи [70]

Сучасні SCADA-системи значно перевищують свої початкові функції базового контролю та моніторингу. Вони тісно інтегровані з хмарними обчисленнями, платформами IoT та edge computing, що забезпечує дистанційне управління, масштабоване зберігання даних та прогнозне обслуговування. Ці можливості особливо критичні у таких секторах, як енергетика, водопостачання, виробництво та транспорт, де відмови можуть призвести до значних фінансових втрат та соціальних порушень. У таких критично важливих середовищах SCADA-системи забезпечують не лише ефективність та безперервність операцій, а й розвиток стійкої цифрової інфраструктури, особливо у віддалених або небезпечних зонах. На відміну від застарілих монолітних архітектур, сучасні SCADA-платформи модульні, інтероперабельні та підтримують стандартні протоколи зв’язку та веб-інтерфейси. Модульність спрощує інтеграцію з іншими цифровими технологіями, включаючи BIM, GIS та аналітику на основі AI. Хоча традиційні SCADA покладалися на дротову інфраструктуру, сучасні впровадження все частіше підтримують бездротове підключення та розподілену логіку, відповідаючи принципам розумної інфраструктури [68].

У будівельному секторі SCADA-системи забезпечують значні операційні переваги [67]. Вони автоматизують рутинні завдання, мінімізують час простою завдяки ранньому виявленню несправностей та підтримують стратегії прогнозного обслуговування. Оповіщення у реальному часі — спрацьовування при аномаліях, таких як перегрів чи витік газу — знижують зношування обладнання та підвищують безпеку на майданчику. З часом оптимізація енергоспоживання та ефективніше використання ресурсів сприяють значній економії коштів.

Ключовим прогресом є інтеграція SCADA з BIM [67]. Ця взаємодія перетворює статичні цифрові моделі на динамічні інструменти управління, вбудовуючи дані сенсорів у реальному часі, такі як температура, напруга або тиск, у 3D-просторовий контекст інфраструктурних об’єктів. Інтеграція підтримує не лише візуальну аналітику, а й прогнозне втручання, забезпечуючи більш оперативне та обґрунтоване прийняття рішень. Практичним прикладом є інтеграція SCADA з BIM та цифровими двійниками у підстанціях середньої та низької напруги. У цьому випадку живі електричні параметри візуалізувалися у BIM-середовищі, підтримуючи оцінку ризиків та підвищуючи безпеку [71]. Аналогічно, динамічні BIM-моделі, пов’язані з SCADA, можуть виявляти несправності обладнання, наприклад кранів, та автоматично оновлювати графік технічного обслуговування або робочі процеси в реальному часі. Ця концепція узгоджується з парадигмою (Dynamic Digital Twin), де BIM перестає бути статичним артефактом проєктування та стає системою, що активно відображає умови в реальному часі через автоматизовані зворотні зв’язки [72]. SCADA-системи використовуються для моніторингу роботи HVAC, управління твердінням бетону та потоком матеріалів, відстеження стану важкої техніки. У поєднанні з BIM ці застосунки отримують контекстний інтерфейс, підвищуючи прозорість під час будівництва та експлуатації [67].

Проте залишаються численні проблеми впровадження [73]. Фрагментовані екосистеми обладнання, часті зміни планування майданчика та різні стандарти комунікації ускладнюють безшовне впровадження. Вирішення цих проблем потребує інвестицій у модульну архітектуру, використання відкритих протоколів

зв’язку та цільового навчання персоналу. Кібербезпека також є ключовим аспектом, що вимагає надійного шифрування, безпечного проєктування мереж та захисту пристроїв на польовому рівні.

У перспективі SCADA-системи відіграватимуть центральну роль у розумних будівельних середовищах. Хмарні платформи тепер підтримують централізований моніторинг розподілених об’єктів. Конвергенція з AI та машинним навчанням дозволяє системам перейти від реактивного моніторингу до прогнозної аналітики та автономного управління. Технології доповненої реальності (Augmented Reality, AR) починають візуалізувати дані в реальному часі безпосередньо на майданчику, тоді як IoT-пристрої розширюють спектр вимірюваних змінних — від структурних напружень до параметрів навколишнього середовища. Повне розкриття потенціалу інтеграції SCADA та BIM вимагає застосування стандартизованих семантичних фреймворків та інтероперабельних моделей даних [74]. Узгодження телеметрії SCADA з властивостями об’єктів BIM є критично важливим для забезпечення змістовного аналізу та адаптивної автоматизації. Цей підхід підтримує ширше бачення концепції Big BIM Data, де SCADA живить хмарні аналітичні платформи для оптимізації продуктивності об’єктів та стратегій життєвого циклу. Інтеграція SCADA у BIM створює кібер-фізичну екосистему, де цифрові моделі є не просто пасивними записами, а активними складовими оперативної аналітики. Така синергія надає зацікавленим сторонам контекстуальну інформацію у реальному часі, що підвищує безпеку, продуктивність і сталий розвиток. У міру розвитку цифрової інфраструктури взаємозв’язок BIM–SCADA стане основою наступного покоління систем управління будівлею (Building Management Systems, BMS), координуючи різні підсистеми — такі як HVAC, освітлення, енергоспоживання та безпека — у єдине інтелектуальне середовище.

Роль BMS у середовищах з BIM

Системи управління будівлею (Building Management Systems, BMS), також відомі як системи автоматизації будівель (Building Automation Systems, BAS) або системи контролю автоматизації будівель (Building Automation Control Systems,

BACS) є централізованими комп’ютерними платформами, які підключаються до апаратного забезпечення об’єкта та підсистем через сенсори та виконавчі механізми, збираючи дані про роботу в реальному часі та виконуючи заздалегідь визначену логіку керування ([75], Рис.1.19). Така інтеграція на основі даних забезпечує точне регулювання температури, рівнів освітлення, потоків енергії та функцій контролю доступу, які раніше керувалися окремо. Сучасні впровадження BMS виходять за межі оптимізації енергоспоживання: вони забезпечують комфорт користувачів, спрощують обслуговування та надають корисні дані про ефективність роботи будівлі [76]. У поєднанні з BIM BMS отримує просторово-контекстуалізований інтерфейс, що дозволяє операторам контролювати та управляти системами через інтуїтивне 3D-середовище. Замість перегляду розрізнених панелей керування, менеджери об’єктів можуть взаємодіяти з цифровими двійниками активів і приміщень, візуалізуючи поточні параметри, такі як відхилення температури, рівень CO2 або несправності обладнання, у геометричній моделі будівлі. Така інтеграція сприяє прийняттю обґрунтованіших рішень та швидшому реагуванню, особливо в складних об’єктах, таких як лікарні, аеропорти чи високоповерхові офісні будівлі. Сучасні платформи BMS пропонують моніторинг енергоспоживання в реальному часі, інтеграцію IoT-пристроїв та централізоване управління розподіленими системами [76]. У таких конфігураціях дані з датчиків HVAC, детекторів руху або сонячних інверторів передаються до BMS, яка може здійснювати коригування в реальному часі або надсилати попередження для прогнозного обслуговування. Коли ця інформація відображається у BIM-моделі, зацікавлені сторони — від інженерів до менеджерів об’єктів — отримують прозорість операцій та контроль на мікро- та макрорівнях [77].

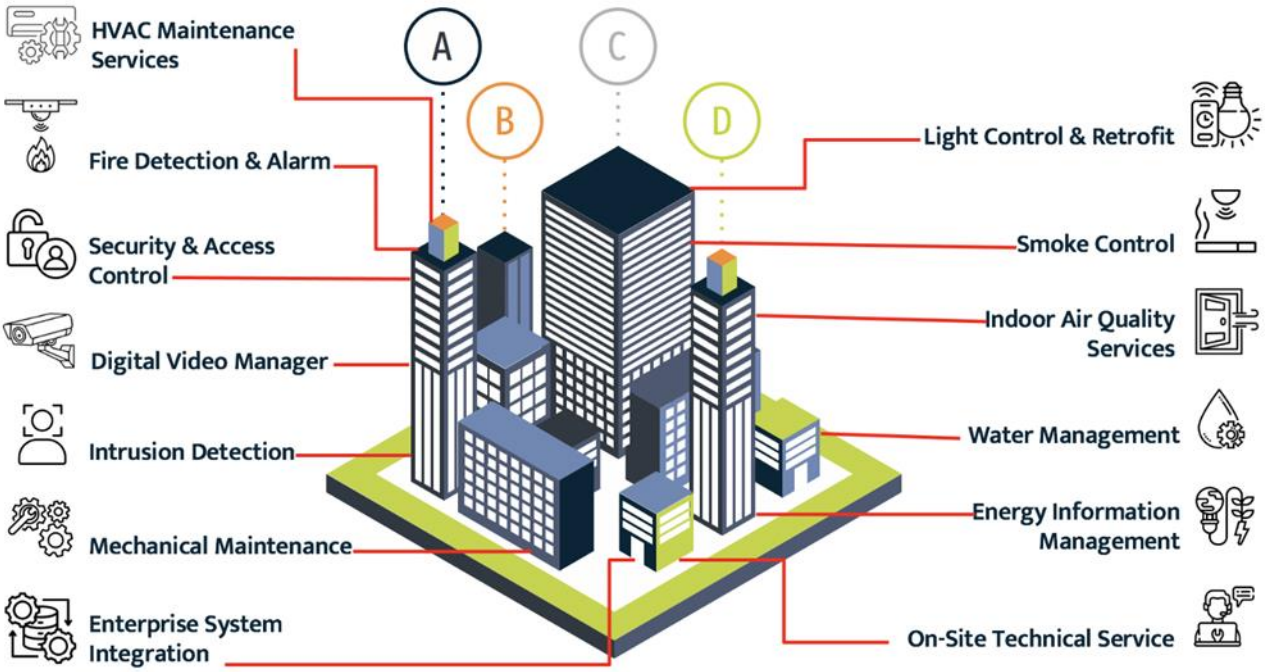


Рис.1.19. Системи управління будівлею (Building Management Systems, BMS) [76]: HVAC Maintenance services, Fire detection & alarm, security &access control, digital video manager, intrusion detection, mechanical maintenance, enterprise system integration, light control & retrofit, smoke control, indoor air quality services, water management, energy information management, on-site technical service (Послуги з технічного обслуговування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, пожежна сигналізація та сигналізація, безпека та контроль доступу, цифровий відеоменеджер, виявлення вторгнень, механічне обслуговування, інтеграція корпоративних систем, керування та модернізація освітлення, контроль диму, послуги з якості повітря в приміщеннях, управління водними ресурсами, управління енергетичною інформацією, технічне обслуговування на місці)

Архітектура BMS зазвичай поділяється на три рівні: польовий, автоматизації та управління (Рис.1.20). На польовому рівні різні сенсори (наприклад, для вимірювання температури, вологості, присутності людей, якості повітря) та виконавчі механізми (наприклад, клапани, заслінки) взаємодіють безпосередньо з середовищем будівлі, збираючи дані в реальному часі та виконуючи керуючі дії. Ці компоненти передають інформацію на рівень автоматизації, де програмовані

контролери — часто Direct Digital Controllers (DDC) — агрегують та аналізують дані порівняно з заданими параметрами та умовами. Контролери видають команди для оптимізації роботи систем, наприклад, регулюючи швидкість повітряного потоку або графіки освітлення. Цей середній рівень забезпечує чітке управління та координацію систем. Найвищий рівень — управлінський, який надає графічний інтерфейс користувача (GUI) через Human-Machine Interfaces (HMI) або веб-додатки. Цей рівень дозволяє користувачам візуалізувати ефективність систем, реагувати на тривоги та приймати стратегічні операційні рішення. Сучасні платформи BMS також пропонують аналіз трендів, інструменти звітності та інтеграцію з хмарними платформами, що є ключовими для впровадження AI та прогнозного обслуговування [78].

Апаратна основа BMS включає панелі управління, зазвичай розміщені у машинних приміщеннях, що централізують обробку даних і логіку контролерів [75]. Сенсори по всій будівлі відстежують змінні середовища, а виконавчі механізми та лічильники здійснюють локальне керування та моніторинг. Компоненти з’єднані через комунікаційну інфраструктуру, яка може бути дротовою (наприклад, Ethernet) або бездротовою (наприклад, Zigbee, Wi-Fi) залежно від планування будівлі та експлуатаційних вимог. У випадках модернізації бездротові системи часто забезпечують швидше впровадження з меншим втручанням у діяльність користувачів і інфраструктуру. Комунікація між компонентами BMS регламентується стандартними протоколами, такими як BACnet та Modbus, що забезпечують сумісність різних пристроїв і виробників [78]. Ці протоколи визначають, як структуруються, обмінюються та інтерпретуються дані, дозволяючи старим системам надійно взаємодіяти з сучасними IoT-пристроями. Зокрема, BACnet став широко застосовуваним протоколом у середовищах розумних будівель завдяки підтримці інтеграції HVAC, освітлення та безпеки.

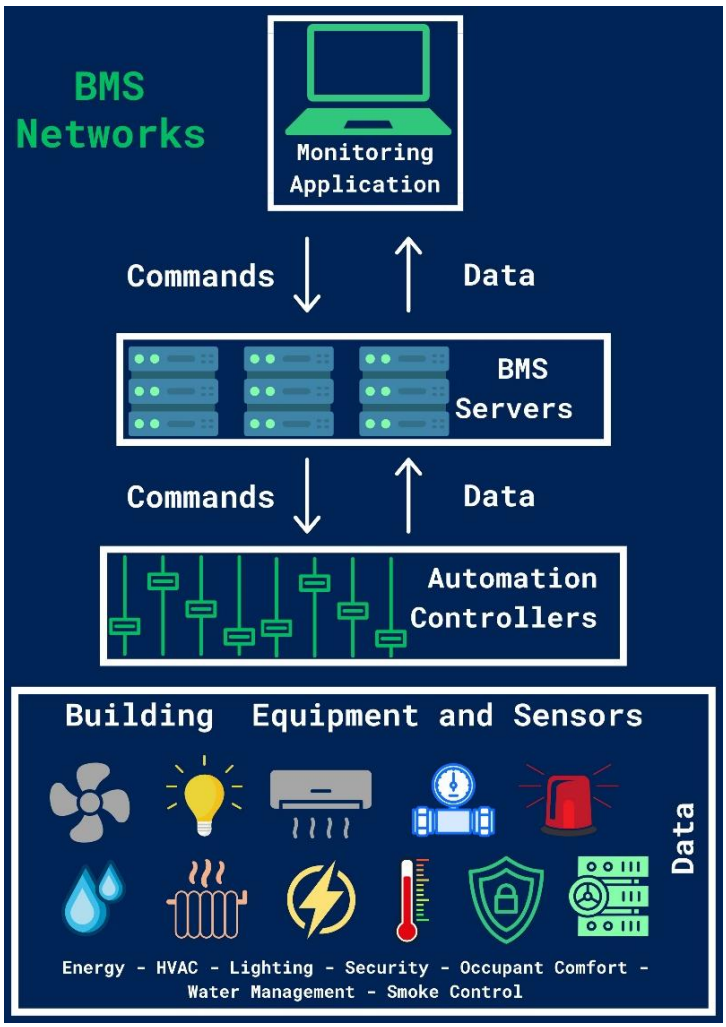


Рис. 1.20. Архітектура BMS [78]: commands, data, BMS servers, automation controllers, building equipment and sensors (команди, дані, сервери BMS, контролери автоматизації, будівельне обладнання та датчики)

Впровадження сучасного BMS приносить численні операційні, економічні та екологічні переваги ([78]; Таблиця 1.6). Однією з найважливіших переваг є енергоефективність. Добре інтегрований BMS автоматизує та оптимізує роботу ключових механічних та електричних систем, таких як HVAC, освітлення та розподіл електроенергії. Можливість регулювати температуру залежно від присутності людей та інтелектуально керувати освітленням значно знижує енергоспоживання. Використання розумного планування та вентиляції за потребою дозволяє тонко налаштовувати роботу систем і мінімізувати втрати енергії, що забезпечує значну економію коштів у довгостроковій перспективі. Окрім управління енергією, BMS підвищує комфорт користувачів, підтримуючи стабільні

внутрішні умови. Автоматичне регулювання температури, вологості та якості повітря на основі даних у реальному часі створює більш здорове та продуктивне середовище. Крім того, BMS сприяє безпеці, інтегруючи аварійні системи — такі як датчики диму та пожежні сигналізації — у централізовану платформу, що забезпечує швидке та скоординоване реагування під час критичних подій. Регулярний моніторинг і самокорекція також знижують ризик збоїв системи. Операційна ефективність є ще однією ключовою перевагою. BMS допомагає зменшити витрати на обслуговування та продовжити термін служби обладнання, сприяючи прогнозному обслуговуванню та ранньому виявленню несправностей. Менеджери об'єктів отримують доступ до централізованих даних, що спрощує проходження аудитів та підтримує стратегічне прийняття рішень. Дотримання нормативних вимог, особливо жорстких стандартів енергоспоживання та викидів, також спрощується завдяки автоматизованій звітності, підвищуючи екологічну відповідальність будівель та їх ринкову вартість. Крім того, BMS покращує управління активами, відстежуючи показники ефективності та забезпечуючи процеси відповідно до ISO 55000. Підвищена безпека, така як контроль доступу та моніторинг у реальному часі, гарантує захист як користувачів, так і інфраструктури.

Таблиця 1.6. Інтеграція BMS: переваги та виклики

Категорія	Переваги	Виклики
Управління енергією	- Зниження споживання енергії через автоматизацію - Зменшення рахунків за комунальні послуги	- Старі системи можуть бути несумісними - Складна інтеграція з існуючою інфраструктурою
Комфорт користувачів	- Стабільний внутрішній клімат - Автоматичне регулювання залежно від присутності або графіку	- Потребує постійної калібровки - Необхідний зворотний зв'язок від користувачів для оптимальних налаштувань
Операційні витрати	- Прогнозне обслуговування зменшує простої - Подовжує термін служби обладнання	- Високі початкові витрати на встановлення - ROI може затримуватися без належного налаштування

Безпека	- Центральне управління пожежними, димовими та сигналізаціями - Покращене реагування на надзвичайні ситуації	- Збільшуються ризики кібербезпеки - Складне управління системою
Відповідність та звітність	- Підтримка зелених сертифікацій - Автоматичне ведення даних для регуляторних органів	- Потрібне навчання персоналу для правильного використання даних
Управління активами	- Прийняття рішень на основі даних - Інтеграція з ISO 55000	- Можливі високі витрати на оновлення систем - Ризик залежності від конкретного постачальника

Незважаючи на переваги, впровадження BMS має власні виклики ([78]; Таблиця 1.6). Однією з основних проблем є складність інтеграції, особливо у старих будівлях, які спочатку не були спроєктовані для централізованої автоматизації. Проблеми сумісності між старим обладнанням і сучасними системами вимагають ретельного планування та іноді дорогих модернізацій. Традиційні BMS також часто обмежені в аналітиці енергоспоживання та локалізації несправностей. Наприклад, виявлення джерела теплових аномалій, таких як несправний блок обробки повітря, може бути непростим без покращеної аналітики. Вартість є ще однією значущою проблемою. Високі початкові інвестиції особливо характерні для сучасних та повністю інтегрованих систем. Хоча ці витрати зазвичай компенсуються довгостроковою економією, вони можуть стримувати впровадження, особливо в менших об’єктах. Крім того, ефективне використання BMS залежить від навчання персоналу: оператори повинні розуміти, як інтерпретувати дані системи та вчасно приймати рішення [75].

У світі вимоги щодо впровадження BMS різняться залежно від регіону. У Сполучених Штатах та Великій Британії наразі не існує загальної законодавчої вимоги щодо встановлення BMS у комерційних будівлях. Проте Європейський Союз зайняв більш активну позицію. Згідно з Директивою щодо енергетичної ефективності будівель (EPBD) [79], усі третинні будівлі з ефективною встановленою потужністю понад 290 кВт зобов’язані інтегрувати BACS до січня 2025 року. Ця директива, прийнята у 2020 році, відображає прагнення ЄС

підвищити енергоефективність будівель та зменшити викиди. У міру того, як держави-члени впроваджують директиву у національне законодавство, впровадження BMS стає обов'язковим для зростаючої кількості об'єктів, особливо готелів, офісів і складів [78].

Вартість встановлення або модернізації BMS залежить від кількох факторів [78]. Розмір і тип будівлі є ключовими детермінантами; великі та складні об'єкти, такі як лікарні або дата-центри, природно потребують більших витрат через високі експлуатаційні вимоги. Ще один фактор — ступінь інтеграції систем: системи, що підключаються до освітлення, HVAC, пожежної безпеки та контролю доступу, коштуватимуть дорожче, але забезпечать вищий довгостроковий ефект. Важливим чинником вартості є відкритість системи. Відкриті, непатентовані платформи зазвичай забезпечують кращу довгострокову цінність, підтримуючи інтеграцію сторонніх рішень і аналітичні можливості. Середовище встановлення також має значення: модернізація старих будівель зазвичай дорожча, ніж впровадження BMS у нових спорудах через проблеми сумісності зі старими системами. Загалом, вартість встановлення BMS коливається від $2,50 до $7,50 за квадратний метр. Для будівель площею понад 50 000 квадратних футів ці інвестиції часто окупаються за рахунок підвищеної операційної ефективності. Тому правильний вибір постачальника та технологічного пакету є критично важливим для балансування початкових витрат і довгострокових вигод.

Кілька глобальних компаній є лідерами у сфері BMS (Таблиця 1.7), пропонуючи складні та широко впроваджувані рішення. Ці компанії відіграють ключову роль у формуванні світового ринку BMS через інновації, масштабованість та міжсекторне застосування [78].

Таблиця 1.7. Основні постачальники BMS

Компанія	Переваги
Honeywell	Глобальна присутність; сильні рішення для автоматизації та енергоменеджменту. Володіє Trend (UK/IE).
Johnson Controls	Система Metasys; сильна позиція у глобальному HVAC та енергоменеджменті.

Schneider Electric	Платформа EcoStruxure; акцент на інтеграцію IoT та smart grid.
Siemens	Системи Desigo і Synco; відомі глибокою інтеграцією у промисловості.
Emerson	Орієнтовані на високопродуктивні об’єкти та енергоефективне керування.

На завершення, системи управління будівлею (BMS) еволюціонують від статичних платформ керування до інтелектуальних, адаптивних екосистем, що реалізуються завдяки IoT, AI та машинному навчанню. Ці технології підвищують чутливість системи, прогнозні можливості та загальну енергетичну ефективність, одночасно підтримуючи цілі декарбонізації та кліматичної стійкості. У міру того, як будівлі стають все більш насиченими даними та взаємопов’язаними, BMS слугують не лише інструментами операційної ефективності, але й механізмами забезпечення довгострокової стійкості та орієнтованого на користувача дизайну. Інтеграція BMS у середовище BIM додатково підвищує їхню цінність, трансформуючи традиційні моделі в динамічні кібер-фізичні системи. Це зближення готує основу для наступного етапу інтелектуального управління будівельним середовищем — цифрових двійників (Digital Twins, DT), які забезпечують двосторонній міст у реальному часі між фізичними активами та їхніми віртуальними копіями.

Цифрові двійники для управління активами в режимі реального часу

Цифрові двійники (Digital Twins, DT) представляють найрозвиненіший рівень цифрової еволюції в будівництві та управлінні об’єктами. На відміну від статичних цифрових моделей, DT створюють живе, безперервно оновлюване віртуальне подання фізичного активу — будь то компонент, система чи ціла будівля — шляхом інтеграції даних у реальному часі з сенсорів, IoT-пристроїв та BMS (рис. 1.21). Такий безперервний обмін даними забезпечує не лише моніторинг у реальному часі, а й просунуте моделювання, прогнозну аналітику та автоматизоване прийняття рішень.

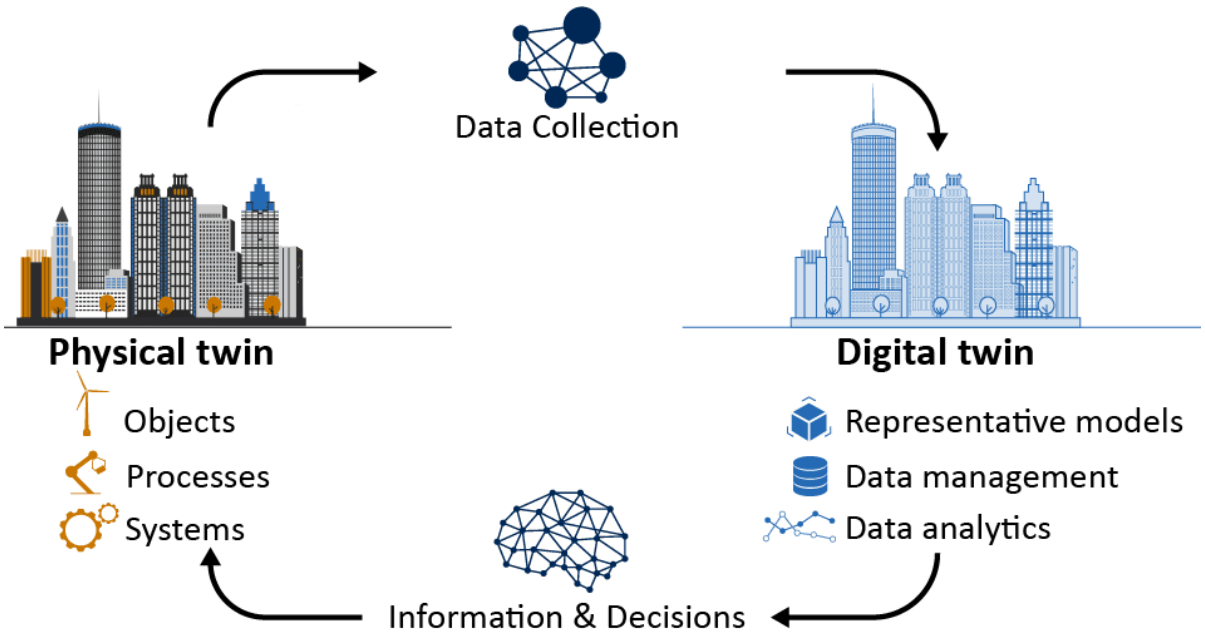


Рис.1.21. DT для оцінки в реальному житті [80]: Physical twin- objects, processes, systems; Digital twin-representative models, data management, data analytics; data collection; information & decisions (Фізичний двійник – об'єкти, процеси, системи; цифрові двійники – репрезентативні моделі, управління даними, аналітика даних; збір даних; інформація та рішення)

Цифрові двійники зазвичай класифікують залежно від масштабу та сфери застосування [81]:

- **Продуктивністні цифрові двійники (Product digital twins)** відтворюють окремі фізичні активи і широко використовуються у виробництві для тестування та оптимізації продуктивності продукту за різних умов.
- **Процесні цифрові двійники (Process digital twins)** моделюють робочі процеси, наприклад виробничі лінії або ланцюги постачання, що дозволяє оптимізувати процеси в реальному часі та підвищувати ефективність.
- **Системні цифрові двійники (System digital twins)** об’єднують продуктові та процесні моделі для представлення цілих систем, дозволяючи інтегровану аналітику та управління складними взаємодіями.

Крім цих основних категорій, з’являються більш специфічні типи [81]. Наприклад, **Performance Twins** зосереджені на безперервному моніторингу та прогнозному обслуговуванні, **Operational Twins** надають інформацію в реальному

часі для оптимізації реагування та використання ресурсів, а **Environmental Twins** моделюють вплив на навколишнє середовище та спрямовують стратегії сталого розвитку.

У промислових умовах DT підвищують продуктивність і ефективність використання ресурсів, дозволяючи моделювати сценарії в реальному часі, що допомагає планам виробництва динамічно адаптуватися до змінних умов. Завдяки оптимізації комунікацій у ланцюгу постачання та ранньому виявленню неефективностей вони зменшують витрати матеріалів і затримки в операціях. Цифрові двійники також полегшують віртуальне введення в експлуатацію обладнання, моделюють системи відстеження та покращують координацію всередині та між виробничими підрозділами. Вплив DT на управління активами полягає у консолідації даних у реальному часі про стан і продуктивність обладнання, що скорочує час і витрати на обслуговування. Прогнозування майбутніх потреб у технічному обслуговуванні та оптимізація графіків втручання зменшують незаплановані простої та продовжують термін служби активів. Крім того, цифрові двійники підвищують безпеку експлуатації, мінімізуючи ризики несподіваних відмов, а також забезпечують постійне поліпшення якості активів і продуктивності систем [81].

DT можна визначити через наявність трьох фундаментальних елементів [82]:

- **Фізичний аналог (Physical Counterpart):** кожен цифровий двійник повинен бути прив’язаний до реального активу — будівлі, мосту, машини або міської системи. Цей фізичний об’єкт не є лише концептуальною моделлю, а справжнім функціонуючим об’єктом, який генерує дані через сенсори, використання та взаємодію з середовищем.
- **Цифрове представлення (Digital Representation):** це високоточна, динамічна модель, що відображає фізичний актив у віртуальному просторі. Вона містить не лише геометричну та матеріальну інформацію (як у BIM), а й дані про поведінку, експлуатацію та продуктивність. Цифрове представлення розвивається паралельно з реальним об’єктом, відображаючи зміни, такі як зношення, шаблони використання чи вплив навколишнього середовища.

- **Двостороннє з'єднання в реальному часі (Real-Time, Bi-Directional Connection (відносини «двійника»; the "twin relationship"):** ключова особливість цифрового двійника полягає у живому зв'язку з фізичним аналогом. Дані передаються від фізичного об'єкта до цифрової моделі через вбудовані сенсори та IoT-системи, що забезпечує оновлення стану в реальному часі. Важливо, що зв'язок двосторонній: інформація, аналітика та навіть керівні дії з цифрової моделі можуть впливати на фізичний актив. Це створює зворотний зв'язок, що підтримує прогнозне обслуговування, оптимізацію та автономне прийняття рішень.

Отже, якщо BIM фокусується на структурованому моделюванні та семантичному представленні будівельних активів, цифрові двійники розширюють його можливості, включаючи дані сенсорів у реальному часі та моделювання сценаріїв. Це дозволяє динамічну взаємодію з фізичним світом, роблячи DT не просто статичними моделями, а адаптивними системами. Еволюція від BIM до цифрових двійників може бути підсумована за трьома вимірами:

- **Масштаб:** BIM орієнтований на фізичні та структурні аспекти активів, тоді як DT включають операційні, екологічні та поведінкові компоненти.
- **Комунікація:** DT підтримують двосторонній потік даних між фізичним та віртуальним середовищем, забезпечуючи оновлення в реальному часі та прогнозну аналітику.
- **Структура:** у той час як BIM базується на стандартизованих статичних структурах даних, DT є динамічними системами, здатними адаптуватися до змінних умов і вхідних даних.

Функціональність цифрового двійника сильно залежить від надійності його цифрової інфраструктури. IoT забезпечує комплексний збір даних із середовища, а BMS виступає операційним каркасом, що контролює та реагує на ці дані. Разом ці шари живлять DT, дозволяючи йому моделювати майбутні стани, тестувати сценарії та оптимізувати продуктивність без втручання у фізичну систему. DT надають унікальну можливість візуалізувати і оцінювати поведінку будівлі з часом,

визначати потреби в обслуговуванні до виникнення відмов та планувати адаптивні оновлення або аварійні заходи з безпрецедентною точністю.

У міру того, як цифрові двійники все більше впроваджуються у галузі AEC і практиках управління активами, їхня роль у підвищенні продуктивності, зниженні ризиків і поліпшенні прийняття рішень загально визнається. DT забезпечують трансформаційний перехід від реактивного до проактивного управління активами, інтегруючи дані сенсорів у реальному часі, прогнозну аналітику та інтелектуальні моделювання. Вони дозволяють зацікавленим сторонам візуалізувати, тестувати та коригувати роботу фізичних активів до реальних втручань, підвищуючи безпеку, ефективність та стійкість. Водночас впровадження DT створює новий комплекс технічних, фінансових та організаційних викликів. До них належать високі початкові витрати, складність інтеграції даних, ризики кібербезпеки та потреба у спеціалізованих навичках. Крім того, масштабування DT для великих інфраструктурних мереж або публічних систем піднімає питання сумісності, конфіденційності даних та довгострокового обслуговування (Таблиця 1.8).

Таблиця 1.8. Цифрові двійники у управлінні активами в реальному часі: переваги та виклики

Переваги	Виклики
Моніторинг і контроль активів у реальному часі, що підвищує операційну ефективність	**Високі початкові витрати на впровадження**, включно з сенсорами, інфраструктурою даних та інструментами моделювання
Прогнозне обслуговування за допомогою аналітики даних зменшує простої та **продовжує термін служби активів**	**Складність інтеграції** даних, особливо при поєднанні застарілих систем, IoT-пристроїв та BIM-даних
Моделювання майбутніх сценаріїв допомагає у **плануванні та управлінні ризиками**	Ризики **кібербезпеки** через безперервний обмін даними та підключення
Поліпшене прийняття рішень завдяки аналітиці даних у реальному часі та історичних даних	Необхідність **кваліфікованого персоналу** для створення, управління та інтерпретації систем DT
Посилена співпраця між зацікавленими сторонами через спільні віртуальні моделі	**Відсутність стандартизації** форматів даних, протоколів та сумісності між платформами

Оптимізація сталого розвитку шляхом моніторингу енергоспоживання, викидів та впливу на навколишнє середовище	Проблеми **масштабування** для великих або складних інфраструктурних мереж
Швидша реакція під час надзвичайних ситуацій завдяки моделюванню поведінки активів у реальному часі та прогнозуванню	Залежність **точності та надійності від якості** та покриття сенсорів
Підтримка **циркулярності та планування** життєвого циклу через безперервний моніторинг	**Етичні та приватні питання**, пов'язані зі збором та використанням даних у публічних активах

На завершення, цифрові двійники представляють суттєвий прогрес у розвитку управління цифровими активами, виходячи за межі статичних моделей до динамічних систем на основі даних, що підтримують прогнозне обслуговування, обґрунтоване прийняття рішень та реагування в реальному часі. Хоча їхнє впровадження ставить певні виклики, потенціал покращення продуктивності та стійкості інфраструктури є значним. Ефективність цифрових двійників підсилюється за рахунок хмарних платформ і алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяє не лише візуалізацію, а й інтелектуальне прогнозування та підтримку прийняття рішень. Це створює основу для глибшого вивчення ролі пов'язаних робочих процесів та хмарних BIM-платформ у забезпеченні безшовної інтеграції даних, співпраці та оптимізації всієї системи.

РОЗДІЛ 2. РОЗУМНІ СИСТЕМИ, ХМАРНІ РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ТА СПІВПРАЦЯ В BIM

2.1. Хмарні BIM-платформи та пов'язані робочі процеси

Швидке зростання новітніх технологій та збільшення впровадження BIM у будівельних проектах підкреслюють зростаючий попит на автоматизовані, інтегровані та хмарні BIM-рішення, здатні підтримувати співпрацю в реальному часі, масштабованість та інтелектуальні потоки даних протягом всього життєвого циклу проекту [83].

Цифрова трансформація будівельного сектору значно прискорилася завдяки впровадженню хмарних технологій, і одним із найважливіших досягнень у цій сфері стало поява хмарних BIM-платформ (cloud-based BIM platforms). Ці

платформи переосмислили процес співпраці, забезпечуючи спільні цифрові середовища, де всі учасники—архітектори, інженери, підрядники та менеджери об’єктів—можуть отримувати доступ, редагувати та доповнювати дані проекту в режимі реального часу, незалежно від свого фізичного місцезнаходження. Традиційно BIM-середовища працювали ізольовано, і дані про проекти доводилося вручну передавати через файли, що часто призводило до помилок, проблем із контролем версій та затримок у координації. Поява хмарного BIM змінила цю парадигму, впровадивши централізовані, завжди доступні сховища даних на масштабованій високопродуктивній інфраструктурі. Це дозволяє партнерам по проекту працювати одночасно над федеративними моделями, підвищуючи прозорість, ефективність прийняття рішень та швидкість виконання робіт протягом усього життєвого циклу проекту [60, 84].

Системи Cloud-BIM інтегрують різні функції BIM—координацію проектування, перевірку моделей, оцінку обсягів, звітність із майданчика та управління об’єктами—у єдиний цифровий робочий процес. Платформи, такі як Autodesk Construction Cloud [85], Graphisoft BIMcloud, Trimble Connect та BIMServer.org, є прикладами такого інтегрованого підходу. Ці платформи забезпечують не лише зберігання та доступ до документів, а й структуровані робочі процеси для відстеження проблем, виявлення колізій, послідовності будівництва та інтеграції даних про активи [86,87,88]. Основна цінність хмарного BIM полягає у здатності оптимізувати складну, багатопрофільну координацію (Рис. 2.1). Наприклад, Autodesk BIM 360 пропонує модулі, такі як «Docs» для контролю документів, «Design» для координації моделей та «Build» для управління роботою на майданчику—усі в єдиному середовищі. Ці інструменти сприяють пов’язаним робочим процесам, які об’єднують планування, проектування, будівництво та експлуатацію у безперервний, багатий на дані процес [85].

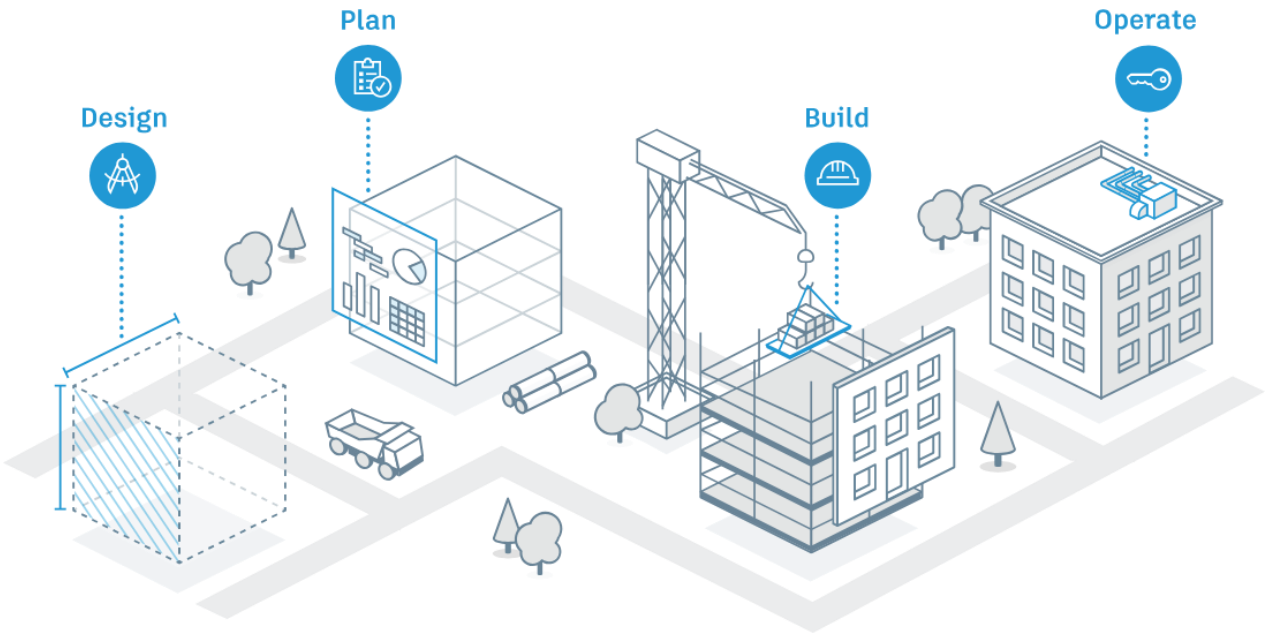


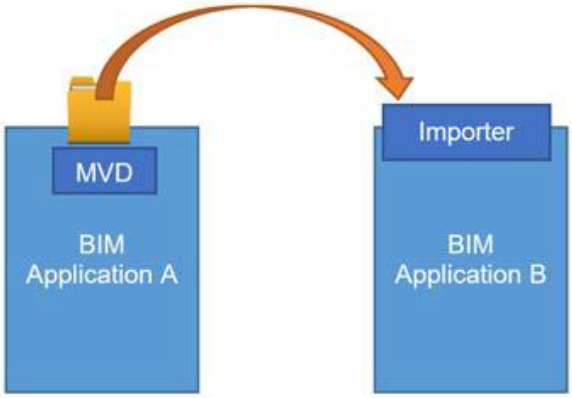
Рис.2.1. Філософія хмарних BIM-платформ та пов'язаних робочих процесів у Autodesk Construction Cloud [85]: Plan; Design; Build; Operate (Планувати; Проектувати; Будувати; Експлуатувати)

Переваги впровадження Cloud-BIM добре документовані. Ці платформи підтримують доступ до моделей у реальному часі, що дозволяє користувачам переглядати, коментувати та оновлювати елементи проекту з миттєвим зворотним зв'язком від колег. Таке середовище в реальному часі зменшує ризик роботи з застарілою інформацією та мінімізує конфлікти між професіоналами різних спеціальностей. Команди проекту отримують покращену простежуваність завдяки централізованим журналам проблем, історії версій та інформаційним панелям активності, що особливо корисно для контролю якості, аудитів на відповідність та звітності під час будівництва та експлуатації [83,87].

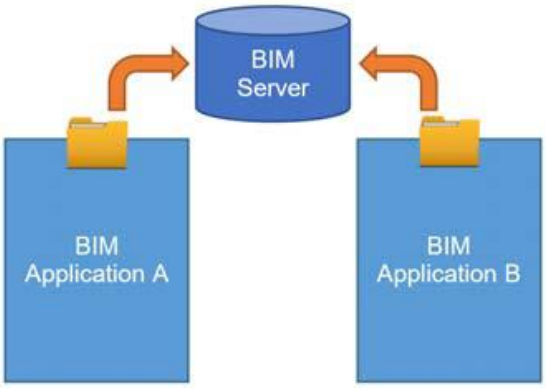
Підходи Cloud-BIM для інтеграції потоків даних

З технічної точки зору, хмарний BIM забезпечує розподілений обмін даними кількома методами. Afsari та ін. [84] класифікують їх на три основні категорії: **ручна передача файлів** (часто через файли IFC), **технології BIM-серверів та центри обміну даними** (рис. 2.2). Ручна передача файлів передбачає експорт та імпорт файлів між системами — зазвичай у відкритих стандартах, таких як IFC, —

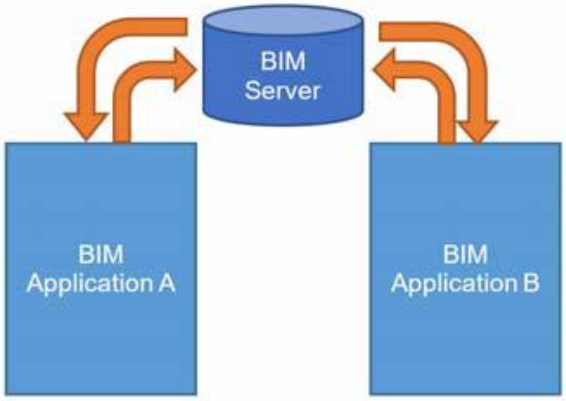
тоді як BIM-сервери працюють як централізовані бази даних, які керують версіями моделей та оновленнями. Прикладами є Autodesk Revit Server та BIMServer.org. Більш сучасний підхід передбачає використання центрів обміну даними, таких як Flux, які автоматизують синхронізацію між інструментами проєктування (наприклад, Revit, Rhino) майже в реальному часі за допомогою плагінів для застосунків.



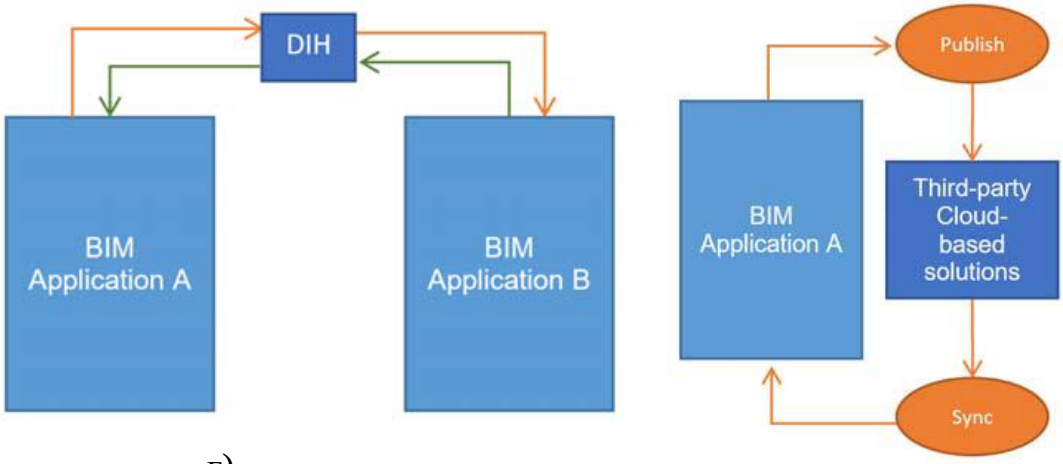
а)



б)



в)



г)

д)

Рис.2.2. Підходи Cloud-BIM для інтеграції потоків даних [84]: а) ручна передача файлів; б) технологія BIM-серверів у передачі даних між застосунками, розробленими різними постачальниками; в) те саме — одним постачальником; г) інтеграційний потік даних для рішення Data Interchange Hub-DIH (наприклад, Flux); д) сторонні хмарні BIM-рішення: BIM Applications, BIM Server, Cloud-based BIM solutions (BIM-додатки, BIM-сервер, хмарні BIM-рішення.)

Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження (табл. 2.1). Ручні робочі процеси на основі файлів можуть дотримуватися відкритих стандартів, таких як IFC та MVD, забезпечуючи нейтральний до постачальника обмін даними, але вони зазвичай є статичними та односпрямованими, вимагають повторних ручних оновлень при кожній ітерації моделі. BIM-сервери покращують централізацію та можливості запиту даних, але стикаються з проблемами масштабованості та сумісності при роботі з великими федеративними моделями. Центри обміну даними забезпечують синхронізацію в реальному часі, але часто обмежені залежністю від платформи та вузькою підтримкою програмного забезпечення [84]. Корисне порівняння підходів інтеграції Cloud-BIM наведене нижче (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Порівняння методологій інтеграції даних Cloud-BIM (адаптовано з [84])

Підхід до інтеграції	**Опис**	**Переваги**	**Обмеження**
Ручна передача файлів	Експорт/імпорт моделей у форматах IFC або власних	Нейтральність до платформи, широке використання	Односпрямовані оновлення, конфлікти версій, високі витрати на координацію
Технології BIM-серверів	Централізовані сховища, що зберігають дані моделі (наприклад, BIMServer, Revit Server)	Співпраця в реальному часі, контроль версій	Обмежена масштабованість, обмеження власних форматів
Центри обміну даними	Синхронізація в реальному часі через плагіни/API (наприклад, Flux, BIM 360 Design Collaboration)	Оновлення в реальному часі, синхронізація за завданнями	Обмежена сумісність інструментів, залежність від постачальника

Крім інструментів інтеграції BIM-даних, розроблених для безперебійного обміну даними між платформами та багатопрофільної співпраці, з'явився також ряд сторонніх хмарних рішень (рис. 2.2, д). Ці спеціалізовані інструменти підключаються до програмного забезпечення для створення BIM-моделей через плагіни, що дозволяє здійснювати експорт та передачу даних моделей у спеціалізовані середовища, де можуть виконуватися розширені чи спеціалізовані функції — наприклад, аналітичні операції.

Хмарний BIM: виклики, переваги та стратегії пом'якшення ризиків

У міру того як галузь AEC швидко переходить до цифровізації, хмарні платформи BIM стають ключовими інструментами для інтегрованої, спільної та орієнтованої на життєвий цикл реалізації проєктів. Ці платформи змінюють підходи до створення, доступу, управління та аналізу даних між різними учасниками та дисциплінами. Їхній розвиток означає перехід від ізольованих інструментів проєктування до взаємопов'язаних цифрових екосистем, що підтримують складну інфраструктуру та розвиток розумних міст [88,90]. Інтеграція BIM із хмарною інфраструктурою запроваджує нову парадигму пов'язаних робочих процесів. Хмарні платформи покращують безперервний ланцюг **проєктування – будівництво – експлуатація**, пропонуючи (див. рис. 2.3):

- **Співпраця в реальному часі, незалежно від місця розташування:** Команди можуть спільно редагувати моделі, призначати завдання та вирішувати проблеми в режимі реального часу, незалежно від географії. Це прискорює прийняття рішень, зменшує затримки та покращує координацію між учасниками [86].
- **Масштабоване зберігання даних на вимогу:** Хмарні платформи усувають потребу в дорогих локальних серверах, пропонуючи еластичне сховище, що підлаштовується під потреби проєкту. Це підтримує довготривале архівування, роботу з великими файлами моделей та контроль версій [87].

- **Автоматична синхронізація та управління проблемами:** Інтегровані інструменти перевірки моделей, виявлення колізій та відстеження проблем зменшують ручні помилки та оптимізують контроль якості на всіх етапах.
- **Інтеграція з мобільними пристроями та IoT на будмайданчику:** За допомогою мобільних пристроїв і підключених сенсорів польові команди можуть отримувати актуальні моделі та дані в реальному часі. Це підтримує відстеження прогресу, контроль безпеки та планування обслуговування [88].

Ці можливості створюють більш скоординоване, прозоре та ефективне проєктне середовище, що зрештою зменшує затримки та витрати протягом життєвого циклу.

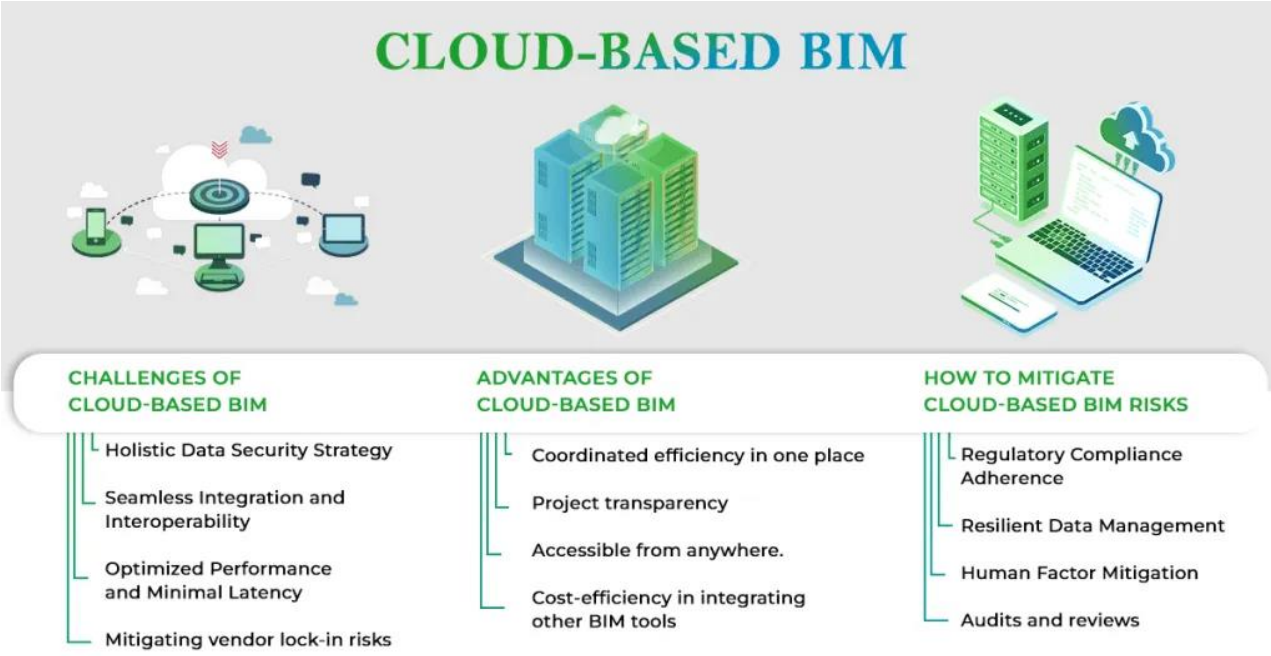


Figure 2.3. Хмарний BIM: виклики, переваги та стратегії пом'якшення ризиківCloud-based BIM: challenges (Holistic data security strategy, seamless integration and interoperability, optimised performance and minimal latency, mitigating vendor lock-in risks), advantages (coordinated efficiency in one place, project transparency, accessible from anywhere, cost-efficiency in integrating other BIM tools) and mitigation strategies (regulatory compliance adherence, resilient data management, human factor mitigation, audits and reviews) проблеми (цілісна стратегія безпеки даних, безперебійна інтеграція та сумісність, оптимізована

продуктивність та мінімальна затримка, зменшення ризиків прив'язки до постачальника), переваги (скоординована ефективність в одному місці, прозорість проекту, доступність з будь-якого місця, економічна ефективність інтеграції інших інструментів BIM) та стратегії пом'якшення (дотримання нормативних вимог, стійке управління даними, зменшення людського фактору, аудити та перевірки)[88].

Попри значний прогрес, залишаються певні проблеми. Найгострішою є **інтероперабельність.** Хоча відкриті стандарти, такі як IFC, забезпечують обмін даними між платформами, багато хмарних BIM-додатків все ще побудовані на пропрієтарних схемах, що ускладнює інтеграцію. Крім того, актуальними є питання **управління даними** — зокрема, право власності на модель, контроль доступу та конфіденційність інформації, особливо у випадках, коли над моделлю одночасно працюють різні організації [60,84]. Важливою проблемою є й **кібербезпека**: платформи повинні забезпечувати безпечну автентифікацію, контроль доступу та шифрування даних, особливо для критично важливих об’єктів. Частина систем уже впроваджує ролі доступу та аудиторські журнали, але стандарти та правові норми ще не встигають за технологіями. Також існує **дефіцит навичок**: малі компанії та державні установи часто не мають ресурсів чи компетенцій для ефективного впровадження хмарних робочих процесів. Найбільш визнані обмеження та виклики можна підсумувати наступним чином:

- **Інтероперабельність:** Хоча стандарти, такі як Industry Foundation Classes (IFC), підтримують обмін даними, багато хмарних BIM-застосунків досі покладаються на закриті схеми, що ускладнює інтеграцію між платформами та дисциплінами [60].
- **Управління даними:** Невизначеність щодо права власності на модель, контролю доступу, відповідальності за дані та історії змін створює значні ризики. Без чітко визначених правових і процедурних рамок важко встановити довіру між учасниками проєкту [84].

- **Кібербезпека:** Хмарні системи повинні забезпечувати конфіденційність та цілісність даних за допомогою надійного шифрування, багатофакторної автентифікації та захищених API. Конфіденційні дані проєктів (наприклад, державна інфраструктура) потребують високого рівня захисту, який не завжди однаково забезпечується всіма постачальниками [86].
- **Дефіцит навичок та бар'єри впровадження:** Невеликі компанії та державні організації часто не мають достатньої експертизи або фінансових ресурсів для ефективного розгортання та підтримки хмарних робочих процесів. Потрібні стандартизовані програми навчання та ініціативи з підвищення цифрової грамотності.

Для подолання постійних викликів у впровадженні хмарних BIM-платформ необхідно систематично застосовувати низку стратегій зниження ризиків [87]. Передусім критично важливим є забезпечення відповідності нормативним вимогам. Це включає дотримання міжнародних стандартів і місцевих регуляцій щодо захисту даних, цифрових транзакцій та кібербезпеки. Оскільки правові рамки часто ще перебувають у стадії розвитку, учасники проєкту повинні постійно оновлювати політики, щоб зберігати відповідність протягом усього життєвого циклу об'єкта. Ще одним ключовим напрямом є впровадження надійних стратегій управління даними. Це передбачає використання стійких хмарних систем з надлишковістю, регулярними резервними копіями та механізмами аварійного відновлення для захисту цілісності даних від потенційних втрат або кібератак. Для підвищення стійкості та доступності також можуть застосовуватися децентралізовані або розподілені інфраструктури зберігання. Важливу роль у захисті хмарних систем відіграє мінімізація людського фактора. Багато помилок у BIM-процесах виникають через неправильний доступ, низький рівень цифрової грамотності або неналежне поводження з конфіденційною інформацією. Щоб зменшити ці ризики, організації повинні інвестувати у структуровані програми цифрового навчання та запроваджувати рольовий контроль доступу, обмежуючи редагування моделей лише для уповноважених осіб. Нарешті, критично важливими є постійний аудит і протоколи перевірки. Регулярна перевірка дій користувачів,

змін у моделях та журналів доступу до системи дозволяє виявляти аномалії на ранніх етапах, підвищувати відповідальність і забезпечувати прозорість у процесі управління моделлю. Такі перевірки також підтримують контроль якості, особливо у багатосторонньому середовищі, де одночасно з моделлю працюють численні користувачі [87].

Інтеграція цих стратегій зниження ризиків у план цифрової інфраструктури проєкту дозволяє хмарним BIM-платформам забезпечувати не лише підвищену співпрацю та ефективність, але й безпечні, відповідні нормативам і готові до майбутнього робочі процеси. Підсумовуючи, у таблиці 2.2 порівнюються традиційні системи BIM із сучасними хмарними робочими процесами.

Таблиця 2.2. Порівняльний огляд традиційних і хмарних BIM-систем

Характеристика	Традиційний BIM	Хмарний BIM
Доступ	Десктоп, одне місце	Веб/мобільний доступ, одночасна багатокористувацька співпраця
Зберігання	Локальні сервери, дублювання файлів	Масштабовані, централізовані хмарні репозиторії
Співпраця	Послідовна, документ-орієнтована	Паралельне, реальне співавторство та коментування
Інтеграція	Обмежена інструментами етапу проєктування	Інтеграція з GIS, IoT, AI та системами управління об’єктами
Оновлення моделей	Ручне завантаження файлів і контроль версій	Автоматична синхронізація, відстеження версій та історії змін
Безпека	Локальні протоколи безпеки	Хмарне шифрування, рольовий доступ, аудиторські журнали
Сфери використання	Проєктна документація	Цифрові двійники, предиктивне обслуговування, розумні міста

Таким чином, хмарний BIM — це не лише технологічний зсув, а й фундаментальне переосмислення способу створення, поширення та використання будівельної інформації. Забезпечуючи інтегровані, насичені даними робочі процеси, що охоплюють увесь життєвий цикл будівлі, він відкриває шлях до більш ефективної, колективної та стійкої реалізації інфраструктурних проєктів. Однак для повної реалізації цього потенціалу необхідно вирішити питання інтероперабельності, управління та довгострокової сталості даних шляхом постійної стандартизації та досліджень.

2.2. BIM-інформаційні моделі та середовища: пояснення PIM, AIM, CDE та BEP

У цифровому середовищі будівництва інформація має системно створюватися, управлятися, обмінюватися та зберігатися протягом усього життєвого циклу проєкту. BIM забезпечує для цього рамки через структуровані інформаційні моделі та середовища співпраці. Чотири ключові компоненти, що лежать в основі цього процесу: Project Information Model (PIM) — модель проєктної інформації, Asset Information Model (AIM) — модель інформації про актив, Common Data Environment (CDE) — спільне середовище даних, BIM Execution Plan (BEP) — план виконання BIM. Розуміння відмінностей та взаємозв'язків між ними є критично важливим для ефективного управління інформацією у проєктах AEC. Ця структура регулюється на міжнародному рівні стандартом ISO 19650, який базується на раніше розроблених британських стандартах PAS 1192. PAS 1192 запровадив рекомендації для задоволення нагальних потреб будівельної галузі, тоді як ISO 19650 розширив це до глобально визнаної системи, що формалізує спільне управління інформацією протягом усього життєвого циклу активу. Стандарт ISO 19650 складається з кількох частин ([91]; Рис. 2.4):

- ISO 19650-1 описує основні концепції та принципи управління інформацією, включно з визначеннями AIM, PIM та CDE, а також етапами зрілості впровадження BIM.
- ISO 19650-2 зосереджується на фазі реалізації проєктів, детально описує впровадження BEP, MIDP (Master Information Delivery Plans — головних планів надання інформації) та TIDP (Task Information Delivery Plans — планів надання інформації за завданнями) для управління потоками проєктної та будівельної інформації.
- ISO 19650-3 охоплює експлуатаційну фазу, коли AIM стає центральним джерелом для управління даними активу після здачі в експлуатацію, з інтеграцією до управління об'єктами та поточного обслуговування.

- ISO 19650-4 визначає процеси обміну інформацією, зокрема Exchange Information Requirements (EIR — вимоги до обміну інформацією), і узгоджує їх з фазами реалізації та експлуатації.
- ISO 19650-5 додає рівень протоколів безпеки, забезпечуючи належну обробку інформації, особливо у проєктах чутливої інфраструктури.

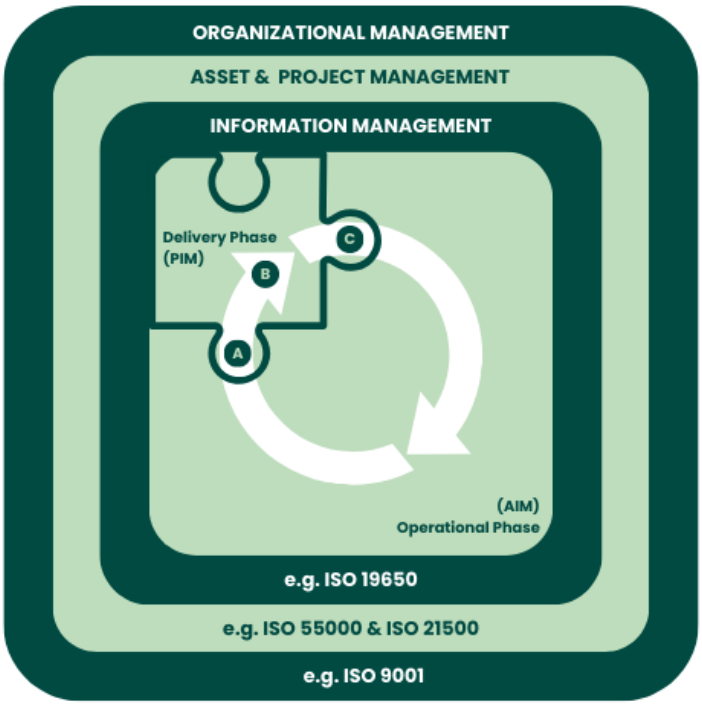
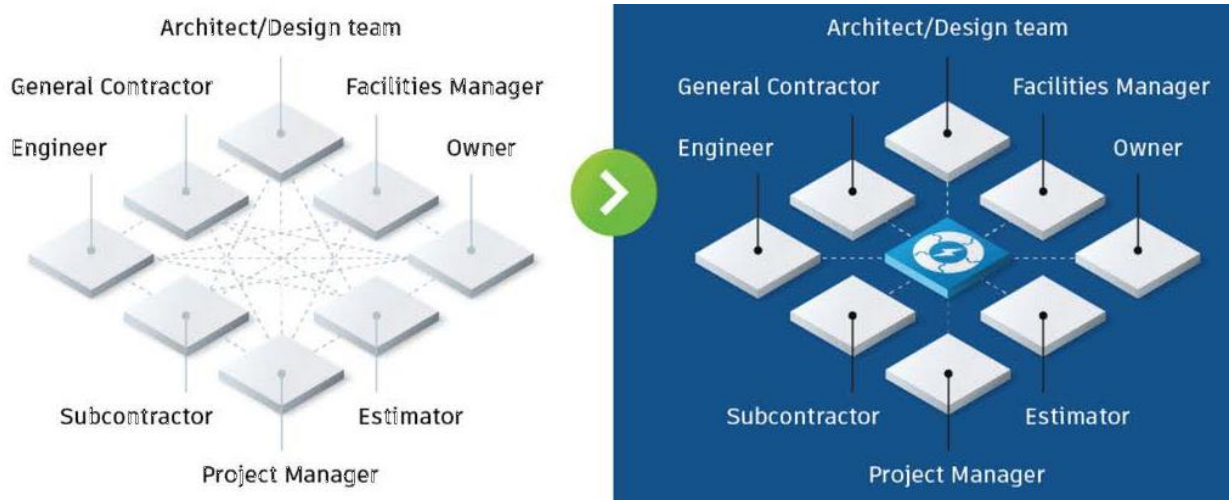


Figure 2.4. ISO 19650 у життєвому циклі активу BIM: Organisational management, asset & project management, information management (організаційне управління, управління активами та проектами, управління інформацією); A — початок фази реалізації (delivery phase) — передача відповідної інформації з AIM до PIM; B — поступова розробка моделі наміру проєкту до віртуальної моделі будівництва; C — завершення фази реалізації — передача відповідної інформації з PIM до AIM [91].

Роль спільного середовища даних (CDE) та плану виконання BIM (BEP) у цифрових будівельних робочих процесах

Спільне середовище даних (CDE) — це централізована цифрова платформа, спеціально створена для зберігання, управління та обміну всією інформацією, пов’язаною з проєктом у будівельних робочих процесах [92,93]. Виконуючи роль

єдиного джерела даних, воно об'єднує як графічну (наприклад, BIM-моделі, креслення), так і не графічну (наприклад, звіти, контракти) інформацію, забезпечуючи всім учасникам проєкту узгоджений і актуальний доступ до даних протягом усього життєвого циклу активу [94]. CDE підвищує ефективність співпраці, інтегруючи дані, команди та робочі процеси в єдину цифрову екосистему. Завдяки зменшенню дублювання інформації, підтримці контролю версій та стандартизації комунікації, CDE покращує якість проєкту, знижує ризики та прискорює ухвалення рішень. Ця централізована система охоплює всі етапи — від початкового проєктування до будівництва та експлуатації об'єкта, пропонуючи оновлення в реальному часі та контроль доступу на основі ролей для безпечного та відстежуваного обміну даними ([93]; рис. 2.5).



а) *б)*

Рис.2.5. Традиційний (а) потік інформації порівняно зі спільним середовищем даних (б) [93].

Зазвичай CDE складається з двох взаємопов'язаних компонентів. Перший — це середовище управління інформацією, відповідальне за організацію, зберігання та контроль версій документів і даних. Це може включати файлові сховища, електронні системи управління документами (EDMS) або платформи інтеграції даних. Другий компонент — це середовище управління проєктом, яке підтримує планування, управління завданнями, звітність через дашборди та полегшує загальне управління BIM-процесом. Рішення, що інтегрують ці два компоненти,

забезпечують більшу безперервність робочих процесів і зменшують складність керування кількома системами [94].

Типові групи даних у CDE (Catenda (2025). CDE – Common Data Environment):

- **Проєктування та документація:** 2D/3D моделі, результати перевірки на колізії, технічні специфікації та контракти.
- **Матеріали для забезпечення прозорості проєкту:** фотографії з будівельного майданчика, накази про зміни, записи комунікацій. Ці дані дають змогу здійснювати дистанційний моніторинг, гарантують прозорість і чітку комунікацію, а також створюють історичний архів проєкту.
- **Інформація про експлуатацію та об'єкт:** метадані компонентів, журнали технічного обслуговування та дані «as-built» для використання після завершення будівництва. Ця група даних орієнтована на управління об'єктом, сприяє подальшій експлуатації та обслуговуванню, обміну знаннями та безперервному вдосконаленню в майбутніх проєктах.

Впровадження CDE (Common Data Environment — Єдиного середовища даних), таким чином, забезпечує кілька ключових переваг [93,94]:

- Покращена співпраця: дає змогу мультидисциплінарним командам отримувати доступ, переглядати та оновлювати дані в режимі реального часу — усуваючи «інформаційні силоси».
- Цілісність і прозорість даних: контроль доступу на основі ролей та журнали аудиту сприяють довірі, підзвітності та безпеці даних.
- Підвищення ефективності та якості: обмін даними в режимі реального часу, інтеграція BIM та автоматизація зменшують кількість переробок і підтримують своєчасне прийняття рішень.
- Зниження ризиків: централізований контроль за документообігом зменшує невідповідності та підвищує відповідність нормативним вимогам.

- Масштабованість і повторне використання: історичні дані проєкту, збережені у CDE, можуть повторно використовуватися для покращення планування, бенчмаркінгу та аналітики ефективності майбутніх проєктів.

Під час вибору рішення CDE ключові технічні критерії включають: зручність використання, масштабованість для проєктів різного розміру та складності, безшовну інтеграцію з наявними програмними інструментами, надійні засоби безпеки та якісну підтримку від постачальника. Із зростанням цифрової трансформації будівельної галузі впровадження стандартизованого та ефективного CDE стає необхідним для підвищення результативності реалізації проєктів та забезпечення інтероперабельності між різними командами та технологіями.

Важливо, що ефективне використання CDE вимагає дотримання визначених стандартів і процесів, які формалізуються у Плані виконання **(BIM Execution Plan, BEP**). BEP визначає обрану платформу CDE, ролі користувачів, права доступу, схеми класифікації інформації, правила найменування, протоколи валідації та обміну даними. Ці правила узгоджуються з міжнародними стандартами, такими як ISO 19650, який визначає вимоги до управління інформацією протягом життєвого циклу створених об’єктів, забезпечуючи послідовні та контрольовані практики управління даними.

План виконання BIM (**BIM Execution Plan, BEP or BXP)** — це базовий документ проєкту, який визначає, як буде впроваджено Building Information Modeling (BIM) протягом будівельного проєкту (див. рис. 2.6). Він є комплексною «дорожньою картою», що перетворює BIM-цілі замовника на практичні процеси, ролі, обов’язки та робочі процеси, адаптовані до конкретного контексту — чи то нове будівництво, реконструкція, поділ ділянки чи інші типи розвитку [95]. Основна мета BEP — забезпечити успішне впровадження BIM шляхом створення спільної рамки, яка узгоджує всіх учасників проєкту — від архітекторів і інженерів до підрядників та експлуатаційних служб — щодо очікувань і методологій використання BIM. Він визначає, як інформація створюватиметься, передаватиметься, управлятиметься та перевірятиметься на кожному етапі життєвого циклу проєкту — від початкового програмування та проєктування до

будівництва, експлуатації та обслуговування. Отже, ключові елементи BEP включають [95]:

I. **Контекст проєкту та цілі BIM** — BEP починається з визначення обсягу, тривалості та цілей BIM для проєкту. Це включає ідентифікацію всіх зацікавлених сторін, з особливим акцентом на тих, хто відповідає за координацію та управління BIM, наприклад BIM-менеджерів і координаторів.

II. **Ролі та обов'язки** — визначає обов'язки кожного учасника процесу BIM, уточнюючи, хто створює, управляє та перевіряє BIM-документацію на кожному етапі. Також визначає рівень повноважень і відповідальності в управлінні BIM-процесами.

III. **Методологія роботи з BIM та обмін інформацією** — окреслює процеси та протоколи для створення моделей, співпраці та обміну даними. Відповідає на ключові питання: які дані потрібні? кому вони потрібні? коли їх слід надати? як мають бути структуровані та перевірені дані? Також визначає процедури координації для ефективної інтеграції багатопрофільних моделей.

IV. **CDE та платформа співпраці** — визначає цифрове середовище та інструменти, які використовуватимуться як CDE для зберігання, обміну та управління інформацією проєкту. Охоплює технічні аспекти: можливості платформи, заходи безпеки даних, контроль доступу, питання страхування та відповідальності, термін служби системи.

V. **Програмні інструменти та формати обміну** — перелік усіх програмних застосунків, що використовуються командою, та визначення форматів обміну для інтероперабельності — зазвичай у нативних форматах або відкритих стандартах, таких як IFC (Industry Foundation Classes).

VI. **Рівень опрацювання (LOD) та рівень інформації (LOI)** — встановлює очікувану деталізацію моделі та насиченість інформації на кожній фазі проєкту, задаючи орієнтири для якості та повноти BIM-результатів (див. розд. 1.2).

VII. **BIM-результати та документація** — перелік конкретних BIM-результатів, таких як узгоджені моделі, креслення, графіки, звіти, з чітким визначенням термінів подання та циклів перевірки.

VIII. **Віхи та графік проєкту** — таймлайн BIM-завдань і ключових віх, узгоджений із загальним календарем управління проєктом.

IX. **Правила найменування файлів та управління даними** — встановлює конвенції щодо імен файлів, контролю версій, стандартів анотацій і механізмів передачі даних для підтримання послідовності та уникнення двозначностей (див. розд. 1.3).

X. **Забезпечення якості та процедури BIM-координації** — процеси перевірки моделей, виявлення колізій, вирішення проблем і проведення ітераційних переглядів для збереження цілісності BIM та мінімізації помилок.

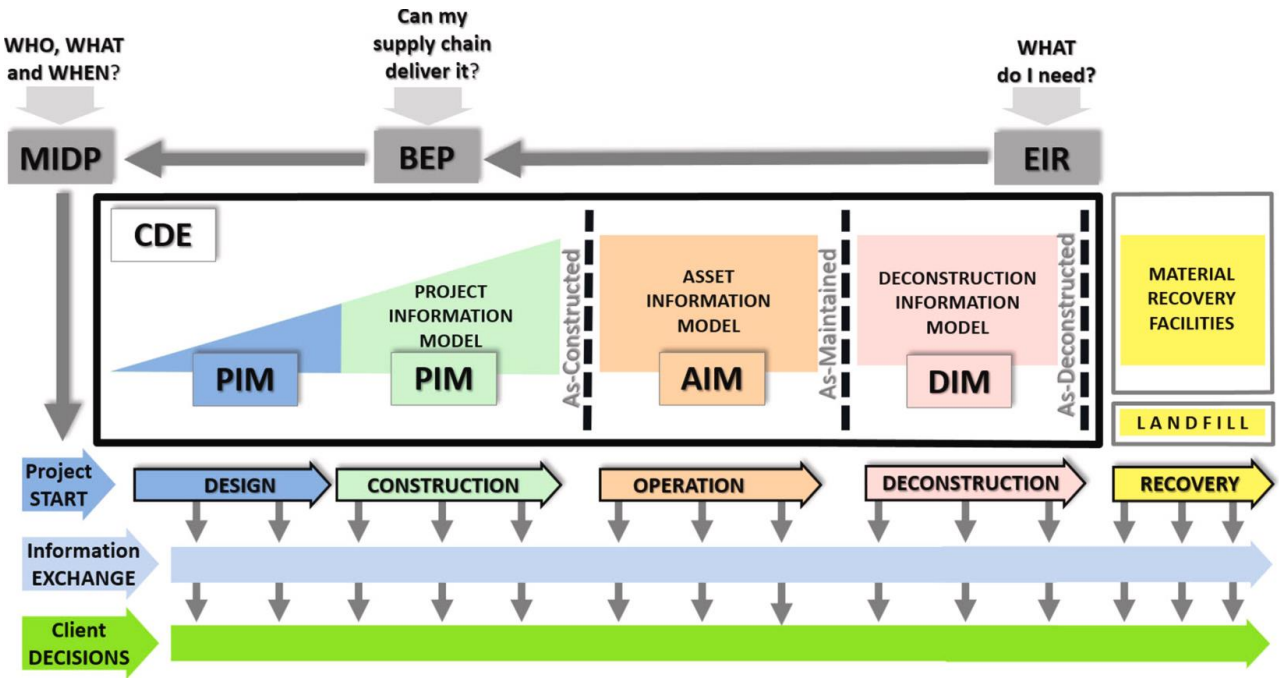


Рис.2.6. Схема циклу надання інформації в життєвому циклі об'єкта [92,96]

У практичному застосуванні BEP виконує подібну функцію до RFI (Request for Information — запит на інформацію) чи RFP (Request for Proposal — запит на пропозицію), що часто використовуються в IT та закупівлях. Він розробляється як пряма відповідь на Вимоги замовника до інформації (EIR — Employer's Information Requirements), які визначають очікування та цілі замовника щодо процесу BIM [97]. EIR задає рамки, а BEP відповідає, деталізуючи, як ці очікування буде реалізовано в термінах процесів, ролей, результатів та термінів (див. рис. 2.6). На початку проєкту замовник зазвичай надає шаблон або структуру з описом очікуваних

результатів інтеграції BIM. На цій основі проєктна команда або підрядник формує адаптований BEP, що визначає стратегію реалізації — від розподілу відповідальності за моделювання та методів співпраці до процедур роботи з даними та контролю якості. Цей документ стає операційним посібником цифрової реалізації проєкту, забезпечуючи узгодженість між усіма учасниками..

BEP зазвичай розвивається у дві основні фази [97].

I. **Передконтрактна фаза (Pre-Contract phase)**: потенційні постачальники готують початковий BEP у відповідь на EIR, окреслюючи свої запропоновані методи та можливості. Ця версія має більш стратегічний характер і демонструє розуміння потреб замовника та цифрових вимог проєкту.

II. **Післяконтрактна фаза (the Post-Contract BEP)**: після укладення контракту розробляється більш детальний BEP. Він інтегрується з Головним планом надання інформації (MIDP — Master Information Delivery Plan), який визначає, хто відповідальний за створення якої інформації, коли вона буде надана та в якому форматі. Це доповнюється Планами надання інформації за завданнями (TIDP — Task Information Delivery Plans) від окремих команд, які деталізують кожен результат.

Хоча BEP не є юридично обов’язковим для всіх проєктів, у разі впровадження він стає обов’язковою рамкою для управління BIM. Він забезпечує високий рівень прозорості в процесі, який традиційно є фрагментованим. Передусім він підтримує дотримання термінів і бюджету, надаючи спільну рамку для координації. Кожен учасник — від архітектора до підрядника — розуміє свій обсяг робіт, очікуваний внесок і графік. Ця чіткість особливо цінна у випадку зміни обсягу робіт або непередбачених обставин, адже BEP забезпечує сталу точку відліку для управління такими ситуаціями без зриву проєкту. По суті, BEP перетворює BIM із технології моделювання на повноцінну систему управління проєктом. Якщо він ретельно підготовлений і впроваджений, то стає основою для ефективних, прозорих і високоякісних результатів будівництва.

Поєднання проєктування, будівництва та експлуатації через інформаційні моделі

Традиційний цикл надання інформації у PAS 1192-2:2013 став основою для впровадження BIM Рівня 2, визначаючи інформаційні потреби для капітального будівництва. Однак йому бракувало комплексного бачення всього життєвого циклу об'єкта, зокрема стадії завершення життєвого циклу (End-of-Life, EOL). Цей недолік було усунуто у підході, запропонованому (Рис.2.7), який охоплює три взаємопов'язані фази: Проєктування та будівництво (Design & Build); Експлуатація та обслуговування (Operation & Maintenance); Кінець життєвого циклу (End-of-Life). У центрі цього підходу — поступовий розвиток і трансформація трьох моделей: Проєктної інформаційної моделі (Project Information Model, PIM), Інформаційної моделі активу (Asset Information Model, AIM), і Інформаційної моделі демонтажу (Deconstruction Information Model, DIM)—кожна з яких формується відповідно до еволюційних інформаційних вимог (EIR — Employer's Information Requirements, AIR — Asset Information Requirements, OIR — Organizational Information Requirements, PIR — Project Information Requirements, DIR — Deconstruction Information Requirements).

I. **PIM (Project Information Model) – Логіка проєктування та будівництва**. Проєктна інформаційна модель (PIM) створюється на етапах проєктування та будівництва у відповідь на Вимоги замовника до інформації (EIR) — базовий документ, що визначає потреби замовника у даних, стандарти, формати та очікування щодо надання інформації на всіх стадіях проєкту. EIR забезпечує узгодженість зі стратегічними, технічними й управлінськими цілями шляхом встановлення робочих процесів, процедур співпраці та рівнів деталізації. Створений на передтендерній фазі, EIR відрізняється від Плану виконання BIM (BEP), який описує, як саме команди проєкту планують виконувати ці вимоги [98]. Exchange Information Requirements). Таким чином, PIM включає як графічну, так і неграфічну інформацію, формуючи основу для цифрового "As-Built" запису, що відображає всі фактичні дані після будівництва. Попри великий потенціал, фахівці

відзначають труднощі у підтриманні точності та повноти PIM — критично важливих для надійної передачі даних.

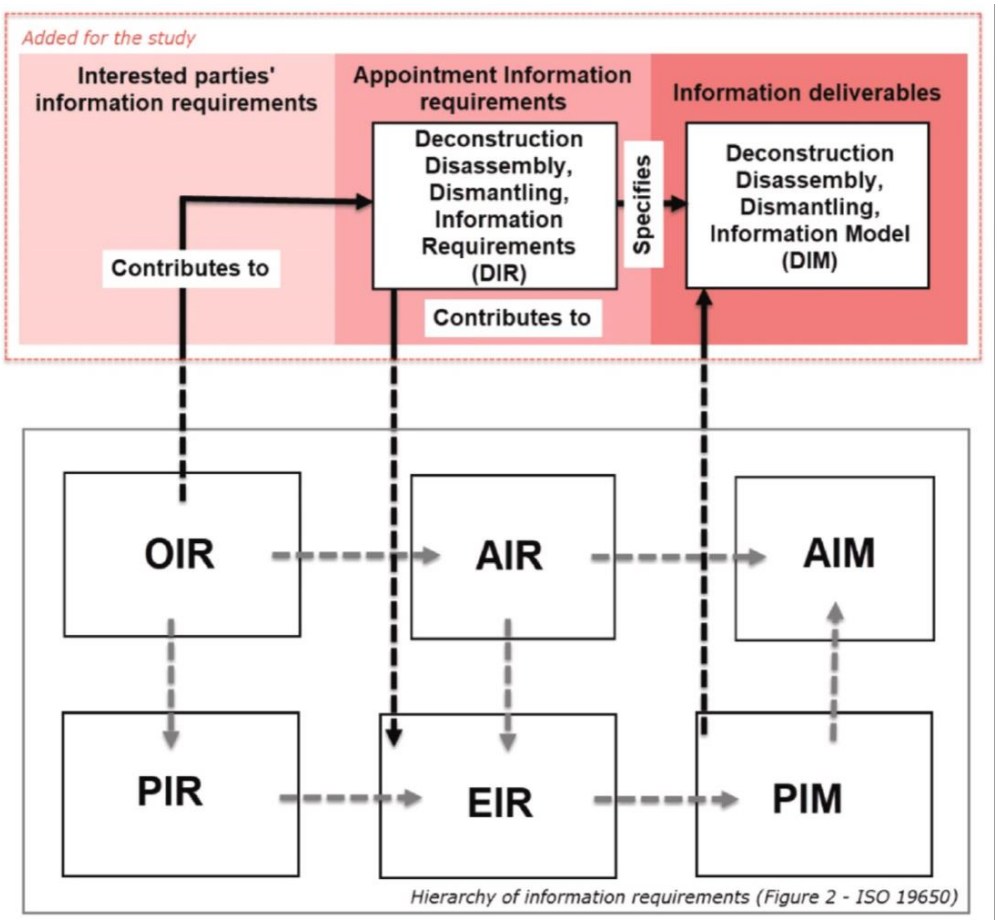


Рис.2.7. Взаємозв'язки між елементами управління інформацією протягом життєвого циклу активу (адаптовано з ISO 19650 за [96]).

II. **AIM (Asset Information Model) – Операційні дані та управління об'єктом.** Після завершення будівництва PIM трансформується в Інформаційну модель активу (AIM) — геометрично спрощену, але семантично збагачену модель, що використовується під час експлуатації об'єкта. AIM підтримує управління об'єктом, планування технічного обслуговування та оптимізацію експлуатаційних процесів, інтегруючи документи, такі як керівництва з експлуатації та обслуговування (O&M manuals), записи введення в експлуатацію та показники ефективності активу. Вона також включає дані циркулярної економіки (circular economy, CE) — індикатори повторного використання, показники придатності до переробки та походження матеріалів, перетворюючи AIM на динамічний цифровий

паспорт будівлі. AIM постійно оновлюється протягом експлуатаційної фази, особливо завдяки моделі “As-Maintained”, яка забезпечує точність даних перед прийняттям рішень щодо завершення життєвого циклу. Її надійність підтримується завдяки структурованим «data drops» і керується через CDE та протоколи надання інформації, визначені у BEP і MIDP..

III. **DIM (Deconstruction Information Model) – Планування завершення життєвого циклу та підтримка циркулярності**. На завершальному етапі життєвого циклу для повного замикання циклу впроваджується Інформаційна модель демонтажу (Deconstruction Information Model, DIM) — концепція, що базується на Вимогах до інформації про демонтаж (Deconstruction Information Requirements, DIR), які формалізуються на ранній стадії проєкту поряд з EIR.DIM інтегрує дані PIM та AIM для підтримки селективного демонтажу, повторного використання матеріалів і компонентів — ключових стратегій циркулярного середовища, що будується. Як зазначає [92,96], раннє включення DIR забезпечує, щоб цілі циркулярності (наприклад, мінімальні показники повторного використання або переробки) були інтегровані ще з моменту початку проєкту. DIM гарантує простежуваність через контрольні точки життєвого циклу та відповідність початковим DIR, зміцнюючи концепцію проєктування для демонтажу. Інструменти та стандарти, узгоджені з ISO 19650 і PAS 1192, забезпечують узгодженість даних і сумісність, особливо на критичних етапах обміну інформацією. DIM наповнюється через серію структурованих «data drops» та перевірочних точок, що забезпечує простежуваність і відповідність вимогам замовника. Цей підхід узгоджується з CDE та ключовими контрактними документами (EIR, BEP, MIDP), сприяючи послідовності й співпраці між усіма учасниками — від проєктування до демонтажу.

Підсумовуючи: синергія PIM, AIM, CDE та BEP, структурована й керована відповідно до ISO 19650, формує основу цифрово інтегрованого процесу будівництва, що забезпечує стандартизоване, безпечне та ефективне управління інформацією на всіх фазах розвитку й експлуатації об’єкта.

2.3. Визначення ролей у BIM-командах: забезпечення співпраці та відповідальності

Ефективна співпраця в проєктах, що реалізуються із застосуванням BIM, потребує чітко визначеної організаційної структури. Складність цифрових робочих процесів, багатовимірних даних і проблем інтероперабельності робить необхідним, щоб роль кожного члена команди була однозначно визначена й добре зрозуміла. Це допомагає уникнути плутанини, підвищує відповідальність за дані та сприяє продуктивній співпраці на всіх етапах проєкту — від проєктування до експлуатації [99]. Три основні ролі у BIM-середовищі — BIM Manager (BIM-менеджер), BIM Coordinator (BIM-координатор) та BIM Author (BIM-автор) (або BIM Specialist, Modeler-BIM-спеціаліст) — становлять основу спільної цифрової реалізації проєктів (Рис.2.8)

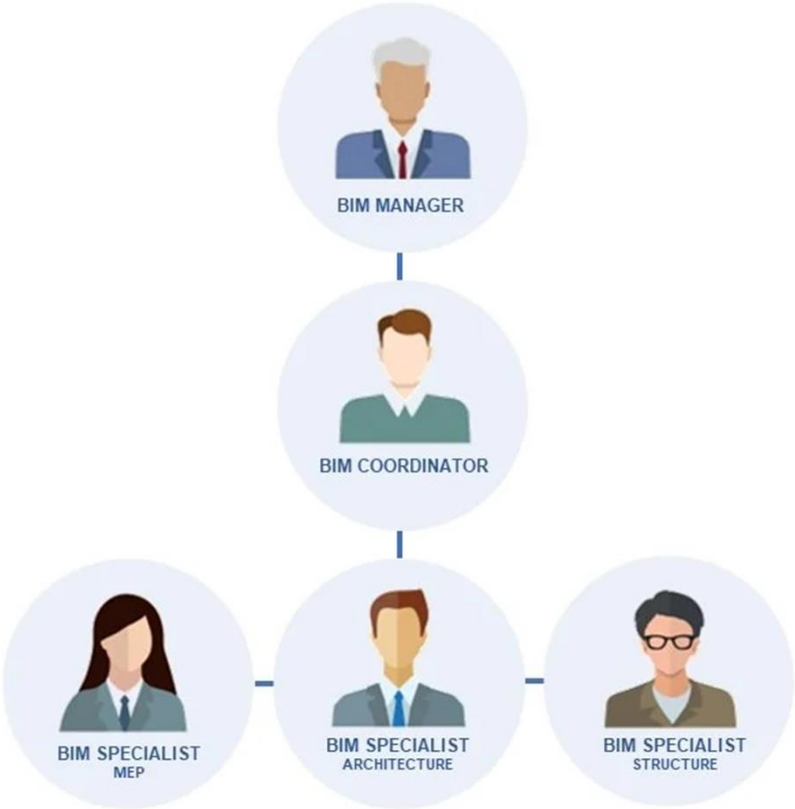


Рис.2.8. BIM-ролі: детальна інформація про кар'єру [100]: BIM Manager (BIM-менеджер), BIM Coordinator (BIM-координатор) та BIM Author (BIM-автор) (або BIM Specialist, Modeler-BIM-спеціаліст)

BIM Manager (BIM-менеджер)

BIM Manager відповідає за стратегічне керівництво, інтеграцію та розвиток BIM у межах всієї організації. Вони визначають бачення впровадження BIM, керують його реалізацією та забезпечують узгодженість із цілями організації й галузевими стандартами [99]. Як головний рушій BIM-інновацій, BIM Manager розробляє та підтримує Плани виконання BIM (BEP), встановлює рамки управління та здійснює наставництво для міждисциплінарної команди BIM-фахівців. Вони забезпечують, щоб практики BIM приносили бізнес-цінність, підвищували ефективність проєктів і гарантували найвищу якість усіх результатів. BIM Manager відіграє ключову роль у керуванні змінами, цифровій трансформації та узгодженні технологій цифрового будівництва з організаційними процесами (Рис. 2.9).

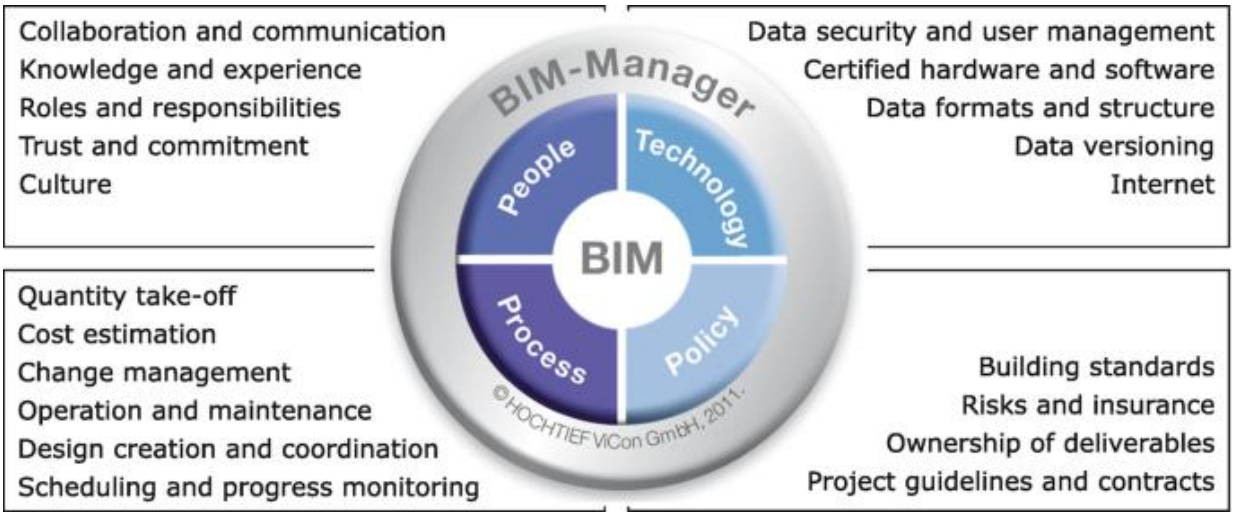


Рис.2.9. BIM Manager: роль у життєвому циклі [101]: people, technology, process, policy (люди, технології, процеси, політика)

Основні обов’язки BIM Manager [102]:

- Визначення та впровадження загальноорганізаційної BIM-стратегії та рамки виконання.
- Розробка та підтримка BIM-стандартів, протоколів і робочих процесів відповідно до ISO 19650 або еквівалентів.
- Нагляд за створенням, впровадженням і оновленням BEP.

- Керівництво та наставництво BIM-командам, підтримка їхнього технічного розвитку та формування культури співпраці й інновацій.
- Координація інтеграції міждисциплінарних моделей і контроль їхньої якості.
- Проведення регулярних BIM-аудитів, перевірок моделей і забезпечення відповідності стандартам даних та вимогам конкретних проєктів.
- Управління програмними платформами, інструментами, ліцензіями та цифровими ресурсами для оптимального використання у підрозділах.
- Лідерство в навчальних ініціативах і сесіях обміну знаннями з BIM.
- Взаємодія з вищим керівництвом, звітування щодо прогресу впровадження BIM, показників ефективності та стратегічних удосконалень.
- Моніторинг нових тенденцій і технологій у BIM та їх впровадження для збереження конкурентних переваг.
- Виконання ролі посередника між клієнтами, підрядниками й консультантами у BIM-аспектах проєктів.

BIM Manager повинен мати ґрунтовні знання BIM-платформ (наприклад, програм для координації, середовищ федеративних моделей, IFC-в'юерів) і водночас володіти лідерськими навичками для узгодження команд, інструментів і процесів із цілями проєкту. Хоча ця роль не завжди є традиційною управлінською посадою, BIM Manager має значні повноваження у прийнятті рішень.

BIM-координатор (BIM Coordinator)

BIM Coordinator відіграє ключову роль у забезпеченні того, щоб впровадження BIM на рівні проєкту було послідовним, колаборативним і узгодженим із загальним стратегічним напрямом, визначеним BIM Manager. Завдяки міждисциплінарній експертизі BIM Coordinator поєднує макрорівневу стратегію BIM Manager із технічною реалізацією, яку виконують BIM-спеціалісти. Він виступає основним посередником у потоках інформації, координації моделей і технічній валідації протягом усього життєвого циклу проєкту. BIM Coordinator працює між проєктними дисциплінами — архітектурною, конструктивною та MEP — контролюючи інтеграцію, валідацію та усунення колізій у федеративних

моделях. Вони забезпечують, щоб цифрові процеси проєктування відповідали узгодженим стандартам, результатам і графікам, оптимізуючи продуктивність і запобігаючи помилкам ще до початку будівництва [102, 103]:

- Впровадження та контроль дотримання BIM-стандартів і робочих процесів у межах проєкту.
- Підтримка та оновлення BEP (BIM Execution Plan) і контроль відповідності команди його вимогам.
- Координація інтеграції моделей з архітектури, конструкцій, MEP та інших дисциплін.
- Сприяння міждисциплінарній співпраці та проведення координаційних зустрічей.
- Виконання clash detection за допомогою інструментів BIM-координації та організація процесів їх вирішення.
- Забезпечення своєчасної видачі BIM-результатів відповідно до етапів проєкту та вимог замовника.
- Керування валідацією моделей, контролем якості та відстеженням версій.
- Підтримка зацікавлених сторін у розумінні та застосуванні BIM-доставок.
- Моніторинг BIM-інновацій і впровадження інструментів чи методів для покращення реалізації проєкту.
- Документування отриманих уроків і внесення їх у корпоративну базу знань.

У межах BIM-координації існують дві різні, але взаємодоповнювальні ролі [104] BIM Total Coordinator — відповідає за інтеграцію всіх дисциплінарних моделей у єдину федеративну модель. Ця роль гарантує міжгалузеву сумісність як у геометричному аспекті (наприклад, виявлення колізій), так і в інформаційному (узгодженість атрибутів), а також керує загальною передачею погодженого контенту замовнику. BIM Total Coordinator контролює використання CDE (Common Data Environment) і координує процес випуску моделей відповідно до планових циклів. Specialist Planning Level Coordinator — зосереджується на конкретній дисципліні (наприклад, конструктивному, архітектурному чи MEP-

проєктуванні). Цей координатор відповідає за своєчасну та якісну видачу дисциплінарного BIM-контенту відповідно до вимог проєкту. Він є основним контактним пунктом для BIM Total Coordinator і часто балансує між очікуваннями проєкту та внутрішніми стандартами й робочими процесами компанії.

Ефективний BIM Coordinator повинен мати:

- розвинені технічні навички роботи з BIM-ПЗ та платформами координації, зокрема інструментами для clash detection (наприклад, Navisworks),
- досвід роботи з IFC-моделями через інструменти редагування та валідації,
- ґрунтовне міждисциплінарне розуміння галузей AEC для ефективного управління взаємодією між ними,
- знання open BIM-стандартів (особливо ISO 19650 і протоколів IFC) та здатність перетворювати їх на практики моделювання.

Не менш важливими є soft skills: чітка комунікація, фасилітація командної роботи, здатність виступати посередником між технічними експертами та керівниками проєктів. Досвідчений координатор також гарантує відповідність моделей нормативним вимогам, зберігаючи якість і простежуваність протягом усього процесу проєктування та будівництва.

BIM Specialist (Author, Modeler)-Спеціаліст з BIM (автор, моделер)

BIM Specialist — це технічний експерт, відповідальний за розробку та підтримку детальних, насичених даними 3D-моделей, які відображають фізичні та функціональні характеристики об’єкта. Зазвичай BIM-спеціаліст працює в межах певної дисципліни — архітектури, конструкцій або MEP — перетворюючи проєктні концепції на придатні до будівництва цифрові моделі за допомогою спеціалізованих програмних інструментів, таких як Revit, ArchiCAD чи Civil 3D. Їх також називають BIM Authors або BIM Modelers. Ці фахівці є ключовими для забезпечення точності моделей, їх інтероперабельності та координації в проєкті. Робота BIM Specialist має вирішальне значення на всіх етапах життєвого циклу

проєкту — від початкового проєктування через будівництво і до управління об’єктом.

Як основні виробники цифрового контенту, BIM Specialists тісно співпрацюють із архітекторами, інженерами, BIM-координаторами та менеджерами будівництва, забезпечуючи відповідність моделей технічним вимогам, очікуванням замовника та змінним умовам на будмайданчику (Biblus. BIM Manager, BIM Specialist and BIM Coordinator roles and responsibilities. (2025)). Їхня робота є фундаментом BIM-процесу та дає змогу ухвалювати рішення на основі даних протягом усього життєвого циклу проєкту. Основні обов’язки BIM Specialist [102]:

- Створення, модифікація та підтримка точних 3D BIM-моделей у відповідному програмному забезпеченні (Revit, ArchiCAD, Civil 3D).
- Перетворення проєктного задуму та технічних вимог у параметричні моделі.
- Забезпечення відповідності стандартам моделювання, шаблонам і специфічним вимогам проєкту.
- Виконання clash detection і координація з іншими дисциплінами для усунення конфліктів у моделях.
- Співпраця з архітекторами, інженерами та координаторами для інтеграції та узгодження даних моделі.
- Внесення змін і оновлень відповідно до правок у проєкті та зворотного зв’язку від учасників.
- Проведення регулярних аудитів і перевірок моделей для забезпечення їх повноти та точності.
- Участь у створенні документації, екстракції креслень і підготовці даних для подальшого використання.
- Моніторинг найкращих практик моделювання, інструментів і робочих процесів для підвищення продуктивності.

BIM Specialists є важливою ланкою між проєктним задумом і цифровою реалізацією. У співпраці з BIM-архітекторами та дизайнерами вони перетворюють

креативні ідеї на деталізовані цифрові активи. Разом із менеджерами з будівництва вони допомагають імітувати будівельні процеси, виявляти проблеми на майданчику ще на ранніх етапах та сприяють оптимізації графіків і витрат. Для менеджерів об'єктів (Facility Managers) вони формують моделі з даними про активи, що використовуються в експлуатації та обслуговуванні після введення об’єкта в експлуатацію. Оскільки цифрове моделювання продовжує розвиватися, від BIM Specialist очікується мультидисциплінарне мислення, щоб моделі виконували не лише безпосередню проєктну функцію, а й підтримували спільні, орієнтовані на життєвий цикл BIM-процеси [105].

Ця співпраця найкраще розкривається в ширшому контексті життєвого циклу реалізації BIM. Рис. 2.10 демонструє, як BIM-ролі відповідають ключовим фазам проєкту — від планування і будівництва до експлуатації, реконструкції та демонтажу. Він показує, як різні фахівці галузі AECO (архітектори, інженери, підрядники, менеджери об'єктів) роблять внесок на різних етапах, використовуючи робочі процеси управління інформацією про проєкти та активи (PIM і AIM). Особливу увагу в діаграмі приділено ролі замовників, девелоперів і менеджерів активів у контролі над даними, управлінні ризиками та забезпеченні створення довгострокової цінності. Така наскрізна інтеграція підкреслює зростаючу важливість безперервності інформації та структурованих даних упродовж усього життєвого циклу об’єктів.

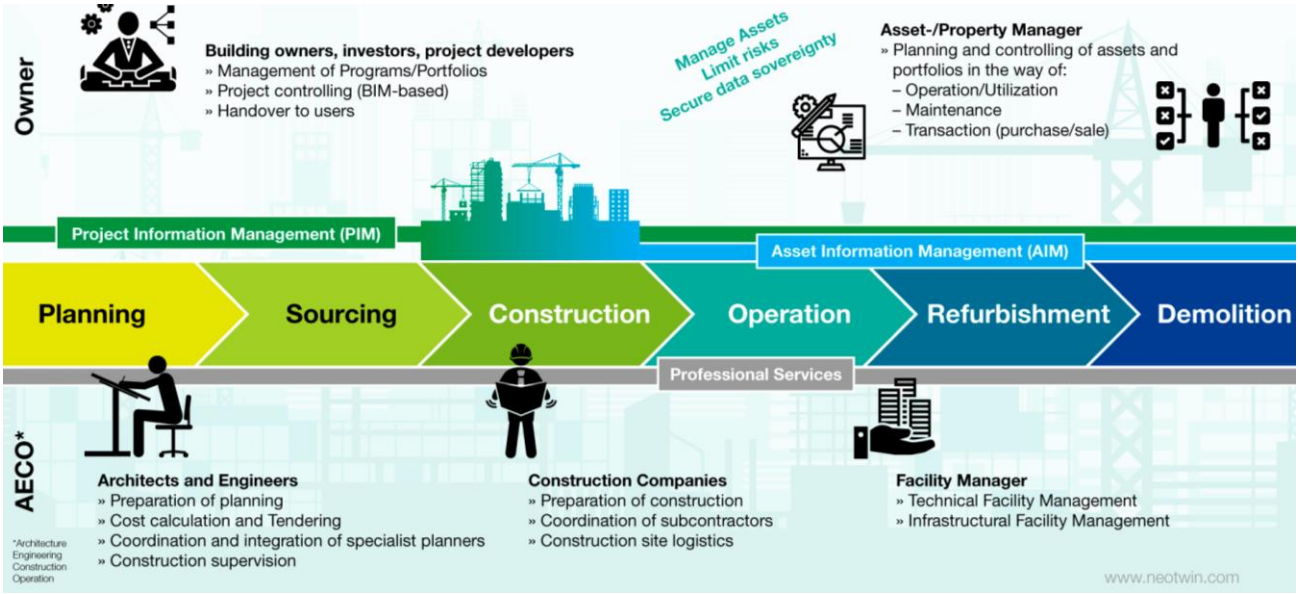


Рис.2.10. Учасники BIM [57]:professional services during planning, sourcing, construction, operation, refurbishment, demolition-building owners, investors, project developers, architects and engineers, construction companies, facility manager, asset/property manager (професійні послуги під час планування, постачання, будівництва, експлуатації, реконструкції, знесення будівель - власники, інвестори, розробники проектів, архітектори та інженери, будівельні компанії, керуючі об'єктами, керуючі активами/майном)

Окрім основних ролей координації та моделювання BIM, кілька додаткових посад відіграють важливу роль у підтримці ефективних робочих процесів BIM протягом усього життєвого циклу проекту. Менеджер CDE забезпечує безпечне зберігання, відстеження та доступність усієї проектної документації в середовищі Common Data, сприяючи прозорості та співпраці. Керівник BIM забезпечує керівництво з урахуванням дисципліни, керуючи командами у створенні послідовних та відповідних результатів BIM. Тим часом керівник проекту інтегрує стратегії BIM у ширшу структуру реалізації, балансуючи обсяг, графік та бюджет. Керівник проектної групи служить критичною ланкою між очікуваннями клієнта та розробкою моделі, забезпечуючи відповідність протоколам моделювання. Допоміжні ролі, такі як Модельєр I/II, допомагають у технічному кресленні та створенні моделей під керівництвом фахівців, сприяючи виробничому конвеєру. Нарешті, менеджер VDC відіграє стратегічну роль, інтегруючи моделі BIM з

передовими інструментами планування, що дозволяє визначати послідовність будівництва, оцінювати витрати та використовувати додатки для даних у режимі реального часу за допомогою технологій 4D/5D та Інтернету речей. У таблиці 2.3 наведено детальне порівняння ключових ролей, пов'язаних з BIM, за кількома вимірами: етапи проекту, основні навички, основні обов'язки, використовувані інструменти та вхідні/вихідні дані.

Таблиця 2.3. Порівняльний аналіз ключових BIM-ролей

Роль	Етапи проєкту	Ключові навички	Основні обов'язки	Типові інструменти	Основні вхідні дані	Основні вихідні дані
BIM Specialist / Modeler (Спеціаліст з BIM / Моделювання)	Проєктування, будівництво, експлуатація (FM)	Параметричне моделювання, clash detection, координація	Створення та підтримка детальних 3D-моделей; інтеграція даних між дисциплінами	Revit, ArchiCAD, Navisworks, Civil 3D	Проєктні креслення, специфікації, BEP	Координовані моделі, звіти про колізії, as-built моделі
BIM Coordinator (Координатор BIM)	Проєктування, будівництво	Міждисциплінарний BIM, CDE-процеси, трекінг задач	Об'єднання моделей, вирішення колізій, контроль відповідності протоколам	Navisworks, BIM Collab, Solibri	Дисциплінарні моделі, правила координації	Зведені моделі, журнали задач/колізій
BIM Manager (Менеджер BIM)	Усі етапи	BIM-стратегія, ISO 19650, дизайн процесів, комунікація зі стейкхолдерами	Розробка та контроль BIM Execution Plan, впровадження стандартів на рівні всього проєкту	CDE-платформи, BIM-інструменти	EIR, BEP, вимоги проєкту	BEP, аудити відповідності, звіти
CDE Manager (Менеджер данних/CDE)	Усі етапи	Управління даними, контроль документації, трасованість	Адміністрування CDE, забезпечення безпечного та версійного доступу до інформації	Autodesk Docs, SharePoint, Aconex	Документи, метадані, історія версій	Перевірена документація, журнали доступу

BIM Lead (Discipline) (Керівник BIM (за дисципліною)	Проєктування	Дисциплінарні знання BIM, QA/QC	Керівництво BIM-виробництвом у межах дисципліни, контроль дотримання шаблонів	Revit, ArchiCAD, Tekla	Концептуальні моделі, технічні дані	Затверджені моделі, дисциплінарні результати
Design Team Leader (Керівник проектної групи)	Передпроєктний етап, планування	Взаємодія з клієнтом, координація проєктних рішень	Узгодження задуму з потребами клієнта та BIM-протоколами	CAD/Design software, BIM-інструменти	Технічні завдання, функціонально-просторові програми	Перевірені концептуальні/проєктні моделі
Project Manager (Менеджер проекту)	Усі етапи	Планування, бюджетування, координація стейкхолдерів	Інтеграція BIM у виконання проєкту; контроль вартості та графіку; моніторинг цифрових віх	Primavera, MS Project, BIM 360	BEP, графік робіт, контракти	Статус-звіти, BIM-інтегровані графіки
VDC Manager (Менеджер VDC/з віртуального проектування та будівництва)	Планування, будівництво	4D/5D моделювання, інтеграція з плануванням, управління ризиками	Зв’язок BIM з будівельним плануванням, моделювання та оптимізація процесів	Synchro, Navisworks, IoT-панелі	Дані часу/вартості, зведені моделі	4D/5D симуляції, прогнози ефективності
Facility Manager (FM) (Менеджер об'єкта)	Експлуатація, реконструкція, демонтаж	Управління активами, вартість життєвого циклу	Використання BIM-даних для обслуговування, експлуатації та	FM-системи, BIM-viewer, CMMS	As-built BIM, реєстр активів	Графіки обслуговування, керівництва, звіти

			рішень щодо життєвого циклу			

РОЗДІЛ 3. ЦИФРОВІ ПЛАТФОРМИ В BIM-СЕРЕДОВИЩАХ

3.1. Огляд BIM-інструментів

У цифровому будівництві під загальною назвою BIM-інструменти об'єднують широкий спектр програмних рішень і сервісів. Цей термін охоплює всі застосунки, платформи та системи, що підтримують створення, координацію, обмін і керування інформаційними моделями будівель. Для зручності BIM-інструменти можна розподілити на три основні категорії, кожна з яких відповідає за певні функції в життєвому циклі проєкту.

1. **BIM-застосунки** — програмні середовища, безпосередньо залучені до проєктування, координації та робіт, пов'язаних зі будівництвом.
   - **Середовища моделювання** (наприклад, *Revit, Archicad, Allplan, Tekla*) забезпечують засоби для створення архітектурних, конструктивних і інженерних моделей.
   - **Інструменти координації** (наприклад, *Navisworks, Solibri, BIMcollab*) дозволяють узгоджувати міждисциплінарні моделі, виконувати виявлення колізій та контролювати якість даних.
   - **Рішення для будівництва та польових робіт** (наприклад, *Trimble Connect, Revizto, Dalux, Bentley SynCHRO*) поширюють BIM-процеси на будмайданчик, підтримуючи мобільну співпрацю, планування та управління питаннями (issue-tracking).
2. **Платформи для спільної роботи (Common Data Environments — CDE)** — централізовані системи, що забезпечують контрольоване збереження, управління версіями та розповсюдження інформації про проєкт. Вони дають змогу всім зацікавленим сторонам працювати з узгодженими та валідаваними даними. Типові загальнорівневі платформи включають *Oracle Aconex, Thinkproject CDE*, тоді як доменно-специфічні середовища, такі як *Autodesk Construction Cloud* або *Graphisoft BIMcloud*, широко використовуються для підтримки співпраці в межах окремих дисциплін або організацій.

3. **Інструменти структурування та управління даними** — рішення й процеси, присвячені стандартизації, збагаченню та валідації BIM-даних.

Слід зауважити, що ці категорії не завжди жорстко розмежовані. Багато сучасних продуктів поєднують функції з кількох груп. Наприклад, *Autodesk Construction Cloud і Trimble Connect* насамперед виступають як платформи співпраці, але також інтегрують можливості валідації даних і відстеження питань. Аналогічно, Solibri Office є і інструментом координації, і потужним середовищем для перевірки даних. Таке функціональне перекриття відображає тенденцію до багатофункціональних екосистем, у яких BIM-інструменти все більше поєднують авторинг, співпрацю та управління даними.

У сукупності ці категорії формують взаємопов'язану цифрову інфраструктуру, що лежить в основі практики BIM, забезпечуючи надійні робочі процеси від початкового проєктування через будівництво до довгострокового управління активами.

Узагальнено, ці категорії утворюють інтегровану екосистему BIM-інструментів, що забезпечує ефективні та надійні робочі процеси протягом усього життєвого циклу проєкту — від концептуального проєктування до будівництва та довгострокового управління.

3.2. BIM-застосунки

3.2.1. Інструменти моделювання

Швидке розширення інформаційного моделювання будівель (BIM) призвело до появи різноманітної екосистеми цифрових платформ, кожна з яких призначена для підтримки певних фаз життєвого циклу будівельного проєкту та задоволення зростаючого попиту на взаємодію та співпрацю. Серед найпоширеніших платформ — Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Bentley OpenBuildings, Trimble Tekla Structures та Nemetschek Allplan, які разом формують технологічну основу впровадження BIM у світі [106].

Autodesk Revit продовжує домінувати на ринку завдяки своєму всебічному параметричному середовищу моделювання, рідній інтеграції з хмарними

сервісами, такими як BIM 360, та сильній підтримці відкритих стандартів, зокрема Industry Foundation Classes (IFC) і Construction Operations Building Information Exchange (COBie) [107]. Graphisoft ArchiCAD, натомість, позиціонує себе як піонер OpenBIM, пропонуючи надійні функції взаємодії та раннє впровадження протоколів IFC, що робить його привабливим для міждисциплінарної співпраці.

Bentley Systems використала свої рішення для інфраструктури, інтегрувавши OpenBuildings Designer з платформами ProjectWise та AssetWise, що дозволяє виконувати координацію в масштабі та управління життєвим циклом активів у цивільних і промислових сферах. Тим часом Tekla Structures від Trimble відома своєю точністю в деталюванні конструкцій і робочих процесах сталевого виробництва, пропонуючи моделі високої точності, безпосередньо пов'язані з виробничими лініями. Allplan від Nemetschek робить акцент на універсальності в архітектурі та інженерії, із сильною інтеграцією з CDE та нативною підтримкою робочих процесів, сумісних з ISO 19650.

Порівняльні аналізи ринку показують, що хоча Revit залишається домінуючим вибором у Північній Америці та Азії, ArchiCAD і Allplan мають сильніші позиції в Європі, де дотримання принципів OpenBIM і регуляторні вимоги впливають на вибір платформи. Ця регіональна диференціація підкреслює стратегічну роль як пропрієтарних екосистем, так і рішень на основі відкритих стандартів у формуванні глобального ландшафту BIM.

Autodesk Revit широко визнаний як одна з найвпливовіших платформ авторингу BIM, встановивши себе фактично як стандарт на багатьох ринках, де впроваджуються цифрові робочі процеси будівництва. На відміну від традиційних CAD-інструментів, Revit інтегрує архітектуру, конструктивне проєктування та інженерні системи (MEP) в єдиному середовищі, що робить його особливо придатним для мультидисциплінарної співпраці[108].

Відмінною рисою Revit є його параметричний механізм моделювання. Кожен елемент моделі визначається як об'єкт із взаємопов'язаними атрибутами, що забезпечує автоматичне поширення змін по всіх уявленнях, специфікаціях та кресленнях. Така узгодженість мінімізує помилки і запобігає дублюванню

інформації, що становить суттєвий зсув від традиційних практик, орієнтованих на креслення.

Revit підтримує широкий спектр функцій, які розширюють його роль понад авторинг дизайну. До них належать автоматичне формування будівельної документації, кошторисів і відомостей матеріалів; інтеграція аналітичних моделей для конструктивного та енергетичного аналізу; та просунута автоматизація через Dynamo — візуальний інтерфейс програмування для генеративного проєктування, перевірок за правилами та управління даними [109]. Платформа також безшовно поєднується з іншими продуктами Autodesk, такими як Navisworks, InfraWorks та BIM 360, формуючи ширшу екосистему для координації проєктування та реалізації проєктів.

Останні релізи приділяли увагу інтероперабельності та підвищенню продуктивності. Revit 2025 представив спрощений інтерфейс відображення IFC, покращену підтримку gbXML для аналізу продуктивності будівлі та вдосконалені робочі процеси для планування ділянки і керування координатами. Реліз 2026 додатково розширив GPU‑прискорення візуалізації, покращив автоматизацію документації та підвищив продуктивність у проєктах великого масштабу [110]. Ці зміни демонструють орієнтацію Autodesk на узгодження Revit з вимогами OpenBIM та зростаючими потребами в обчислювальній ефективності.

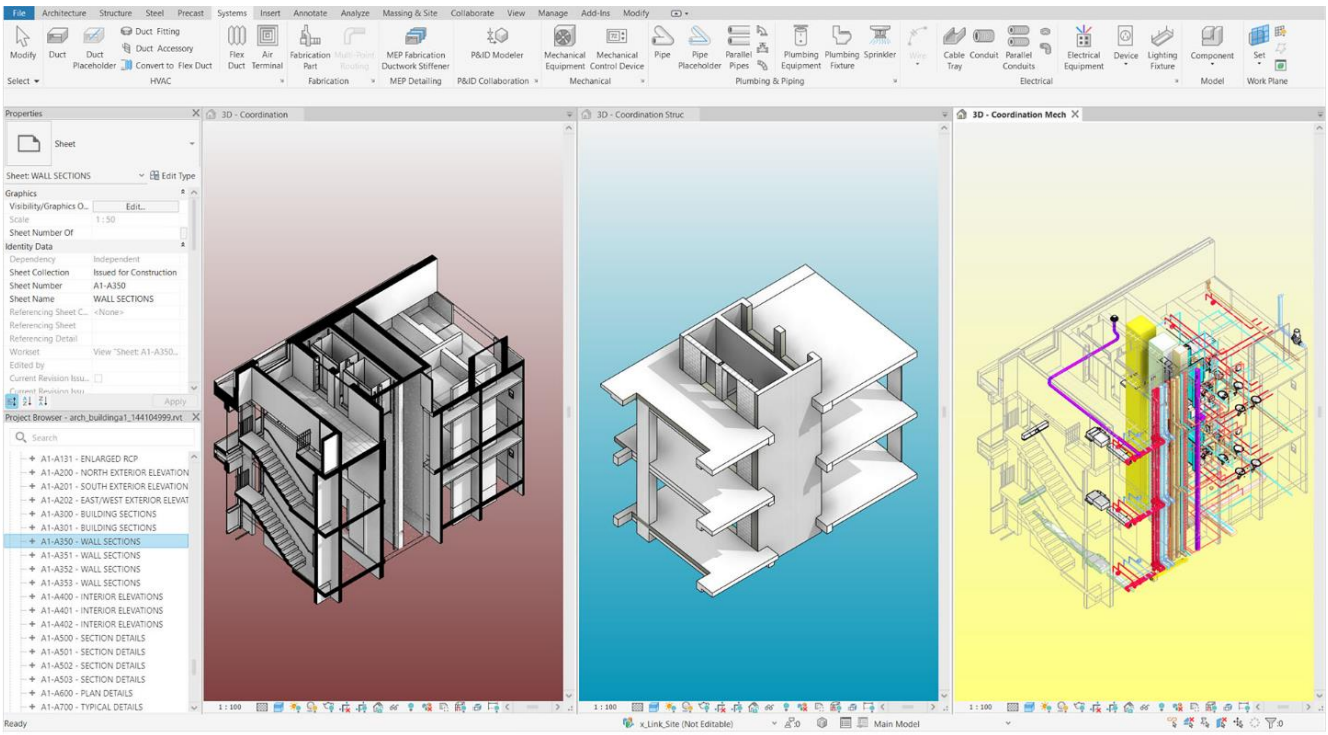


Рис. 3.1. Інтерфейс Autodesk Revit — джерело: https:// autodesk.com .

Незважаючи на переваги, Revit має й обмеження. Програмне забезпечення часто критикують за високі ліцензійні витрати, круту криву навчання для початківців та значні апаратні вимоги. Інтероперабельність з відкритими стандартами, такими як IFC, хоча і постійно покращується, не завжди є бездоганною, іноді створюючи проблеми в середовищах, де пріоритетом є відповідність OpenBIM [111].

Graphisoft ArchiCAD визнаний однією з найраніших і найпослідовніших платформ авторингу BIM, запровадивши концепцію «Віртуальної Будівлі» ще наприкінці 1980-х. Його філософія розвитку завжди була орієнтована на архітектуру, забезпечуючи дизайнерам інтуїтивне середовище, яке інтегрує моделювання, візуалізацію та документацію в єдиний робочий потік. На відміну від багатьох конкуруючих інструментів, ArchiCAD робить сильний наголос на доступності та зручності використання, що дозволяє навіть малим і середнім практикам ефективно впроваджувати BIM.

Ключова характеристика ArchiCAD — його давня прихильність до відкритих стандартів і сумісності. Програма підтримує формати IFC і BCF, що забезпечує сумісність з іншими BIM-додатками та полегшує спільну роботу між

дисциплінами. Graphisoft також розробив спеціальні надбудови для підвищення сумісності, такі як плагін IFC Model Exchange для Revit, що покращує двосторонній обмін даними між платформами [112]. Така OpenBIM-орієнтація робить ArchiCAD особливо релевантним у європейських контекстах, де нормативні рамки часто вимагають стандартизованих форматів даних.

За функціональністю ArchiCAD пропонує широкий спектр можливостей авторингу та координації. Він інтегрує алгоритмічний дизайн через зв'язок із Grasshopper, підтримує проєкти реновації спеціалізованими інструментами та включає BIMx для занурювальної візуалізації й комунікації зі стейкхолдерами [113]. Реліз ArchiCAD 27 у 2024 році ввів управління варіантами проєктування, направляючі відстаней, візуалізацію з підтримкою AI та покращену продуктивність завдяки нативній підтримці Apple Silicon, що відображає орієнтацію Graphisoft на постійне підвищення зручності користування.

Незважаючи на переваги, ArchiCAD має й обмеження. Його параметричні можливості менш комплексні порівняно з Autodesk Revit, особливо при роботі з динамічно взаємопов'язаними параметрами в складних системах.

Проте ArchiCAD залишається провідним рішенням у архітектурній BIM-практиці. Інтуїтивний інтерфейс, потужні засоби візуалізації та глибока прихильність принципам OpenBIM забезпечують його широке впровадження в багатьох регіонах, особливо в Європі. Баланс між зручністю використання та сумісністю гарантує його подальшу актуальність як центрального середовища авторингу в мультидисциплінарних проєктах.

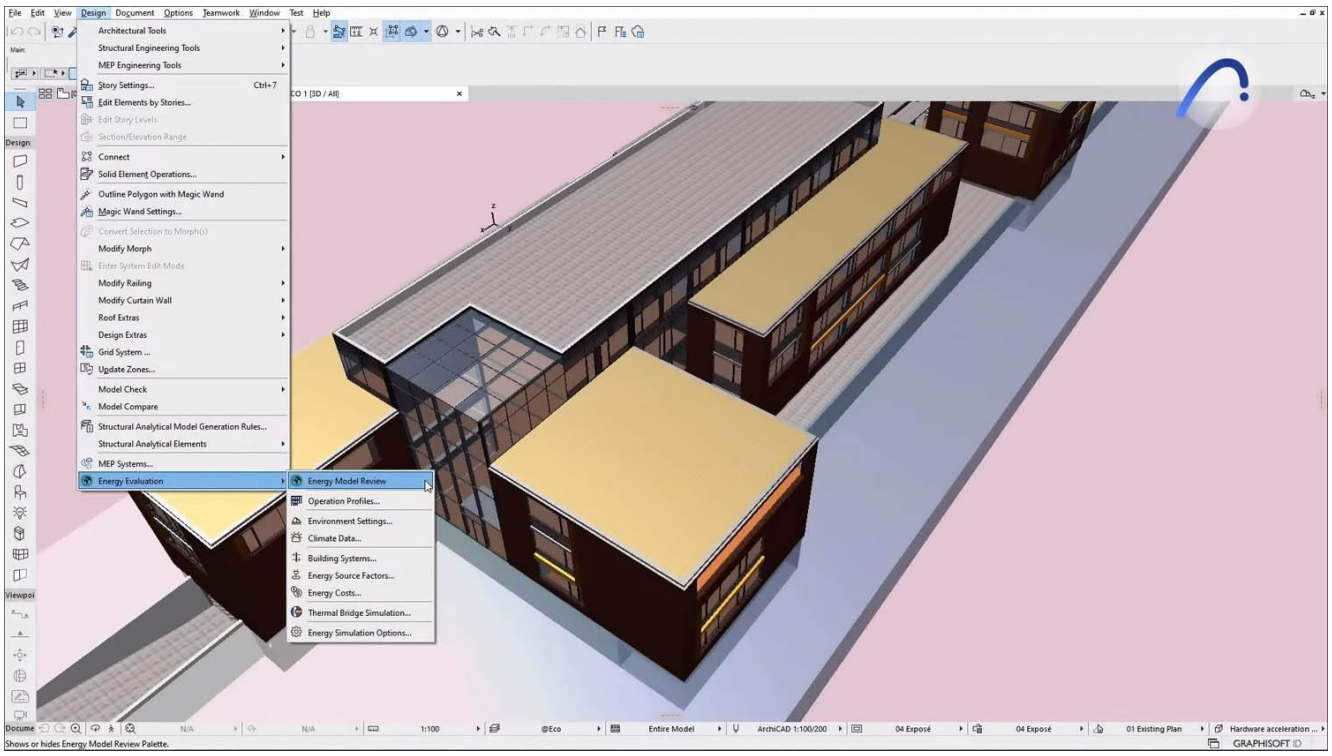


Рис. 3.2. Інтерфейс ArchiCAD — джерело: https://aecmag.com.

Allplan, розроблений групою Nemetschek, є платформою BIM, що закріпила міцні позиції в Європі, особливо в Німеччині, Австрії та Швейцарії. Програма відома своїм подвійним акцентом на архітектурному проєктуванні та конструктивній інженерії, пропонуючи детальне моделювання від початкового планування до будівельної документації [113]. Перевага Allplan полягає у поєднанні робочих процесів архітекторів і інженерів в одному середовищі, що сприяє більш інтегрованій реалізації проєктів [114].

Ключовою відмінністю Allplan є високий рівень геометричної точності, особливо в поданні залізобетонних елементів та складних конструктивних збірок. Платформа надає просунуті функції моделювання та деталювання армування, завдяки чому її широко використовують у проєктах, орієнтованих на інженерні рішення, таких як інфраструктура, мости та висотні будівлі. Allplan також плавно інтегрується з ширшою екосистемою Nemetschek, включаючи Vectorworks, ArchiCAD та Solibri, використовуючи підхід OpenBIM, який просувається в групі [115].

Останні версії, такі як Allplan 2024, представили покращену продуктивність для великих моделей, удосконалену співпрацю через формат BIM Collaboration Format (BCF) та оптимізовані робочі процеси для проєктування збірного залізобетону і мостового будівництва. Ці оновлення узгоджуються з новими вимогами для інфраструктурних проєктів і індустріалізованого будівництва. Крім того, Allplan підтримує як власні формати файлів, так і промислові стандарти, такі як IFC, що робить його сумісним з принципами управління інформацією згідно з ISO 19650 [115].

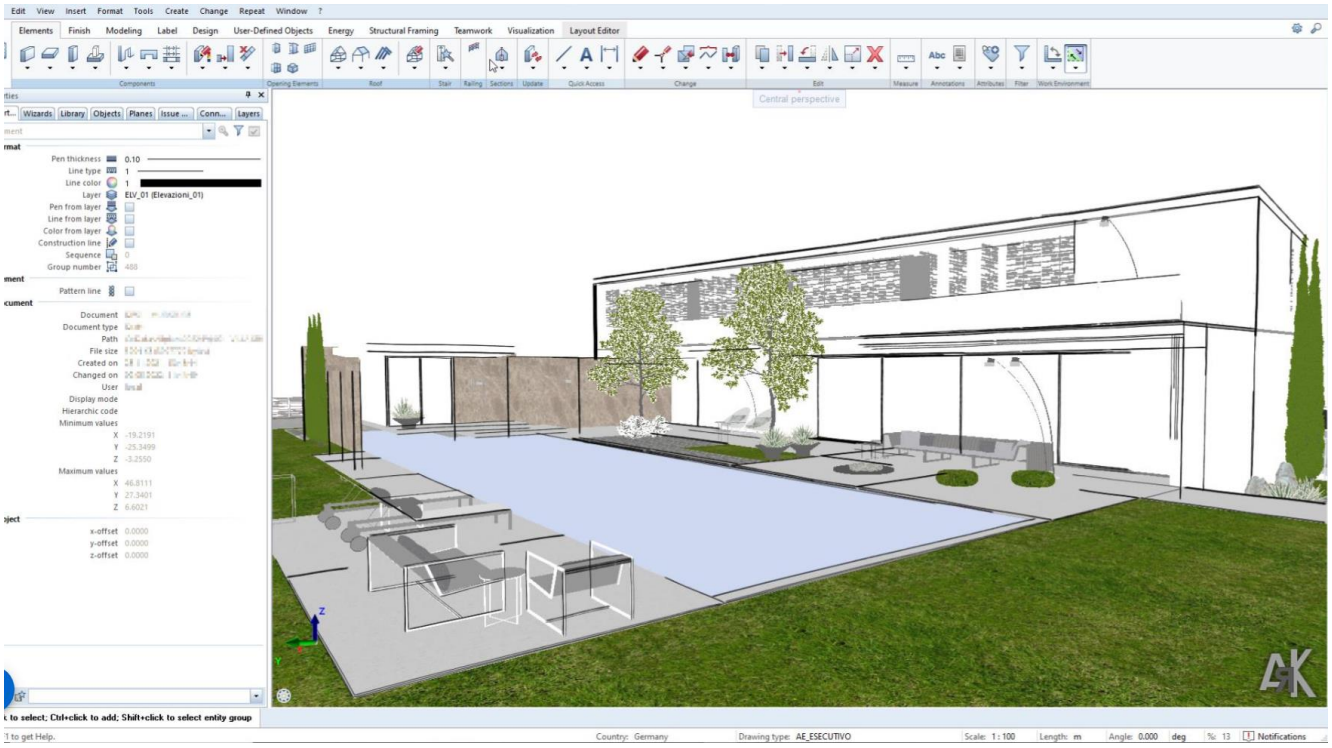


Рис. 3.3. Інтерфейс Allplan — джерело: https:// allplan.com.

Незважаючи на комплексність функціоналу, Allplan часто вважають менш інтуїтивним, ніж ArchiCAD або Revit для суто архітектурних робочих процесів. Користувачі відзначають круту криву навчання, особливо в опануванні функцій деталювання конструкцій, а його впровадження поза німецькомовними країнами було більш обмеженим. Тим не менш, для організацій, що потребують високої точності інженерної інтеграції, особливо у проєктах залізобетонного дизайну, Allplan залишається переважним рішенням і визнаним стандартом на кількох європейських ринках [114].

Tekla Structures від Trimble — платформа моделювання BIM, що здобула визнання за здатність обробляти інженерні конструкції та деталювання будівництва. На відміну від багатьох універсальних BIM-інструментів, Tekla зосереджений на створенні детальних моделей, готових до виготовлення, що робить його поширеним рішенням для сталевої, бетонної та збірної промисловості [116]. Його здатність підтримувати великі інформаційно-насичені моделі з точністю до міліметра виокремлює його як одну з найрозвиненіших платформ для конструктивної придатності та управління життєвим циклом.

Центральною перевагою Tekla Structures є орієнтований на придатність до будівництва підхід моделювання. Програмне забезпечення підтримує створення конструктованих 3D-моделей, що містять не лише геометрію, а й вкладену інформацію про матеріали, виготовлення, послідовності монтажу й технічне обслуговування. Це дозволяє безпосередньо використовувати BIM-моделі у виробничих процесах, таких як CNC-різка сталі, гнучка арматури та виробництво збірних елементів. Внаслідок цього Tekla широко впроваджується підрядниками, виробниками та постачальниками, яким потрібен безшовний перехід від цифрових моделей до виконання на майданчику або на заводі.

Tekla також відома своєю філософією відкритої співпраці. Платформа нативно підтримує стандарт Industry Foundation Classes (IFC) та інтегрується з Trimble Connect, що дозволяє багатодисциплінарну координацію та хмарну співпрацю між географічно розподіленими командами. Останні релізи посилили можливості обміну моделями, представили AI-підтримане виявлення колізій і розширили функції автоматизації для моделювання армування й опалубки, що відображає зростаючий тренд до індустріалізованого та інформаційно-орієнтованого будівництва [116].

Однак Tekla Structures має й недоліки. Платформа є високоспеціалізованою, що означає, що її робочі процеси можуть бути менш придатними для чисто архітектурного проєктування порівняно з Revit або ArchiCAD. Її просунуті функції також потребують значного навчання, особливо для користувачів без досвіду в

деталюванні конструкцій. Крім того, вартість ліцензій та потреба в потужному апаратному забезпеченні можуть стати перешкодою для малих фірм.

Незважаючи на ці обмеження, Tekla Structures залишається галузевим еталоном для конструктивного BIM, особливо в проєктах, де критичними є точність, виготовлення та інтеграція життєвого циклу. Від складних хмарочосів до мостів і промислових об’єктів Tekla надає інструменти, необхідні для поєднання проєктування з будівництвом, забезпечуючи високий рівень точності та ефективності.

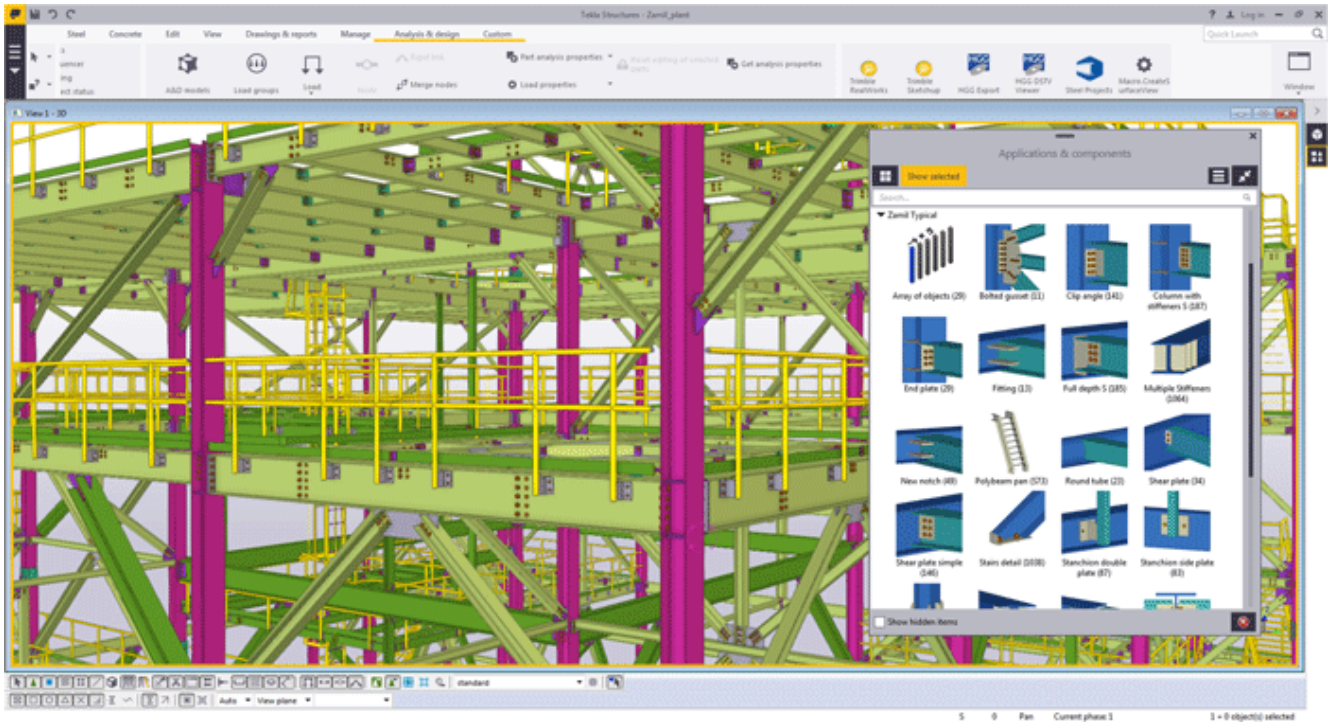


Рис. 3.4. Інтерфейс Tekla — джерело: https://aecmag.com.

Bentley Systems розробила сімейство BIM-застосунків, що виходять за межі проєктування будівель і охоплюють інфраструктуру та управління активами. У центрі цього портфоліо — OpenBuildings Designer (колишній AECOsim Building Designer), який інтегрує архітектурне, конструктивне, механічне та електричне проєктування в єдиному середовищі [117]. На відміну від багатьох конкурентних платформ, рішення Bentley тісно пов’язані з робочими процесами масштабної інфраструктури, що робить їх особливо релевантними в транспорті, комунальному господарстві та промислових проєктах.

Відмінною рисою екосистеми Bentley є її тісний зв’язок з ProjectWise та AssetWise — платформами для співпраці, які керують координацією проєктування, доставкою інформації та показниками продуктивності активів упродовж життєвого циклу. Така інтеграція відображає орієнтацію Bentley на BIM в масштабі інфраструктури та стратегії цифрових двійників, що дозволяє зацікавленим сторонам управляти активами далеко за межами будівництва, у фазі експлуатації та обслуговування.

OpenBuildings Designer пропонує різні просунуті функції, зокрема параметричне моделювання, мультидисциплінарну координацію, енергетичний аналіз та підтримку геоінформаційних систем (GIS). Він також безшовно інтегрується з MicroStation — давньою CAD-платформою Bentley, та дотримується підтримки відкритих стандартів, зокрема IFC, COBie та робочих процесів, сумісних з ISO 19650.

Останні розробки в платформі iTwin ще більше розширюють BIM-можливості Bentley у сфері цифрових двійників. Екосистема iTwin дозволяє синхронізувати в режимі реального часу моделі проєктування, потоки даних IoT та оновлення будівництва, створюючи динамічні цифрові представлення фізичних активів. Ці інновації ілюструють ширшу стратегію Bentley зі зміщення акценту від проєктно-орієнтованого BIM до орієнтації на дані для управління життєвим циклом активів [118].

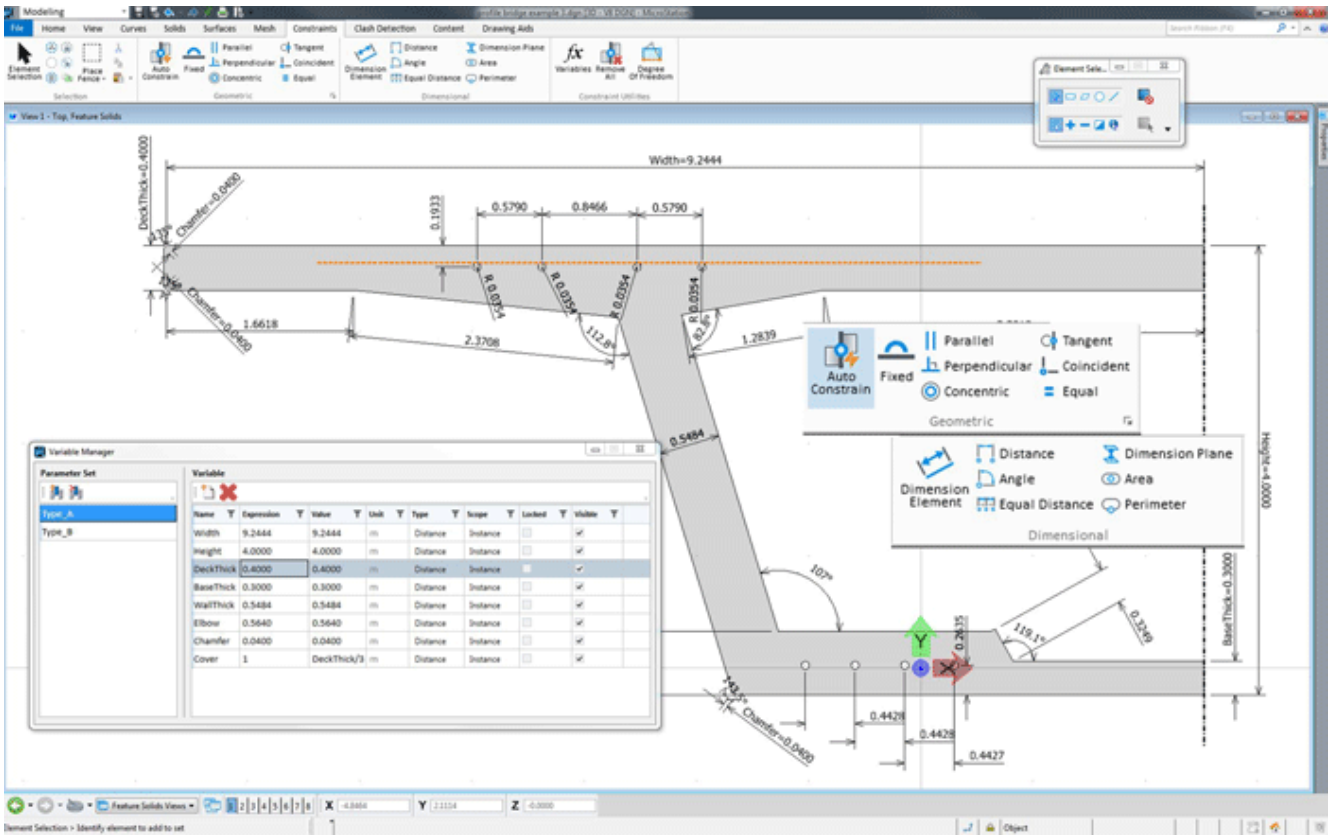


Рис. 3.5. Інтерфейс Bentley Systems — джерело: https://aecmag.com.

Проте рішення Bentley мають певні обмеження. OpenBuildings Designer вважають менш інтуїтивним, ніж Revit або ArchiCAD, особливо для малих проєктних практик. Його впровадження найдоцільніше в великих організаціях, орієнтованих на інфраструктуру, тоді як проникнення на ринок звичайного будівельного проєктування залишається обмеженим. До того ж вимоги до навчання та вартість програмного забезпечення можуть становити перешкоду для фірм без сформованих цифрових робочих процесів.

Навіть з урахуванням цих викликів, BIM-платформи Bentley відіграють критичну роль у просуванні інтегрованої доставки інфраструктури. Їхня орієнтація на технології цифрових двійників, сильна життєвого циклу та сумісність із GIS і інженерними додатками ставлять Bentley у стратегічне положення в цифровій трансформації будівельного середовища..

3.2.2. Інструменти координації (перевірки)

Поряд із середовищами моделювання сформувалася окрема категорія BIM-застосунків, що призначена для вирішення завдань координації моделей та забезпечення якості. Ці інструменти не орієнтовані на створення проєктного контенту, а на інтеграцію дисциплінарних моделей, виявлення колізій, валідацію узгодженості даних та гарантування відповідності проєктним стандартам і нормативним вимогам. Їхня поява відображає зростаючу складність сучасних будівельних проєктів, де багатодисциплінарні команди мають співпрацювати в спільних цифрових середовищах. Через механізми агрегації моделей, перевірок за правилами і структурованого управління питаннями платформи координації перетворюють фрагментовані проєктні виходи на надійну, безколізійну та готову до будівництва інформацію про проєкт [119,120].

Autodesk Navisworks займає виразне місце в екосистемі BIM-програм як платформа для агрегації моделей, координації та огляду проєктів. На відміну від інструментів моніторингу, що зосереджені на створенні дизайну, Navisworks функціонує як хаб, де архітектурні, конструктивні та інженерні моделі об’єднуються для комплексної оцінки [121]. Його основний внесок — можливість команд дослідити уніфіковане представлення проєкту та виявити потенційні невідповідності до початку будівництва.

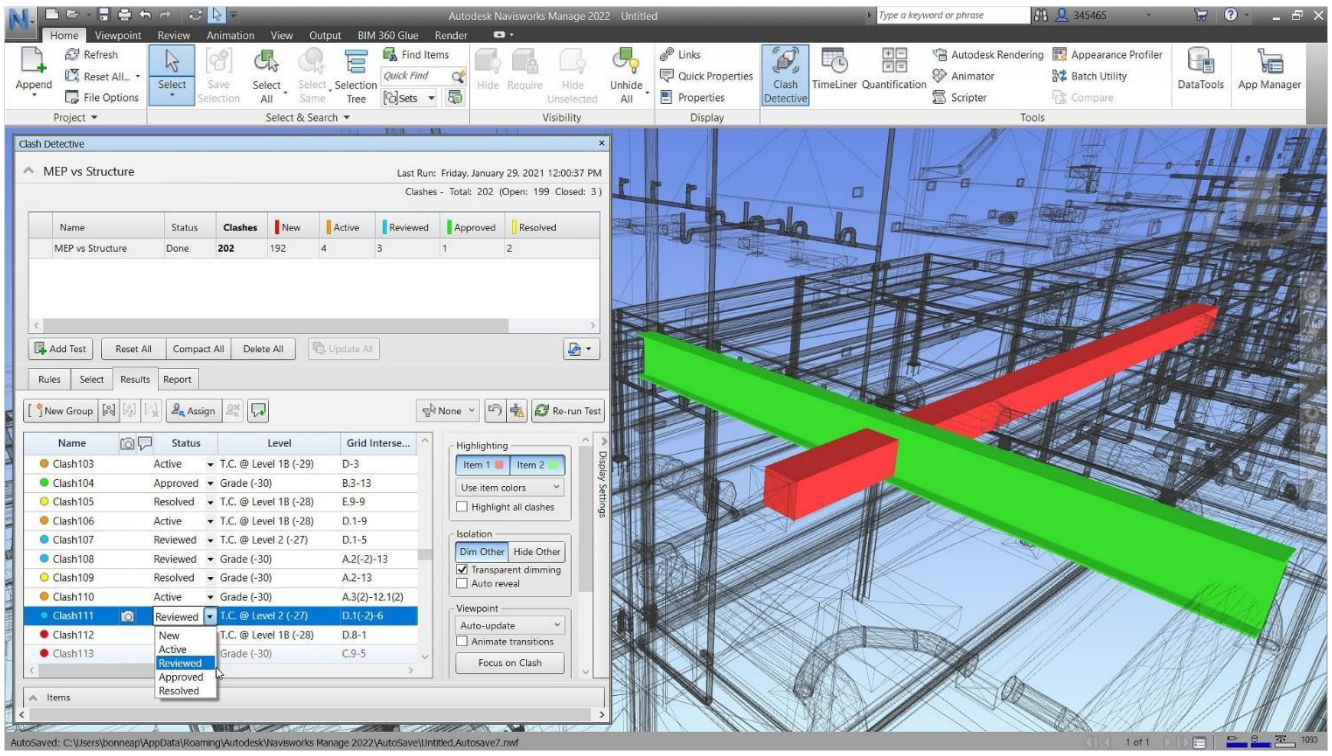


Рис. 3.6. Інтерфейс Autodesk Revit -джерело: https://autodesk.com.

Однією з визначальних можливостей Navisworks є середовище виявлення колізій. Порівнюючи дисциплінарні моделі в інтегрованому робочому просторі, воно виявляє просторові конфлікти, накладання компонентів та невідповідності в розкладній частині. Такий системний підхід до виявлення проблем не лише зменшує помилки в проєктуванні, а й допомагає мінімізувати витрати на виправлення на майданчику. Додатково програмне забезпечення надає 4D‑симуляцію будівництва, зв’язуючи елементи моделі з часовими графіками. Це дозволяє планувальникам і підрядникам візуалізувати послідовності виконання робіт, передбачати вузькі місця та тестувати альтернативні сценарії фазування.

Інтероперабельність платформи посилює її роль у мультидисциплінарній співпраці. Navisworks може читати понад 60 нативних і нейтральних форматів файлів — включно з RVT, DWG, DGN та IFC — що робить його універсальним мостом між гетерогенними проєктними середовищами. У поєднанні з Autodesk Construction Cloud і BIM 360 він підтримує хмарні робочі процеси, де стейкхолдери можуть обмінюватися відгуками, відстежувати питання й забезпечувати узгодженість даних моделі протягом життєвого циклу проєкту.

Однак Navisworks має певні обмеження. Його функціонал обмежений оглядом і координацією; він не надає засобів для нативного редагування моделей або авторингу дизайну. До того ж, у міру переходу галузі до хмарних рішень у реальному часі, орієнтація Navisworks на десктопну архітектуру іноді сприймається як менш гнучка порівняно з новими повністю веб-орієнтованими платформами [120]. Незважаючи на це, він залишається галузевим еталоном координації, особливо в великих і складних проєктах, де виявлення колізій і імітація графіків є важливими складовими управління ризиками.

Solibri Office зарекомендував себе як еталонний інструмент для перевірки моделей за правилами та забезпечення якості в BIM-робочих процесах. На відміну від Navisworks, орієнтованого на виявлення колізій та симуляцію, основна функція Solibri — оцінка цілісності, відповідності та надійності BIM-моделей. Воно забезпечує автоматизовані перевірки за проєктними кодами, вимогами замовника та стандартами доставки інформації, гарантування того, що цифрові моделі можуть слугувати точними контрактними та регуляторними документами [122].

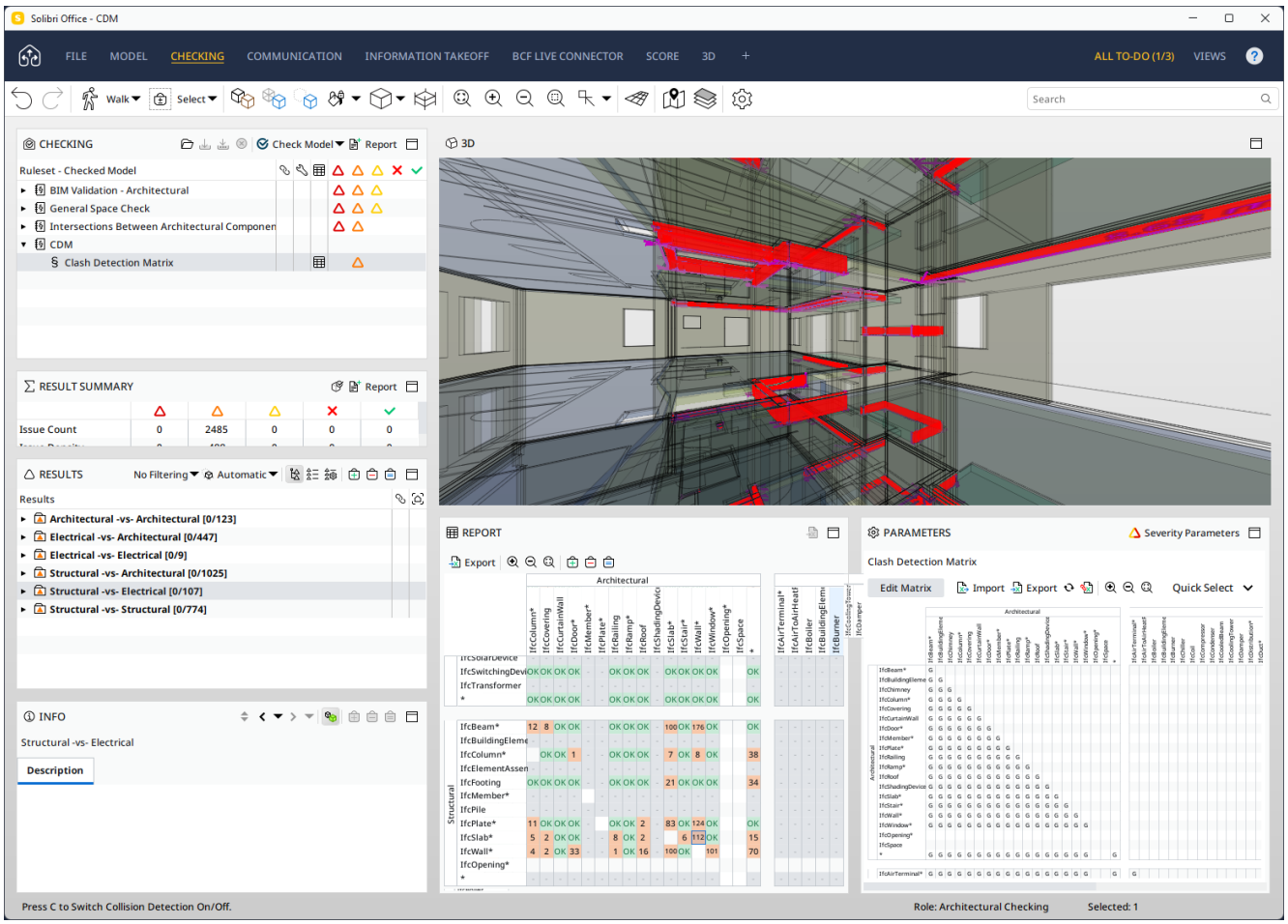


Рис. 3.7. Інтерфейс Solibri office -джерело: https://solibri.com.

У центрі середовища Solibri знаходиться механізм перевірок за правилами. Ця система дозволяє користувачам визначати набори правил валідації, які оцінюють моделі за точністю геометрії, відповідністю будівельним нормам, повнотою інформації та узгодженістю між дисциплінами. Типові кейси включають перевірку вимог пожежної безпеки, стандартів доступності, положень з енергоефективності та дотримання інформаційних специфікацій ISO 19650 [119]. Автоматизація цих процесів знижує ризик людської помилки при ручних перевірках і надає прозорі, аудиторні результати для стейкхолдерів.

Крім того, Solibri полегшує комунікацію щодо моделі та управління питаннями завдяки підтримці BIM Collaboration Format (BCF). Виявлені проблеми можуть експортуватися у стандартизовані BCF-файли та безпосередньо передаватися в інструменти авторингу, такі як Revit, ArchiCAD і Allplan. Це забезпечує не лише виявлення помилок, а й ефективну їх передачу та вирішення в

межах проєктної команди [122]. Програма також інтегрується з платформами на кшталт BIMcollab і Trimble Connect, посилюючи її роль як нейтрального середовища контролю якості в OpenBIM-робочих процесах.

Незважаючи на визнані переваги, Solibri має певні обмеження. Його функціонал зосереджений на валідації моделей, тобто він не забезпечує нативного моделювання, дизайну або просунутої 4D/5D-симуляції. Крім того, витрати на ліцензії та крива навчання для налаштування наборів правил можуть створювати труднощі для невеликих фірм або проєктів з обмеженими ресурсами. Тим не менш Solibri широко вважається галузевим стандартом забезпечення якості моделей, особливо в контекстах, де нормативна відповідність та стандартизована передача інформації є обов'язковими.

BIMcollab репрезентує нове покоління платформ координації, спеціалізованих на управлінні питаннями та комунікації в BIM-робочих процесах. На відміну від Navisworks або Solibri, що фокусуються на агрегації моделей або валідації за правилами, BIMcollab спроектовано як хмарне середовище, де стейкхолдери можуть ідентифікувати, призначати та відстежувати питання, що виникають під час координаційних перевірок. Його фундаментом є BIM Collaboration Format (BCF) — стандартизований метод обміну інформацією між різними BIM-інструментами [123].

Платформа легко інтегрується з провідними додатками моделювання, включно з Revit, ArchiCAD, Allplan, Tekla Structures та Vectorworks, через плагіни, що дозволяють створювати питання безпосередньо у середовищі моделювання. Кожне питання містить точки огляду, коментарі та метадані, які допомагають проєктувальникам у вирішенні конфліктів. Такий підхід знижує ризик непорозумінь і гарантує систематичне вирішення проблем, виявлених під час координаційних переглядів [124].

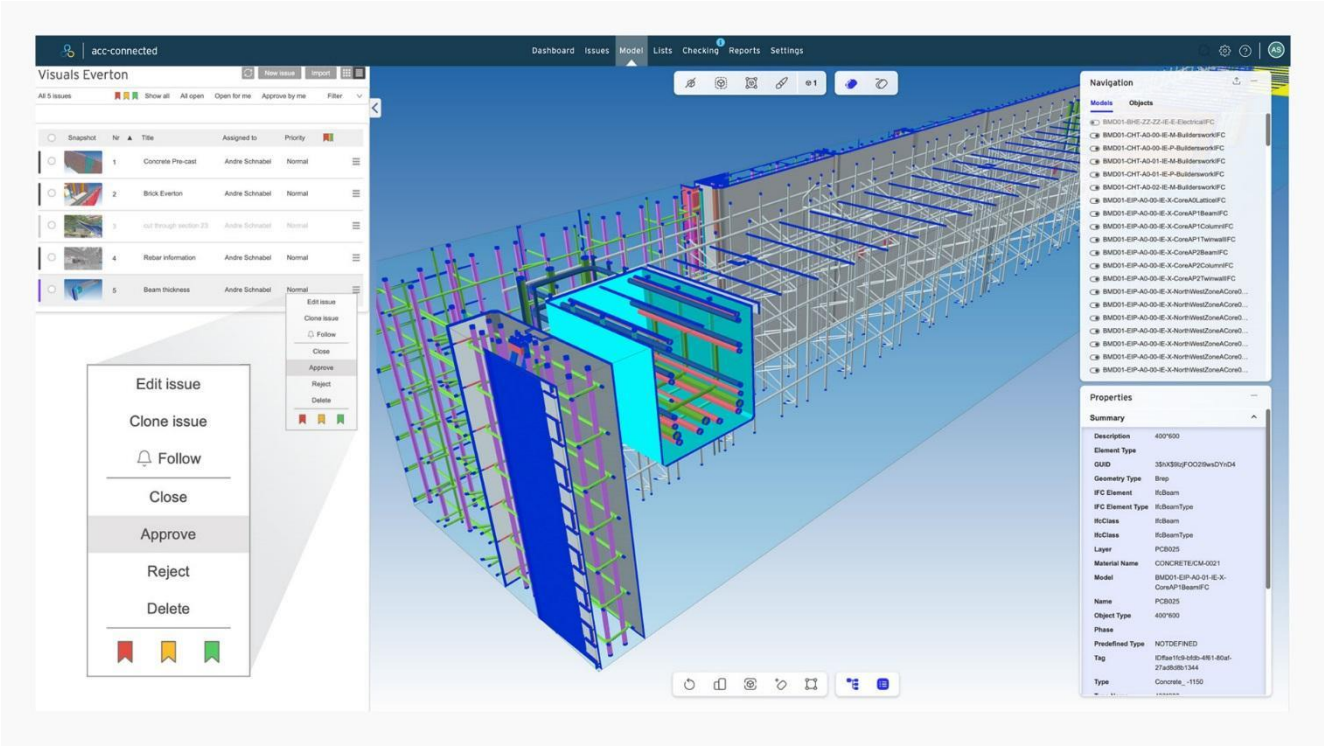


Рис. 3.8. Інтерфейс BIMcollab – джерело: https://bimcollab.com.

Відмінною перевагою BIMcollab є його хмарна доступність. Хостинг управління питаннями на централізованій онлайн-платформі дозволяє розподіленим командам співпрацювати в реальному часі, забезпечуючи прозорість і відповідальність протягом життєвого циклу проєкту. Інтеграція з Common Data Environments (CDE), такими як Trimble Connect і Autodesk Construction Cloud, розширює його інтероперабельність, тоді як аналітичні панелі надають уявлення про повторювані проблеми, стан проєкту та тенденції якості. Незважаючи на ці переваги, BIMcollab не має прямих можливостей для виявлення колізій або валідації моделей, покладаючись натомість на інтеграцію з інструментами на кшталт Navisworks і Solibri. Його цінність полягає передусім в управлінні процесом координації, а не в проведенні самих перевірок. Для організацій, що шукають універсальне «все в одному» рішення, така особливість може розглядатися як обмеження. Однак в OpenBIM-робочих процесах, де критичні інтероперабельність та підзвітність, BIMcollab став загально визнаним стандартом для управління питаннями.

3.2.3. Інструменти для будівництва та польових робіт

Хоча авторські та координаційні платформи становлять основу цифрового проєктування та огляду, практична цінність BIM дедалі більше реалізується на етапі будівництва та польових робіт. На цьому етапі цифрові моделі мають підтримувати робочі процеси на майданчику — моніторинг виконання робіт, вирішення колізій у реальному часі та мобільний доступ до актуальної інформації про проєкт. Польові BIM-рішення закривають розрив між офісною координацією та реалізацією на місці, забезпечуючи, щоб інформація, створена на попередніх етапах, слугувала надійним орієнтиром для будівельних бригад.

Trimble Connect — хмарне Common Data Environment (CDE), створене для розширення BIM-робочих процесів від проєктних офісів до будмайданчика. На відміну від традиційного ПЗ для моделювання і координації, Trimble Connect функціонує як централізований хаб, де стейкхолдери можуть у реальному часі отримувати доступ до даних проєкту, ділитися ними та керувати ними незалежно від місця чи дисципліни [125].

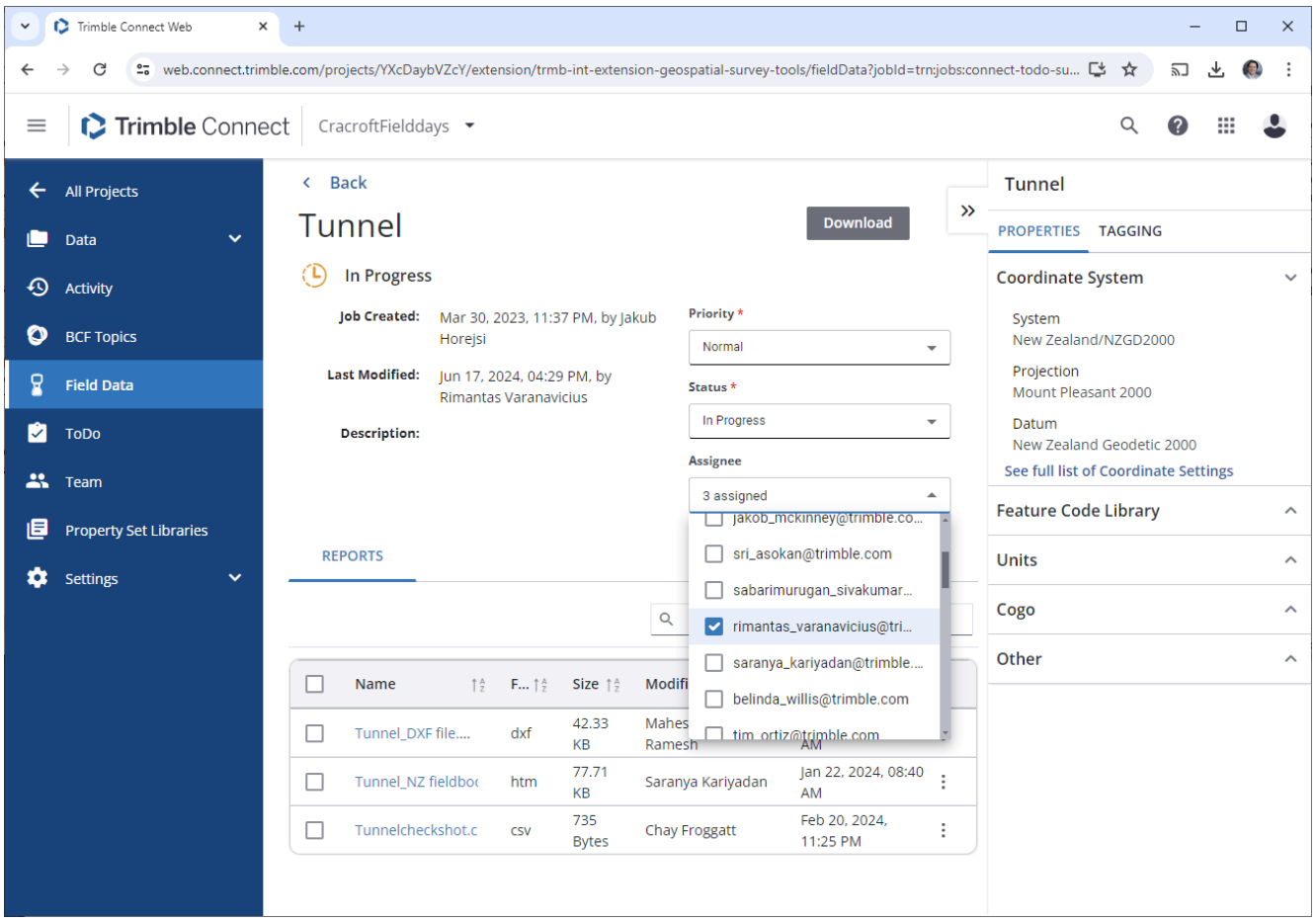


Рис. 3.9. Інтерфейс Tekla Connect — джерело: https://geospatial.trimble.com.

Визначальною рисою Trimble Connect є його орієнтація на відкриті стандарти. Платформа нативно підтримує Industry Foundation Classes (IFC) і BIM Collaboration Format (BCF) для обміну питаннями. Це дає змогу федеративно об'єднувати моделі, створені в різних авторських середовищах — таких як Tekla Structures, Revit чи ArchiCAD — у спільному робочому просторі. Зменшуючи залежність від пропрієтарних форматів, Trimble Connect підсилює принципи OpenBIM і підтримує робочі процеси, сумісні з ISO 19650. Trimble Connect також робить акцент на зручності використання в полі: через мобільні та веб-додатки бригади на майданчику можуть переглядати 3D-моделі, відстежувати завдання, отримувати актуальні креслення та передавати питання безпосередньо з місця робіт. Інтеграція з MR-пристроями (наприклад, Microsoft HoloLens) підсилює візуалізацію на майданчику, дозволяючи порівнювати віртуальні моделі з фізичною конструкцією в реальному часі. Проте платформа не призначена для заміни спеціалізованих інструментів моніторингу або координації: вона не

забезпечує безпосереднє виявлення колізій або детальну валідацію моделей, натомість зосереджена на доступності інформації та співпраці. Для організацій, що вже використовують Tekla Structures, інтеграція проходить прямо; для інших — прийнятність залежить від зрілості OpenBIM-робочих процесів у команді проєкту. Незважаючи на це, Trimble Connect широко вважають ефективним засобом підтримки BIM-співпраці на майданчику, що гарантує, що моделі не залишаються лише в офісі, а активно допомагають виконувати проєкти ефективніше й прозоріше.

Revizto став однією з найупізнаваніших платформ для інтегрованого відстеження питань та модельно-орієнтованої співпраці в будівельних проєктах. Розроблений як крос-платформне середовище, він поєднує управління 2D-кресленнями, навігацію по 3D-моделях та комунікацію в реальному часі, виступаючи як практичний міст між проєктними командами та польовим персоналом [126]. На відміну від традиційних інструментів координації, що зосереджуються на виявленні колізій або перевірках за правилами, Revizto підкреслює інтеграцію робочих процесів. Його ключова перевага — уніфікація різних джерел проєктної інформації (моделі, креслення, позначки й завдання) в одному інтерфейсі, доступному як в офісі, так і на майданчику. Завдяки цьому Revizto зменшує фрагментацію комунікацій і дозволяє командам швидше та прозоріше реагувати на проблеми.

Платформа цінується за зручну систему управління питаннями, яка базується на BIM Collaboration Format (BCF), але подається в спрощеному візуальному вигляді. Користувачі можуть створювати питання безпосередньо з видів моделі, додавати точки огляду та коментарі, призначати відповідальних і відстежувати процес вирішення. Інтеграція з авторськими інструментами, такими як Revit, ArchiCAD, Tekla Structures та Civil 3D, забезпечує повернення виявлених проблем у проєктний потік без втрати інформації. Крім того, Revizto запровадив використання іммерсивних технологій у координації: з вбудованою підтримкою VR зацікавлені сторони можуть оглядати моделі в натуральну величину, інтуїтивно

виявляти проєктні проблеми та покращувати комунікацію з клієнтами — корисну в складних проєктах, де просторове розуміння критично важливе.

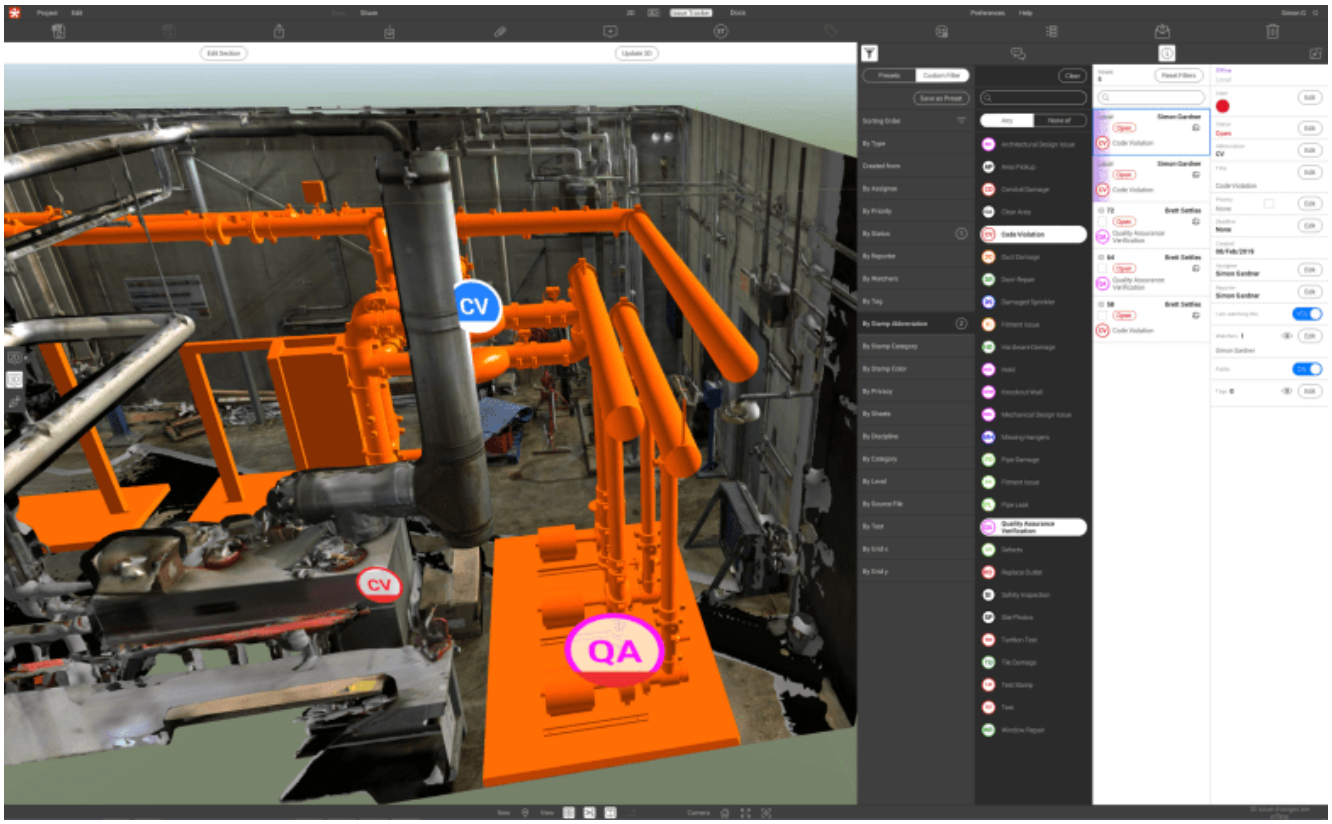


Рис. 3.10. Інтерфейс Revizto — джерело: https://revizto.com.

Недоліками Revizto є відсутність просунутих симуляцій або детальної перевірки за правилами — для таких завдань він покладається на зовнішні координаційні інструменти. Також витрати на ліцензії можуть бути складними для невеликих організацій. Проте платформа широко сприймається як середовище, орієнтоване на співпрацю, яке доповнює авторські й координаційні рішення, роблячи проєктну інформацію більш доступною й придатною для щоденних робочих процесів.

Dalux репрезентує нове покоління мобільно-орієнтованих BIM-додатків, спеціально адаптованих для перенесення цифрових робочих процесів безпосередньо на будмайданчик. На відміну від платформ, що розвивалися з десктопних середовищ, Dalux від самого початку створювався з урахуванням потреб польових працівників, роблячи упор на доступність на смартфонах і планшетах [127]. Його основна функція — забезпечити наявність актуальних

моделей, креслень і завдань у руках інженерів на майданчику, керівників та підрядників.

Рис. 3.11. Інтерфейс Dalux — джерело: https://dalux.com.

Платформа надає широкий набір можливостей для роботи в полі: перегляд моделей у форматі IFC, управління кресленнями, звітування про проблеми та відстеження завдань. Особливістю Dalux є накладання 3D-моделей на реальне середовище через доповнену реальність (AR), що дозволяє працівникам порівнювати проєктний задум із фактичним виконанням безпосередньо на місці. Це зробило Dalux привабливим для контролю якості, інспекцій з безпеки та оперативної перевірки монтажних робіт. Dalux також включає інструменти для управління проєктами та експлуатацією об’єктів, дозволяючи використовувати ту саму платформу на різних стадіях життєвого циклу активу. Поєднуючи відстеження питань у фазі будівництва з даними для довгострокової експлуатації, він створює безперервність між доставкою та управлінням будівлею — аспект, який усе більше підкреслюється в робочих процесах, узгоджених з ISO 19650 [128].

Попри це, Dalux найефективніший як доповнення, а не як автономне рішення: він не замінює спеціалізовані координаційні або моделювальні платформи. Успіх залежить від зрілості CDE-стратегії проєкту та готовності стейкхолдерів до мобільної співпраці. Тим не менш, Dalux здобув широке поширення в Європі та інших регіонах як відповідь на зростаючий попит на рішення, що виносять BIM з офісу на майданчик.

Bentley SYNCHRO — комплексна платформа для планування й управління будівництвом, відома здатністю поєднувати 3D-моделі з часовими та ресурсними даними (4D/5D BIM). На відміну від чисто мобільних рішень типу Dalux, SYNCHRO спочатку розроблявся як десктопна програма (SYNCHRO Pro) для планування на основі моделей і сценарного моделювання, що робить її особливо придатною для великих і складних проєктів, де послідовності та логістика будівництва мають бути змодельовані й оптимізовані до початку виконання робіт [129].

Відмінною рисою SYNCHRO є модульна екосистема. У той час як SYNCHRO Pro забезпечує просунуте 4D-планування на стаціонарному ПК, компаньйони SYNCHRO Control (веб-застосунок для управління проєктом) і SYNCHRO Field (мобільний додаток) розширюють його функціональність безпосередньо на будмайданчик. Через ці модулі команди можуть отримувати оновлені графіки, відстежувати щоденний прогрес, фіксувати польові дані з фото та звітами й синхронізувати інформацію назад у центральну модель. Така інтеграція гарантує зв’язок планування та виконання в єдиному середовищі, підвищуючи прозорість і підзвітність.

SYNCHRO також інтегрується з платформою iTwin від Bentley, дозволяючи в реальному часі порівнювати планове й фактичне виконання робіт. Це створює зворотний зв’язок, де оновлення з поля постійно узгоджуються з базовим планом проєкту. Поєднуючи планування, польові звіти та аналітику даних, SYNCHRO підтримує як високорівневий контроль проєкту, так і практичні робочі процеси на майданчику.

Однак така комплексність передбачає свої компроміси. Платформа вимагає значних інвестицій у навчання та впровадження, і менші організації можуть вважати її функціонал надлишковим для своїх потреб. Проте для інфраструктурних та великих будівельних проєктів SYNCHRO залишається провідним рішенням для цифрового менеджменту будівництва, особливо коли планування в офісі й виконання на майданчику повинні працювати синхронно.

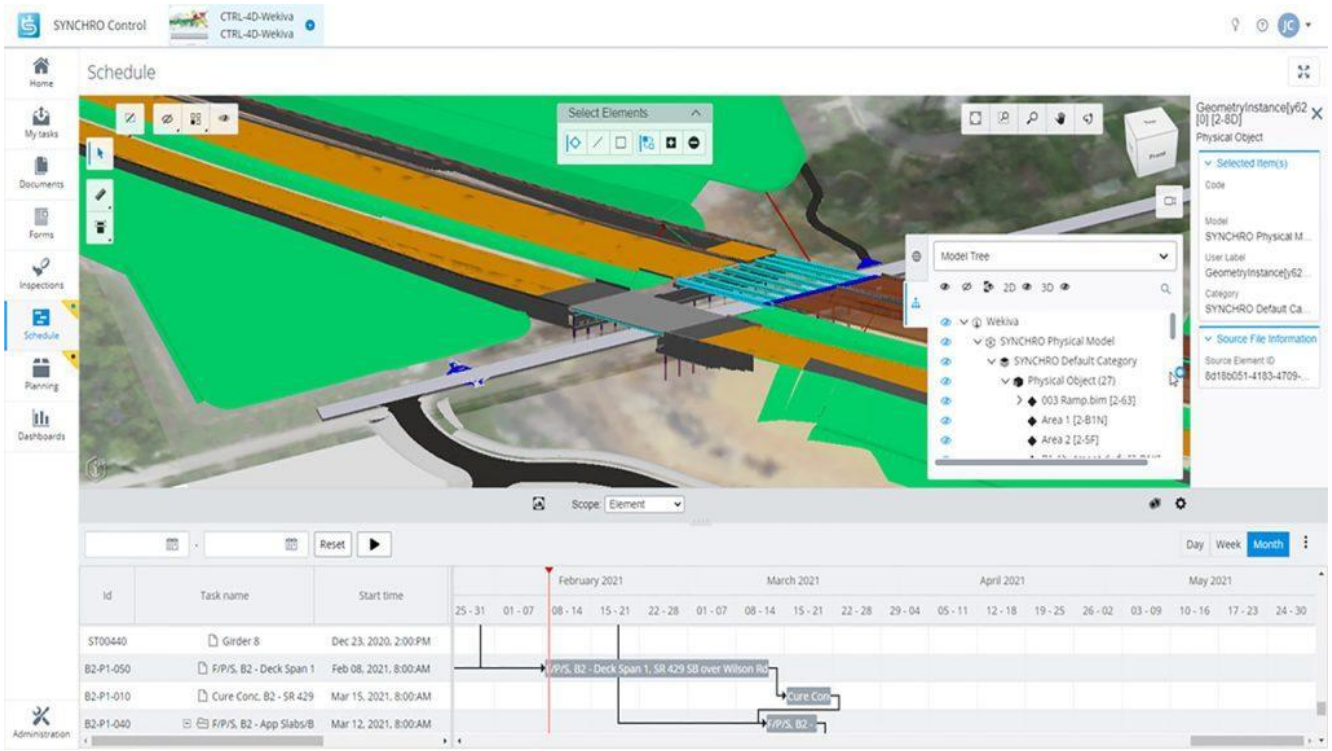


Рис. 3.12. Інтерфейс Bentley SYNCHRO — джерело: https://bentley.com.

Хоча моделювальні, координаційні й орієнтовані на будівництво платформи є найбільш видимими сегментами екосистеми BIM-ПЗ, вони належать до ширшого ландшафту цифрових інструментів. Асортимент застосунків у практиці BIM виходить далеко за межі моделювання та виявлення колізій. Колективно звані BIM-інструментами, ці рішення включають також спеціалізовані додатки для симуляцій, аналізу, кошторисування та оцінки сталого розвитку. Як показано на рис. 3.13, BIM-застосунки можна згрупувати за функціональними категоріями: авторські програми, програми для перевірки, переглядачі, інструменти оцінки просторів, симуляції кошторисів, енергетичні та екологічні симулятори та пакети для просунутого аналізу. Кожен із цих класів виконує свою роль, а разом вони

формують інтегровану цифрову інфраструктуру, що забезпечує узгоджене, інтероперабельне та орієнтоване на життєвий цикл управління інформацією в будівельній галузі.

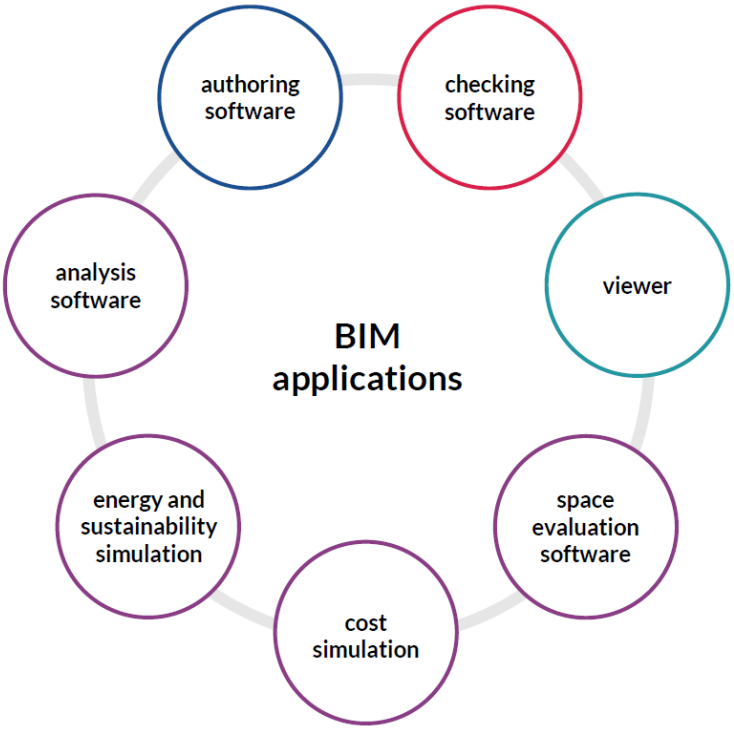


Рис. 3.13. Функціональні групи BIM-застосунків — джерело: BIMcertHandbook. (2024).

3.3 Платформи для співпраці

Центральним елементом сучасної BIM-практики є використання платформ для співпраці, формально відомих як Common Data Environments (CDE). Ці платформи виступають як спільні цифрові робочі простори, забезпечуючи єдине джерело правди для моделей, документів та комунікацій у межах проєктної команди. Завдяки інтеграції управління документами, контролю версій, прав доступу та аудиторських журналів CDE гарантують, що всі зацікавлені сторони працюють з валідованою та актуальною інформацією..

Рішення CDE можна умовно поділити на дві групи. З одного боку, платформи корпоративного рівня розроблені для багатоорганізаційних проєктів зі складними робочими процесами та контрактними обов’язками. Типові приклади — Oracle

Aconex, Thinkproject CDE — які широко використовуються в великих інфраструктурних та міжнародних проєктах. З іншого боку, доменно‑специфічні платформи забезпечують тіснішу інтеграцію з програмним забезпеченням для проєктування та інженерії. До цієї категорії належать Autodesk Construction Cloud (колишній BIM 360) та Graphisoft BIMcloud, що пропонують безшовні підключення до авторських середовищ і підтримують дисциплінно‑орієнтовану співпрацю.

Окрім обміну файлами, багато CDE включають автоматизацію робочих процесів (наприклад, RFI, субмітали, запити на зміни), інтеграцію з інструментами координації та дедалі частіше — зв'язки з середовищами цифрових двійників, що забезпечує місток між проєктуванням, будівництвом і експлуатацією. Це робить CDE не лише сховищем даних, а й активним хабом управління проєктом і інформацією впродовж життєвого циклу активів.

Oracle Aconex [130] нині вважається однією з найвідоміших платформ CDE корпоративного рівня, широко впровадженою у складних інфраструктурних та промислових проєктах у всьому світі. Спочатку розроблена в Австралії та нині входяча до портфелю Oracle Construction Cloud, вона здобула репутацію завдяки роботі на великих проєктах із численними зацікавленими сторонами, де нейтральність управління даними має критичне значення. Усі документи, моделі та кореспонденція зберігаються в центральному середовищі з повною версіонністю та відстежуваними робочими процесами, що забезпечує неможливість одностороннього контролю інформації однією стороною.

Платформа також відома структурованою обробкою RFI, субміталів та ланцюгів погоджень, що робить її привабливою в публічному секторі та контрактах із суворими вимогами. Водночас масштаби й складність Aconex можуть становити виклик для менших проєктів, де накладні витрати на конфігурацію та навчання можуть перевищувати очікувані переваги.

Thinkproject [131] репрезентує європейський еквівалент у цій сфері, із CDE‑рішеннями, широко впровадженими в Німеччині, Скандинавії та Великій Британії. Ці платформи спроєктовані з сильним акцентом на відповідність європейським BIM‑вимогам та управління життєвим циклом активів. На відміну

від багатьох CDE, які зосереджуються переважно на проєктуванні та будівництві, tpCDE часто позиціонують як довгострокове середовище, що природно розширюється до «facility management», відображаючи зростаюче значення структурованої передачі даних. Користувачі цінують налаштовуваність робочих процесів Conclude, які можна адаптувати до місцевих регуляцій або специфічних процесів замовника, тоді як відкриті стандарти, такі як IFC і BCF, підтримуються для полегшення інтероперабельності. Порівняно з Oracle Aconex, рішення Thinkproject сприймаються як більш гнучкі та адаптивні до регіональних практик, хоча їхнє поширення залишається більш сконцентрованим у європейських ринках.

Autodesk Construction Cloud [132] (колишній BIM 360) належить до групи інтегрованих середовищ співпраці, розроблених насамперед для архітекторів, інженерів і підрядників, які вже працюють в екосистемі Autodesk. Його головна перевага — тісна інтеграція з Revit, Civil 3D, Navisworks та іншими продуктами Autodesk, що дозволяє користувачам отримувати доступ до моделей і координувати їх безпосередньо в хмарному середовищі. Платформа забезпечує контроль версій, відстеження змін та координацію між командами, а також пропонує модулі для управління завданнями, контролю якості та аналітики проєктів. Для багатьох організацій такий рівень інтеграції зменшує проблеми сумісності та оптимізує робочі процеси. Водночас критики вказують, що закрита екосистема Autodesk може обмежувати гнучкість у проєктах, де для повної реалізації OpenBIM необхідна ширша підтримка відкритих стандартів.

Graphisoft BIMcloud [133] є прикладом доменно-специфічної платформи для співпраці, розробленої як розширення Archicad. На відміну від CDE корпоративного рівня, BIMcloud пристосований для підтримки командної роботи в реальному часі серед архітекторів і дизайнерів, пропонуючи миттєву синхронізацію моделі та контрольований доступ у розподілених командах. Рішення поєднує локальні серверні інсталяції з хмарними сервісами, що робить його придатним як для малих практик, так і для великих міжнародних фірм. BIMcloud часто описують як «міст» між традиційною локальною командною роботою та корпоративними CDE-рішеннями, забезпечуючи основні функції

співпраці при збереженні простоти й сильного фокусу на архітектурній практиці. Обмеження полягає у відносно вузькій інтеграції, переважно в межах екосистеми Graphisoft, проте ця спеціалізація також визначає його цінність як високоефективного середовища для користувачів Archicad.

3.4 Інструменти структурування та управління даними

Ще одна категорія BIM-інструментів охоплює рішення для структурування та управління даними, які забезпечують не лише геометричну коректність моделей, а й наявність інформації, необхідної для їх надійного використання впродовж усього життєвого циклу. На відміну від авторських або координаційних платформ, ці інструменти насамперед опікуються семантичним рівнем BIM — тим, як визначаються, валідуються та обмінюються властивості, класифікації й інформаційні вимоги.

Деякі рішення функціонують як програмні застосунки. Наприклад, SimpleBIM спеціалізується на редагуванні й нормалізації IFC-моделей, дозволяючи командам проєкту відсікати непотрібну геометрію, збагачувати відсутні атрибути й стандартизувати іменування перед передачею моделей. BIM-Q, розроблений компанією Symetri, надає структуроване середовище для визначення й управління інформаційними вимогами, що дозволяє організаціям встановлювати чіткі очікування щодо наборів властивостей і даних для передачі. Аналогічно, Solibri RuleSets і BIMcollab ZOOM можна використовувати для перевірки відповідності моделей погодженим вимогам, розширюючи їхню роль від простої координації до валідації інформації.

SimpleBIM [134] зарекомендував себе як одне з найпоширеніших рішень для редагування й стандартизації IFC-моделей. Розроблений у Фінляндії, він особливо цінується в OpenBIM-робочих процесах, де моделі з різних авторських платформ потрібно гармонізувати перед координацією чи передачею. Застосунок дозволяє фільтрувати й спрощувати великі IFC-файли, збагачувати елементи відсутніми властивостями та нормалізувати набори атрибутів відповідно до вимог проєкту. Це дає змогу перетворити “сирі” експорти на придатні для використання інформаційні

моделі. Натомість SimpleBIM не займається виявленням колізій або генерацією креслень — він повністю зосереджений на семантичній якості даних, забезпечуючи, щоб моделі були лаконічними, послідовними та відповідали погодженим інформаційним специфікаціям.

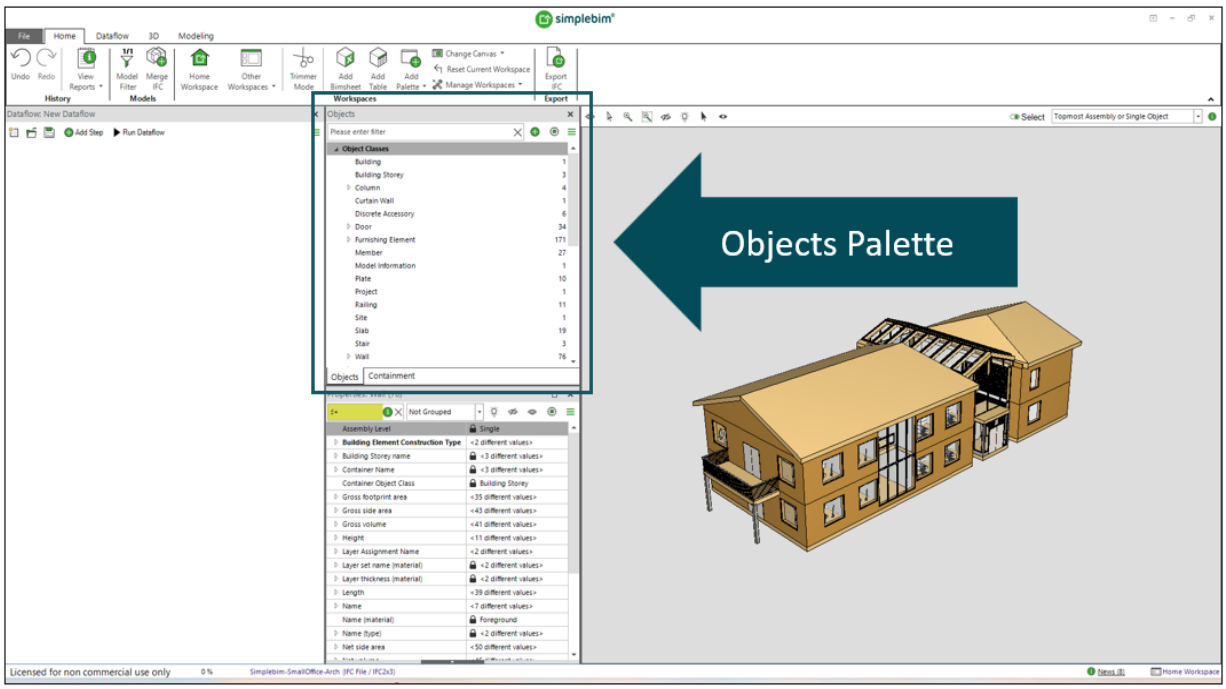


Рис. 3.15. Інтерфейс SimpleBIM — джерело: https:// simplebim.com.

BIM-Q, [135] створений Symetri, уособлює інший аспект управління даними: визначення вимог і їхнє адміністрування. Платформа дає змогу організаціям створювати й керувати інформаційними вимогами (EIR, AIR або шаблонами на основі IDS) та прив'язувати їх до BIM-доставок. На практиці це означає, що стейкхолдери можуть точно вказати, які властивості має містити кожен елемент, як їх слід іменувати та на якій стадії проєкту вони очікуються. BIM-Q допомагає узгодити очікування між замовниками, проєктувальниками та підрядниками, зменшуючи ризик неповної або несумісної передачі даних. Його сила — у перетворенні абстрактних інформаційних вимог на конкретні, придатні для керування шаблони, які можна застосовувати в різних проєктах.

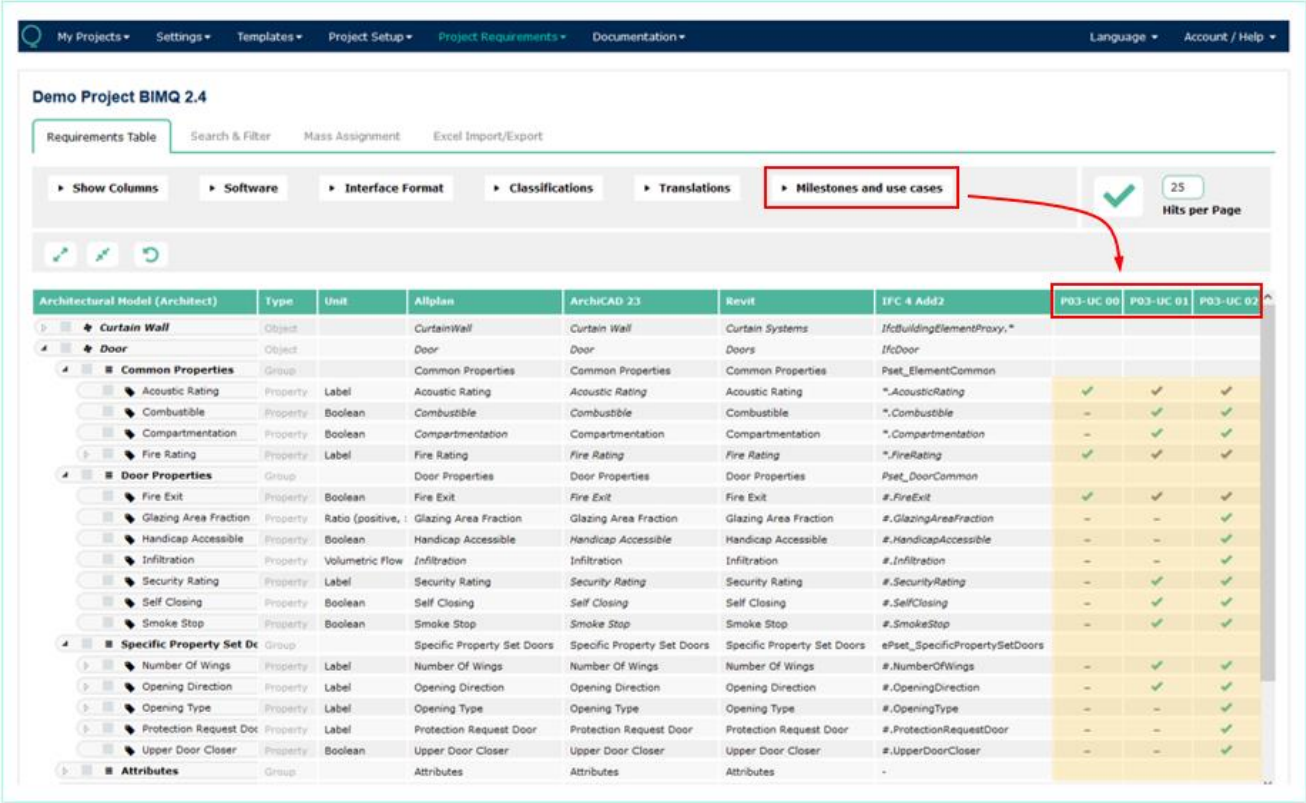


Рис. 3.16. Інтерфейс BIM-Q — джерело: https://bimq.de.

Важливо підкреслити, що межі між категоріями часто розмиті. Деякі координаційні або платформи для співпраці інтегрують функції управління даними — наприклад, Autodesk Construction Cloud і Trimble Connect поєднують можливості CDE з відстеженням питань та валідацією атрибутів. Аналогічно, Solibri виконує роль і координаційного інструмента, і середовища для перевірки даних. Це відображає ширшу тенденцію індустрії до багатофункціональних екосистем, де програмні рішення дедалі більше об’єднують авторинг, співпрацю та інформаційне управління в межах єдиного цифрового робочого процесу.

РОЗДІЛ 4. ОБМІН ДАНИМИ ТА ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНІСТЬ

4.1. Огляд форматів обміну

У міру поширення BIM успіх цифрової співпраці все більше залежить від здатності узгоджено обмінюватися й інтерпретувати дані в різних програмних екосистемах. Інструменти моніторингу, координації та будівництва походять від

різних виробників, тому інтероперабельність є необхідною для забезпечення надійних робочих процесів та уникнення прив'язки до окремого вендора.

В контексті openBIM інтероперабельність підтримується структурованим набором компонентів:

Формати даних — вони становлять основу обміну інформацією. Найвідоміші з них — Industry Foundation Classes (IFC), нейтральна до виробника схема моделі, стандартизована в ISO 16739, та BIM Collaboration Format (BCF), що дозволяє легкий обмін питаннями й коментарями, пов'язаними з елементами моделі. Додатково COBie визначає табличний формат для структурованої передачі даних про об'єкт і активи, а Data Sheets / Product Data Templates (PDTs) стандартизують інформацію про рівень виробу, що надається виробниками.

Семантичні сервіси — щоб забезпечити однакове значення обмінюваних даних у різних платформах, сервіси, як-от buildingSMART Data Dictionary (bSDD), надають стандартизовані властивості, терміни та класифікації, які можуть посилатися безпосередньо в BIM-робочих процесах.

Методології та специфікації — процеси, такі як Information Delivery Manual (IDM), визначають, хто, яку інформацію, коли і навіщо передає, тоді як Model View Definitions (MVD) обмежують IFC для конкретних випадків використання. Останнім часом Information Delivery Specification (IDS) з'явився як машинозчитуваний формат для формалізації проектно-специфічних інформаційних вимог.

Механізми впровадження та валідації — інтероперабельність додатково підтримується програмами сертифікації ПЗ та сервісом валідації buildingSMART, які гарантують послідовну реалізацію відкритих стандартів у застосунках і відповідність обмінюваних даних погодженим правилам.

Узагальнено ці шари формують технічну та процедурну основу openBIM. Отже, інтероперабельність — це не лише технічне питання передачі файлів, а комплексне питання управління: балансування між відкритими стандартами, що сприяють довготривалій придатності даних, та пропрієтарними екосистемами, які

можуть давати ефективність у своїх межах, але ускладнювати міжплатформенну співпрацю.

4.2. Формати даних

4.2.1 Industry Foundation Classes (IFC)

Проблема поєднання різних BIM‑застосунків багато років була одним із критичних вузьких місць галузі. Пропрієтарні формати часто утримують інформацію в екосистемі одного виробника, ускладнюючи співпрацю між дисциплінами. Стандарт Industry Foundation Classes (IFC) виник як відповідь на цю проблему, пропонуючи нейтральну, міжнародно визнану схему для структурування й обміну даними про будівлі та інфраструктуру. Формалізований як ISO 16739‑1:2018, він сьогодні вважається опорою практики OpenBIM [136].

На відміну від форматів, які пріоритезують функції конкретного ПЗ, IFC призначений описувати як геометрію, так і семантику будівельних елементів послідовним способом. Наприклад, IfcWall — це не просто 3D‑екструзія, а об’єкт, що несе атрибути, такі як матеріал, вогнестійкість, параметри вартості та дані життєвого циклу. Така орієнтована на об’єкти логіка дозволяє інформації переміщуватися між платформами — стіну, створену в ArchiCAD, можна переглядати в Solibri або деталізувати в Tekla без втрати ідентичності як стіни.

Поширення IFC є широким: практично всі основні платформи (Revit, ArchiCAD, Allplan, Tekla, Bentley) забезпечують функції імпорту/експорту, а в багатьох проєктах державного сектору доставка IFC стала контрактною вимогою. Проте практичне застосування має складнощі. Варіації у реалізаціях ПЗ означають, що хоча модель може бути обміняна, певні параметри — особливо просунуті параметричні поведінки або метадані, специфічні для дисципліни — можуть бути втрачені або неправильно інтерпретовані. Іншими словами, IFC гарантує обмін, але не завжди ідеальну точність. Тривають роботи над скороченням цих розривів. Випуск IFC 4.3, який розширює схему до інфраструктурних доменів (дороги, залізниці, мости), ілюструє прагнення зробити IFC релевантним поза окремими будівлями. Майбутні ітерації очікувано ще більше посилять інтеграцію з

цифровими двійниками та GIS-системами, підтримуючи перехід до орієнтованич на дані проєктів. Незважаючи на недосконалості, IFC залишається стратегічним інструментом забезпечення довготермінової доступності інформації. Зменшуючи прив'язку до вендорів, узгоджуючись із принципами ISO 19650 і створюючи спільну «мову» для мультидисциплінарної співпраці, IFC допомагає гарантувати, що BIM-виходи не є ізольованими артефактами, а передаваними, аудитуємими й придатними для використання протягом усього життєвого циклу активу.

Схема Industry Foundation Classes (IFC) представляє формалізовану модель даних, яка визначає, як структурована, зберігається та обмінюється інформація в проєкті будівлі або інфраструктури. Розроблена buildingSMART International і стандартизована як ISO 16739-1:2018 [137], схема забезпечує нейтральну, незалежну від вендора основу для OpenBIM-робочих процесів. Її мета — гарантувати, що дані, створені в одному ПЗ, можуть бути надійно інтерпретовані та повторно використані в іншому, зменшуючи фрагментацію в цифровому будівництві.

Схема IFC організована як об'єктно-орієнтована ієрархія, у якій сутності наслідують загальні атрибути ідентифікації, власності та метаданих. На найвищому рівні IfcProject визначає загальний контекст, далі йде просторовий розподіл у *IfcSite, IfcBuilding, IfcBuildingStorey і IfcSpace*. У цій структурі фізичні елементи — стіни, балки, плити, колони, двері, вікна — представлені спеціальними класами (наприклад, IfcWall, IfcSlab). Паралельно механічні, електричні та сантехнічні системи визначаються через IfcFlow-сутності, які фіксують сегменти потоків, кінцеві точки та мережі розподілу.

Окрім геометрії, до кожного елемента додаються набори властивостей (Psets) і кількісні показники (Qto), що дозволяє включати характеристики матеріалів, параметри продуктивності, класифікації та атрибути, пов'язані з вартістю. Взаємозв'язки між об'єктами виражаються явно через IfcRel-сутності (наприклад, *IfcRelAggregates, IfcRelConnects*), перетворюючи модель на структуровану інформаційну мережу замість набору незалежних форм.

Схема підтримує кілька геометричних представлень: профільні елементи, екструзії, boundary representation (B‑rep), constructive solid geometry (CSG) та тісловані сітки (tessellated meshes). Ця гнучкість дозволяє різним авторським інструментам обирати найбільш відповідний метод, зберігаючи інтероперабельність. Крім того, IFC пропонує кілька серіалізацій, включно зі STEP (*.ifc*), XML (*.ifcXML*) та JSON (*.ifcJSON*), що розширює його доступність як у традиційних CAD/BIM‑середовищах, так і в сучасних веб‑орієнтованих системах.

Ключова сила схеми IFC — її розширюваність. Кожна дисципліна — архітектура, конструкції, MEP або інфраструктура — може розширювати базову схему доменно‑специфічними сутностями. Останній реліз, IFC 4.3, розширює покриття до транспортної інфраструктури, включаючи мости, залізниці та дороги, що відображає напрямок галузі до інтегрованих моделей інформації про активи [138].

Формалізуючи як семантику, так і геометрію будівельних елементів, схема IFC забезпечує мультидисциплінарну співпрацю, стандартизовану передачу даних та довгострокове архівування BIM‑інформації. Вона функціонує не лише як технічна специфікація, а й як стратегічний засіб прозорого та стійкого управління інформацією протягом життєвого циклу активу.

Таблиця 4.1. Приклад структури даних IFC для IfcWall

Компонент IFC	**Опис**	**Приклад (значення/сутність)**
Ідентифікація	Унікальний GlobalId, власність та метадані (з IfcRoot)	3kJfs9HSX4v9w12mZq (GUID), Власник: Архітектор
Контекст	Просторове розташування в ієрархії проєкту	IfcBuildingStorey: Рівень 2
Геометрія	Геометричне подання (екструзія, B‑rep, CSG)	Екструзія: профіль товщиною 300 мм, висота 3 м
Типове визначення	Пов’язаний багаторазовий шаблон (IfcWallType)	ExternalWall_Type_01
Набори властивостей	Стандартні або проектні атрибути	Pset_WallCommon: FireRating=120 min; AcousticRating=45 dB
Кількості	Виміряні значення для кошторисів та аналізу	Qto_WallBaseQuantities: Довжина=5.2 м; Площа=15.6 м²; Об’єм=4.68 м³

Взаємозв'язки	Зв'язки з іншими елементами	IfcRelConnects: з'єднання Стіна-Колона
Матеріали	Призначений набір шарів матеріалів	Цегляна кладка + утеплення + штукатурний шар
Класифікація	Зовнішнє посилання на систему класифікації	Uniclass 2015 код: Ss_25_10_20_35

Абстрактну структуру даних IFC легше сприймати через спеціалізований IFC-переглядач. Такі застосунки дозволяють користувачам інспектувати не лише геометрію елементів, а й пов'язані з ними набори властивостей, кількісні показники та взаємозв'язки, наочно демонструючи реалізацію схеми в реальних проєктних моделях.

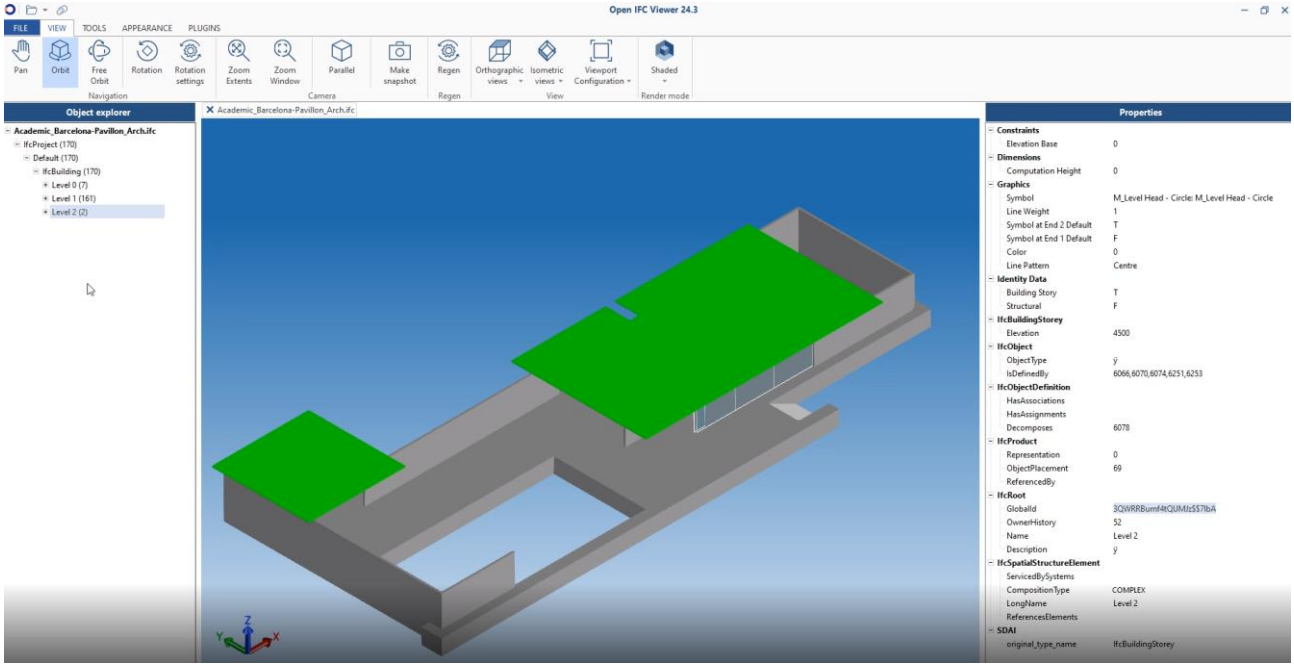


Рис. 4.1. Древо структури IFC у переглядачі IFC — джерело: https://openifcviewer.com.

4.2.2 BIM Collaboration Format (BCF)

BIM Collaboration Format (BCF) виникнув як відкритий стандарт, розроблений buildingSMART International (вперше представлений у 2009 р. компаніями Solibri та Tekla) для підтримки комунікації навколо BIM-моделей без необхідності передавати повні моделі. Якщо IFC дає повну схему для геометрії та атрибутів, то BCF зосереджений виключно на питаннях, коментарях і точках огляду, надаючи проєктним командам структурований спосіб документувати й

обмінюватися «хто, що і де» щодо координаційних проблем. Через цей механізм BCF дозволяє передавати цільову інформацію про проблеми моделі — наприклад, звіти про помилки, статуси, посилання на компоненти, дані користувача, часові мітки і навіть зміни, пов'язані з IFC-моделлю — без відправки повного файлу моделі. Це значно підвищує ефективність координації й забезпечує прозорість та відстежуваність комунікацій.

BCF-файли зазвичай містять посилання на елементи моделі (через їхні IFC-GUID), положення камери, знімки та текстові описи проблем. Наприклад, коли колізія виявлена в Solibri або Navisworks, її можна експортувати як BCF і надіслати архітектору, що працює в Revit або ArchiCAD. Після імпорту точка огляду спрямовує користувача до конкретного елемента, що дозволяє оперативно вирішити проблему [139]. Це дозволяє уникати багаторазової передачі великих IFC-моделей і забезпечує ефективний, підзвітний робочий процес.

Важливою перевагою BCF є його інтероперабельність між платформами. Сьогодні більшість провідних BIM-додатків підтримують стандарт, зокрема Revit, ArchiCAD, Tekla, Solibri, BIMcollab та Autodesk Construction Cloud. Окрім виявлення колізій, BCF став центральним елементом оглядів проєктів, перевірок моделей та процесів facility management, де відстеження й вирішення питань мають критичне значення.

У межах ISO 19650 BCF часто розглядають як практичний механізм для виконання вимог управління інформацією, оскільки він стандартизує спосіб документування й передавання питань. Відокремлюючи дані моделі (IFC) від комунікаційних даних (BCF), AEC-галузь отримала гнучкий і широко впроваджений метод міждисциплінарної координації, який органічно вписується в OpenBIM-процеси.

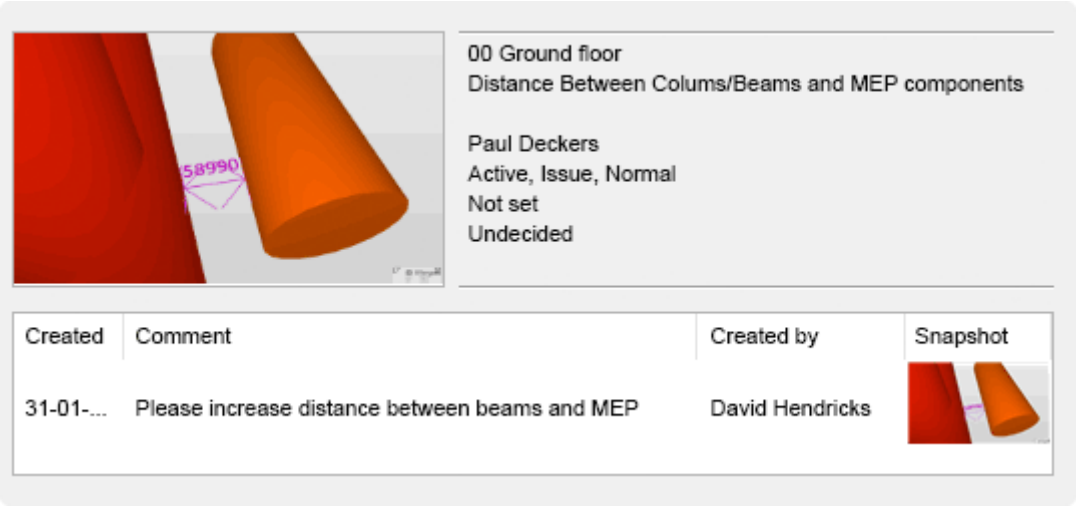


Рис. 4.2. Використання формату BCF — джерело: https:// bimcollab.com.

4.2.3 Construction Operations Building Information Exchange (COBie)

Construction Operations Building Information Exchange (COBie) це стандарт обміну даними, розроблений для підтримки передачі інформації про активи будівлі від проєктування та будівництва до експлуатації та facility-менеджменту. Походячи зі США як частина ініціативи National Institute of Building Sciences, COBie було формалізовано в контексті IFC та ISO (частково інтегроване з ISO 16739) і відтоді міжнародно визнане як ключовий механізм доставки інформації впродовж життєвого циклу.

На відміну від IFC, який дає всебічну схему для геометрії й семантики, COBie фокусується на структурованих табличних даних. Зазвичай його реалізують у вигляді електронної таблиці (часто Microsoft Excel), що дозволяє проєктним командам фіксувати необхідну інформацію про обладнання, приміщення, системи та вимоги до обслуговування без опрацювання повної 3D-геометрії. Типові аркуші COBie містять дані про структуру об’єкта, розбивку поверхів і просторів, інвентаризацію обладнання, контактну інформацію, запасні частини та заплановані роботи з технічного обслуговування.

Перевага COBie — у простоті та доступності. Оскільки його можна передати як стандартизовану таблицю, фахівці з експлуатації можуть безпосередньо використовувати ці дані в CAFM або CMMS-системах без потреби в

спеціалізованому BIM-ПЗ. Водночас багато авторських платформ (наприклад Revit, ArchiCAD або Tekla) та CDE-середовищ можуть генерувати COBie-доставки напряму, забезпечуючи безперервність даних від проєктування до експлуатації.

Однак COBie також зазнавав критики за обмежену гнучкість. Табличний формат може бути громіздким для великих і складних проєктів, а якість COBie-доставок значною мірою залежить від того, наскільки структурованими були початкові BIM-моделі. Незважаючи на це, у межах UK BIM Level 2 та кількох національних BIM-стандартів COBie залишається одним із найбільш впізнаваних підходів для надійної передачі інформації про активи під час здачі проєкту.

Таблиця 4.2. Приклад аркуша компонентів COBie

Назва	**Тип**	**Середовище**	**Система**	**Серійний номер**	**Штрих-код**	**Зовнішня система**	**Зовнішній ідентифікатор**
AHU-01	AHU_TypeA	Level 2.101	Ventilation1	SN-000123	BC-102345	FMSystem	45821
PUMP-01	Pump_TypeX	Base 0	Hydronic2	SN-000452	BC-109876	FMSystem	45822
FCU-02	FCU_TypeB	Level 3.205	HVACZone	SN-000789	BC-203145	FMSystem	45823

4.2.4 Data Sheets and Product Data Templates (PDTs)

Це доповнювальний підхід до обміну даними в BIM, що зосереджується не на всьому об’єкті, а на окремих виробах і компонентах. **Data Sheet** — це структурована таблиця, яка фіксує технічні характеристики виробу (наприклад, припливно-витяжного агрегату, насоса чи клапану), зазвичай включаючи такі дані, як розміри, матеріали, показники продуктивності, енергоспоживання або умови гарантії. У все більшому обсязі ці аркуші стандартизуються через EN ISO 23386 та EN ISO 23387, які визначають машинозчитувані шаблони, відомі як Product Data Templates (PDT). Застосовуючи PDT, виробники можуть надавати інформацію в уніфікованому цифровому форматі, що дозволяє безпосередню інтеграцію в

BIM-моделі й гарантує, що всі зацікавлені сторони працюють із верифікованими та порівнюваними даними.

Ключова відмінність між COBie та Data Sheets/PDTs полягає в їхньому масштабі та призначенні. COBie розроблено для передачі інформації про активи на рівні об'єкта, охоплюючи не лише компоненти, а й приміщення, системи, контакти та графіки технічного обслуговування. Це проєктний підхід, що зазвичай застосовується на етапі передачі від будівництва до експлуатації. Натомість Data Sheets сфокусовані на конкретних продуктах, описуючи властивості окремих виробів, які постачають виробники. Якщо COBie відповідає на питання, яку інформацію потрібно передати про весь актив, то PDT гарантує, що дані про кожен конкретний виріб структуровані, точні та інтероперабельні.

На практиці ці два підходи взаємопов'язані: PDT можуть постачати деталізовані дані про виріб, якими наповнюються поля COBie під час передачі. Наприклад, Data Sheet виробника насоса може містити стандартизовані характеристики продуктивності та гарантійні атрибути, які потім вставляються в запис «Component» у COBie.

4.2.5 Семантичні сервіси

В управлінні технічною інформацією в будівельній галузі традиційно виникають складнощі: численні зацікавлені сторони, великий обсяг документації, різні рівні деталізації й неоднозначності інтерпретацій. Системи класифікації й словники з'явилися як засоби вирішення трьох базових задач:

- уніфікація технічної мови між архітекторами, інженерами, підрядниками й замовниками;
- структурування та організація інформації (специфікації, кошториси, плани, вимоги з обслуговування);
- покращення комунікації та відстежуваності в технічній документації й системах управління.

buildingSMART Data Dictionary (bSDD) надає стандартизовані визначення й властивості для будівельних елементів, забезпечуючи однакове значення термінів

і атрибутів у різних ПЗ і національних контекстах. Аналогічно системи класифікації — Uniclass 2015, OmniClass, CoClass, Uniformat, MasterFormat — формують таксономії, що структурують елементи, вироби та процеси в узгоджені категорії, підтримуючи інтероперабельність і управління даними протягом життєвого циклу.

bSDD не є окремим програмним продуктом, а стандартизованою онлайн-послугою, яка надає міжнародно визнані набори властивостей і термінологію. Інтегрований у багато BIM-платформ, він дозволяє зв'язувати елементи моделі з послідовними визначеннями, гарантувавши, що, наприклад, «рейтинг вогнестійкості» інтерпретується й зберігається однаково незалежно від авторського ПЗ чи національного стандарту. Забезпечуючи спільну семантичну основу, bSDD підкріплює OpenBIM-інтероперабельність і підтримує відповідність ISO 23386 щодо термінологічних даних. Його роль особливо важлива у транснаціональних проєктах, де мовні й локальні відмінності інакше можуть призводити до неправильних тлумачень.

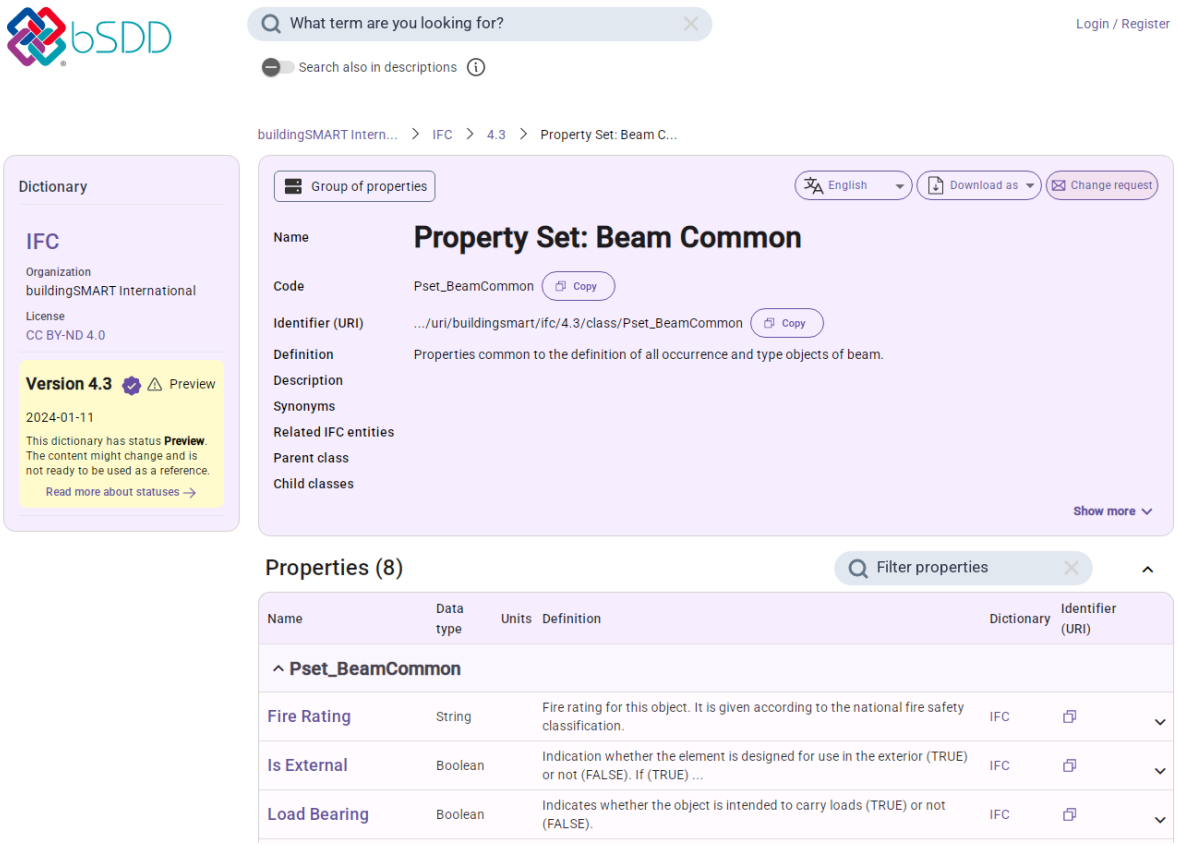


Рис. 4.3. bsDD веб- структура- джерело: https://search.bsdd.buildingsmart.org/

Uniclass 2015 — сучасна система класифікації, широко застосована у Великій Британії та дедалі більше — поза її межами. Вона структурує середовище будівництва у вигляді ієрархічних таблиць, що охоплюють елементи, системи, товари та види діяльності, дозволяючи послідовно категоризувати BIM-об'єкти. Використання кодів Uniclass у моделі допомагає забезпечити єдину класифікацію елементів, що полегшує підрахунок кількостей, планування витрат і управління активами. На відміну від ПЗ для валідації даних, Uniclass функціонує як каркас для організації інформації, забезпечуючи стандартизацію в масштабі. Інтеграція з CDE та інструментами перевірки моделей зробила її центральним елементом багатьох національних BIM-ініціатив.

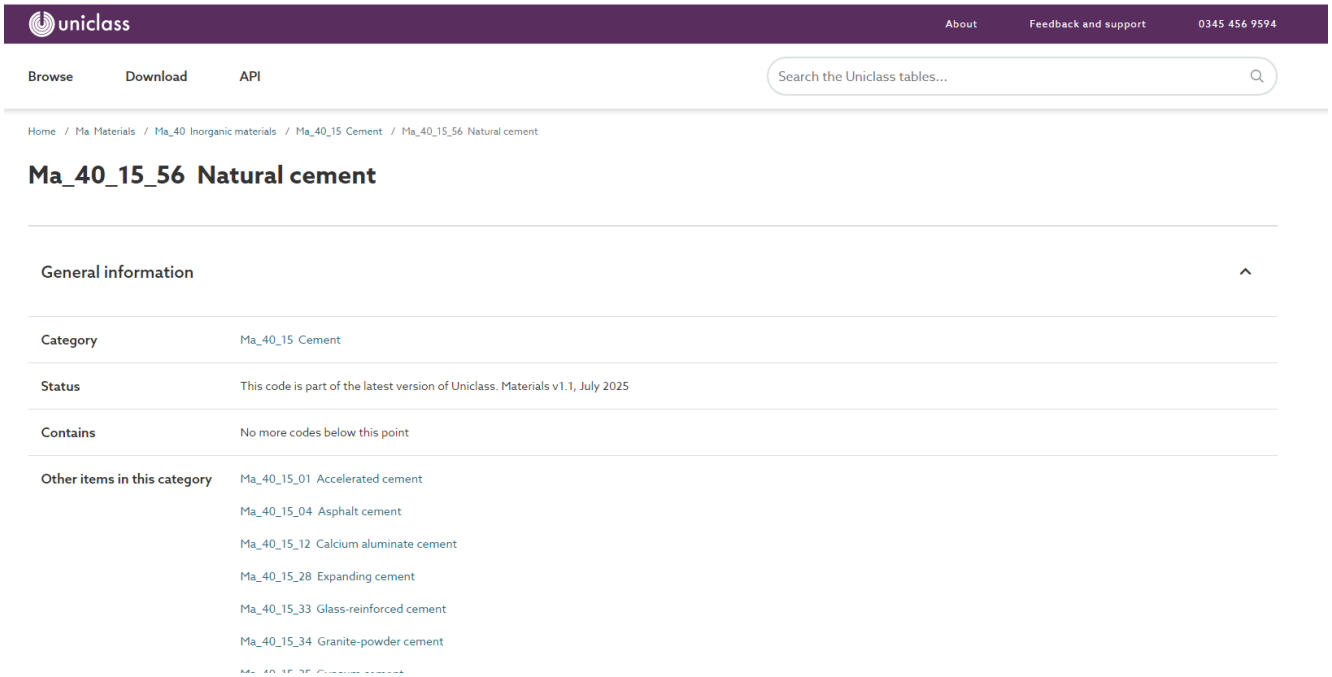


Рис. 4.4. UniClass класифікація- джерело: https://uniclass.thenbs.com/

OmniClass — класифікаційна структура, розроблена переважно для Північної Америки, призначена для організації всіх аспектів побудованого середовища — від конструктивних елементів і виробів до процесів і фаз. Вона складається з п'ятнадцяти взаємопов'язаних таблиць, кожна з яких охоплює певну доменну область (наприклад, результати робіт, матеріали). У BIM-робочих

процесах коди OmniClass часто застосовують до елементів моделі для підтримки кошторизування, експлуатаційного менеджменту та обміну даними з зовнішніми базами. Широта охоплення є її перевагою, роблячи систему придатною не лише для проєктування, а й для закупівель і операцій життєвого циклу. Водночас складність підтримки п'ятнадцяти таблиць може ускладнювати впровадження, тому на практиці OmniClass часто застосовують вибірково залежно від вимог проєкту.

CoClass, розроблена у Швеції в рамках національної цифрової стратегії для будівництва, представляє нове покоління класифікацій, повністю узгоджених з міжнародними стандартами, такими як ISO 12006‑3 і IFC. На відміну від ранніх систем, CoClass із самого початку розроблялася для цифрових робочих процесів, надаючи машинозчитувані коди й атрибути, які можна безпосередньо вбудовувати в BIM‑моделі. Її охоплення виходить за межі будівель і включає інфраструктурні активи, забезпечуючи послідовну термінологію для всього побудованого середовища. CoClass також пов'язує класифікації з наборами властивостей, що посилює її роль у моделюванні інформації про активи та довгостроковому управлінні об'єктами. Хоча впровадження поки що найсильніше в Скандінавії, CoClass дедалі частіше визнається міжнародно як зразок того, як класифікація може підтримувати OpenBIM і міжплатформену інтероперабельність.

4.3 Методології та специфікації для обміну інформацією

4.3.1. Information Delivery Manual (IDM)

The Information Delivery Manual (IDM) — методологічна рамка, розроблена в межах ініціативи buildingSMART для визначення, хто, яку, коли і з якою метою інформацію доставляє в BIM‑процесі. Її походження пов'язане з потребою в структурованому описі обмінів інформацією між фазами проєкту, щоб вимоги до даних були явними, послідовними та узгодженими із завданнями кожного учасника [140].

На відміну від форматів даних (IFC, COBie), які визначають, як інформація представлена, IDM розглядає процесну складову інтероперабельності. Він ідентифікує зацікавлених осіб, їхні обов'язки та інформацію, якою вони повинні

обмінюватися на конкретних етапах. Це робить IDM критично важливим інструментом для поєднання бізнес-процесів із технічними схемами даних [141].

Типовий IDM містить:

- карти процесів — послідовність діяльностей і відповідальностей, часто візуалізовані у вигляді діаграм, подібних до BPMN;
- вимоги до обміну — що саме потрібно, ким і в якій формі;
- функціональні блоки — розчленування обмінів на багаторазово використовувані компоненти, застосовні в різних проєктах чи доменах [142].

Через таку структуру IDM сприяє визначенню Model View Definitions (MVD) — відфільтрованих підмножин IFC, налаштованих під конкретні задачі (наприклад, енергетичний аналіз або кошторис). Останнім часом принципи IDM лягли в основу Information Delivery Specification (IDS) — машинозчитуваного підходу до формалізації вимог до інформації [143].

Впровадження IDM дає кілька переваг: підвищує прозорість комунікації, знижує ризик відсутніх чи неоднозначних даних і узгоджує BIM-процеси з контрактними та нормативними вимогами. Водночас його реалізація може вимагати значних ресурсів, оскільки потребує ретельного моделювання процесів і тісної співпраці технічних та управлінських учасників [144].

IDM зазвичай розробляють із використанням Business Process Model and Notation (BPMN). buildingSMART надає шаблони для полегшення їх створення та забезпечення послідовності між проєктами. У ланцюзі вартості зацікавлені сторони покладаються на IDM для чіткого вираження своїх інформаційних потреб, які часто формулюються через питання [138]:

- Хто залучений і які їхні обов’язки?
- Яка інформація потрібна з моделі?
- Які додаткові входи необхідні?
- Що повинен доставити постачальник і що очікує отримувач?

Результатом є документ, що містить карту взаємодій або транзакцій, діаграму процесу та набір Exchange Information Requirements (EIR). Карта взаємодій визначає ролі та потоки транзакцій між ними, а діаграма процесу ілюструє

хронологічний порядок дій. Згідно з ISO 29481‑1, кожен компонент IDM — чи то карта взаємодій, діаграма процесу або EIR — має містити адміністративні метадані (заголовну інформацію) та стисений опис змісту, обсягу, цілей і призначення.

Таким чином, IDM визначає обсяг і тип інформації, яку певні ролі проєкту повинні надавати або споживати в конкретні моменти процесу. Добре сформульований IDM є необхідним для гарантії того, що передані дані структуровані так, щоб приймаюче програмне забезпечення могло їх коректно інтерпретувати.

ISO 29481-2 [145] розширює цей підхід, виокремлюючи IDM‑«зони», що відрізняють вимоги користувача від технічної реалізації. В екосистемі стандартів ISO і buildingSMART IDM відіграє ключову роль у трансляції визначених процесів в основу для створення MVD або IDS, часто використовуючи ресурси на кшталт buildingSMART Data Dictionary (bSDD) для забезпечення семантичної узгодженості. Наприклад, у Німеччині процедура створення IDM формалізована у VDI 2552 Частина 4 і включає такі кроки:

- ідентифікація ролей і відповідальностей,
- визначення повторюваних процесів і завдань,
- визначення необхідної інформації,
- конкретизація інформації для обміну,
- відображення цієї інформації в моделі даних,
- розробка відповідної Model View Definition (MVD).

4.3.2. Model View Definitions (MVDs)

While the Information Delivery Manual (IDM) описує, хто, яку і коли інформацію доставляє, практична реалізація цих вимог у цифрових робочих процесах покладається на Model View Definitions (MVD). MVD можна розглядати як відфільтроване підмножина схеми IFC, адаптоване під конкретне використання — обмін архітектурними моделями, структурний аналіз, енергетичне моделювання або передача для експлуатації.

IFC є широкою схемою, що охоплює багато доменів і типів інформації. Однак не кожному проєкту чи дисципліні потрібна вся схема. Тому MVD обмежує IFC до керованого обсягу, вказуючи, які сутності, властивості та зв'язки мають бути включені для виконання конкретної вимоги обміну (ISO 16739-1:2018 [146]). Таким чином MVD слугують мостом між процесними картами IDM і технічною реалізацією обміну даними в ПЗ.

Приклади MVD: Coordination View — для обміну між дисциплінами з метою виявлення колізій; Design Transfer View — для збереження параметричного задуму під час передачі моделі між моделювальними платформами. Також існують спеціалізовані MVD для енергетичного аналізу, структурного моделювання тощо, що гарантують обмін лише релевантною геометрією та властивостями [147].

MVD відіграли ключову роль у сертифікації ПЗ. buildingSMART використовує MVD для перевірки правильності імпорту/експорту IFC під визначені цілі, що гарантує надійний обмін без семантичних втрат. Водночас множинність MVD може спричиняти фрагментацію, через що з'явилися гнучкіші підходи — наприклад, Information Delivery Specification (IDS), що пропонує машинозчитуваний спосіб визначення вимог обміну [148].

Процеси та вимоги з IDM трансформуються в точні машинозчитувані вимоги через MVD. MVD визначає, які класи, атрибути й набори властивостей потрібні для певного сценарію. Обсяг MVD може бути дуже широким (наприклад, архівування повного проєкту) або вузьким (наприклад, оцінка вартості фасадної системи). MVD надають структуровані вказівки для інтерпретації IFC, їхніх зв'язків і наборів властивостей, визначаючи що саме і як слід передавати. Зазвичай MVD документуються у машинозчитуваному форматі mvdXML, що дозволяє стандартизувати й повторювати обміни між проєктами й платформами.

Оскільки MVD вимагають специфічної реалізації в ПЗ, зацікавленим сторонам радять використовувати офіційно опубліковані MVD, а не розробляти власні. Тому Exchange Information Requirements (EIR) і BIM Execution Plans (BEP) зазвичай вказують, які MVD та налаштування передачі мають застосовуватися.

Найпоширеніші MVD:

- **IFC2x3 Coordination View CV2.0** — визначає просторові та фізичні компоненти для мультидисциплінарної координації (архітектура, конструкції, MEP, передача в експлуатацію).
- **IFC4 Reference View (RV)** — спрощене геометричне й відносинне представлення для узгодженого посилання моделей між дисциплінами.
- **IFC4 Design Transfer View (DTV)** — підтримує просунуту геометрію й відносинні деталі для точної передачі моделей між авторськими інструментами; передбачає односпрямований обмін із перенесенням відповідальності.

У поєднанні з іншими стандартами ISO і buildingSMART, MVD дозволяють реалізувати процеси, визначені в IDM, використовуючи цільові підмножини IFC, доповнені ресурсами на зразок buildingSMART Data Dictionary (bSDD) для гарантування семантичної узгодженості.

Підсумок: MVD втілюють принципи IDM, перетворюючи процесні вимоги на конкретні підмножини IFC, і сприяють цілеспрямованому, призначеному для використання обміну BIM-даними між дисциплінами.

4.3.3. Information Delivery Specification (IDS)

The Information Delivery Specification (IDS) — найновіша ініціатива buildingSMART, спрямована на надання машинозчитуваного способу визначення інформаційних вимог у BIM-процесах. Якщо Information Delivery Manual (IDM) окреслює, *хто, яку і коли інформацію доставляє*, а Model View Definitions (MVD) трансформують ці вимоги у підмножини схеми IFC, то IDS пропонує гнучкий цифровий механізм для забезпечення відповідності моделей проєктно-специфічним потребам [148].

Документ IDS описує властивості, класифікації або геометрію, які мають бути присутніми в BIM-об’єктах, а також правила щодо їх повноти й коректності. Наприклад, IDS може вимагати, щоб кожен об’єкт двері мав атрибути FireRating або AcousticRating, або щоб усі блоки ОВК мали посилання на виробника. Ці вимоги можна перевіряти автоматично під час моделювання або на визначених етапах проєкту, гарантуючи придатність даних перед їхнім обміном [149].

У порівнянні з традиційними підходами IDM/MVD, IDS:

- машинозчитуваний, що дозволяє автоматичну валідацію моделей за допомогою програмних засобів;
- більш гнучкий, оскільки не прив'язаний до попередньо визначених "виглядів" IFC, а дозволяє виражати вимоги безпосередньо.

Це наближає IDS до практики: він дає змогу проєктним командам або замовникам формалізувати свої Exchange Information Requirements (EIR) у структурованому та тестованому вигляді. Очікується, що впровадження IDS суттєво знизить ризики неправильного тлумачення вимог і посилить відповідність принципам ISO 19650, які наголошують на «правильній інформації, у потрібний час, потрібним людям». Його застосування зростає, особливо там, де клієнти та публічні органи вимагають надійної інформації про активи під час передачі.

IDS — це машинорозпізнаваний формат для визначення вимог обміну з акцентом на альфа-нумеричні дані. На відміну від MVD, що здебільшого використовуються для забезпечення коректної обробки класів, геометрії та просторових структур у ПЗ, IDS фокусується на те, які неграфічні властивості мають бути прив'язані до яких об'єктів з якими значеннями або одиницями. Таким чином IDS особливо придатний для формалізації рівня інформації (LOI) у проєкті.

Традиційно вимоги LOI передавалися через таблиці або PDF, що обмежувало їхню інтеграцію в автоматизовані робочі процеси. IDS заповнює цю прогалину, пропонуючи стандартизований машинозчитуваний формат (XML), що дозволяє застосовувати вимоги безпосередньо в цифрових процесах. IDS може використовуватися в двох основних контекстах:

- як конфігураційний файл для інструментів моделювання, що дозволяє автоматично створювати потрібну структуру властивостей у моделях;
- як конфігураційний файл для інструментів перевірки, що дає змогу автоматичну валідацію відповідності через попередньо визначені правила.

Такий підхід замкнює цикл між визначенням інформаційних вимог та їхньою перевіркою в процесі контролю моделі.

Ще одна ключова перевага IDS — можливість формулювати умовні правила. Замість загальних вимог на рівні класів (наприклад, «всі IfcWall мають мати fire rating») IDS дозволяє більш тонкі формулювання: наприклад, властивість ConcreteGrade потрібна лише якщо матеріал елемента — бетон, або рейтинг вогнестійкості стіни має починатися з «R» (наприклад, REI90), якщо стіна визначена як несуча. Така селективна фільтрація підвищує точність і контекстну релевантність вимог.

Технічно IDS — це стандарт на основі XML зі схемою, розробленою buildingSMART. Його відкрита і проста структура дозволяє однозначно інтерпретувати вимоги як людям, так і програмам. У поєднанні з додатковими стандартами (наприклад, buildingSMART Data Dictionary — bSDD та Use Case Management — UCM) IDS допомагає забезпечити чіткість, послідовність і застосовність інформаційних вимог у BIM-процесі.

Таблиця 4.3. Ключові відмінності між методологіями

Аспект	**IDM (Information Delivery Manual)**	**MVD (Model View Definition)**	**IDS (Information Delivery Specification)**
Охоплення	Процесна рамка на рівні життєвого циклу проєкту	Підмножина схеми IFC, адаптована під конкретну вимогу обміну	Машинозчитувана специфікація вимог до даних
Мета	Визначити, хто, яку інформацію, коли і з якою метою постачає	Транслювати вимоги IDM у технічні підмножини IFC	Забезпечити наявність у моделях потрібних властивостей, класифікацій і геометрії
Як працює	Створює карти процесів і вимоги обміну; пов'язує бізнес-потреби з технічними даними	Фільтрує сутності, властивості та зв'язки IFC для задоволення конкретних сценаріїв	Формалізує правила (наприклад, обов'язковість FireRating для всіх дверей) і дозволяє автоматизовану перевірку
Типові випадки використання	Високорівневе картографування процесів, визначення Exchange Information Requirements (EIR), узгодження стейкхолдерів	Coordination View, Design Transfer View, обміни для структурного чи енергетичного моделювання	Перевірка відповідності EIR, автоматизована валідація моделі, контроль якості на боці замовника

4.3.4. Сертифікація програмного забезпечення

Стандарт IFC наразі підтримується всіма провідними BIM-платформами. Щоб забезпечити надійний обмін даними, buildingSMART International надає програму сертифікації, яка перевіряє, чи застосунки коректно реалізують IFC. До нещодавнього часу сертифікація базувалася на Model View Definitions (MVD) — технічних підмножинах схеми IFC, призначених для конкретних сценаріїв використання. Вендори можуть звертатися за цією платною послугою, що гарантує здатність ПЗ експортувати та імпортувати дані IFC згідно з офіційно визначеними MVD [150].

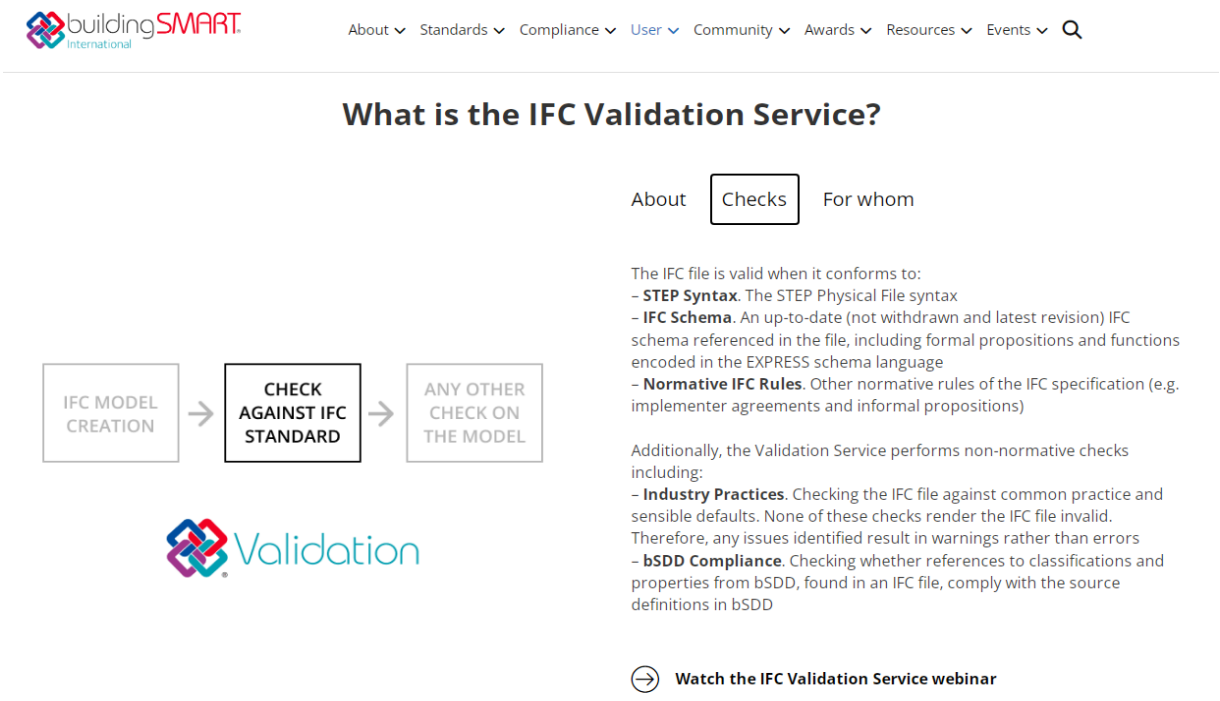


Рис. 4.5. Веб-платформа сервісу валідації —

https://www.buildingsmart.org/users/services/validation-service/

Окрім сертифікації, buildingSMART запровадила Validation Service — публічно доступний онлайн-інструмент для тестування IFC-файлів. Через цю платформу користувачі можуть завантажувати моделі й перевіряти їхню відповідність специфікації IFC. Сервіс переважно перевіряє:

- відповідність обраній схемі IFC (наприклад, IFC4);
- синтаксичну коректність STEP-файлу;

- відповідність правилам схеми (наприклад, полілінія не повинна містити дублікатів точок).

За наявності, Validation Service також може тестувати відповідність класифікаціям, посилання на які містяться в buildingSMART Data Dictionary (bSDD). Проте сервіс не оцінює, чи файл містить повний набір вимаганих властивостей, і не може валідувати моделі за вимогами IDS. Його обсяг обмежений технічною валідацією, а не перевіркою змісту.

Для розробників ПЗ Validation Service дає можливість перевірити якість реалізації IFC (зараз обмежено експортованими файлами). Для кінцевих користувачів сервіс дозволяє швидко оцінити цілісність IFC-файлів, отриманих від партнерів. Покращуючи технічну якість IFC-моделей, служба сприяє підвищенню інтероперабельності між різними BIM-застосунками.

У перспективі Validation Service може стати частиною офіційного сертифікаційного процесу. Наразі сервіс доступний у бета-версії і може використовуватися будь-ким із безкоштовним обліковим записом buildingSMART.

ГЛОСАРІЙ

Actuator— виконавчий механізм; пристрій, що виконує фізичну дію за сигналом (наприклад, клапан, заслінка).

AI (Artificial Intelligence) — штучний інтелект; технології для обробки даних, виявлення закономірностей, прийняття рішень і оптимізації в BIM‑середовищі (валідація, прогнозна аналітика).

Alphanumeric Information — алфанумерична інформація; структуровані неграфічні дані, прикріплені до елементів моделі (наприклад, показники продуктивності, вартість, гарантійні дані).

Application Programming Interface (API) — програмний інтерфейс; набір протоколів для обміну даними між ПЗ, критичний для інтеграції сенсорних даних з BIM‑платформами.

Asset Information Model (AIM) — модель інформації про актив; валідуваний набір даних, отриманий з PIM, що використовується для експлуатації та технічного обслуговування протягом життєвого циклу.

Audit Trail — журнал аудиту; цифровий запис дій користувачів у системі для відстеження змін і відповідальності.

Augmented Reality (AR) — доповнена реальність; технологія накладання цифрової інформації на фізичне середовище для підтримки рішень у реальному часі.

BACnet (Building Automation and Control Network) — стандартний протокол для автоматизації будівель і взаємодії пристроїв від різних виробників.

BCF (BIM Collaboration Format) — відкритий протокол (XML/JSON) для обміну питаннями, коментарями та точками огляду, пов’язаними з моделлю, без передачі геометрії; пов’язує звіти про проблеми з елементами через IFC GUID.

Big BIM Data — підхід, що використовує великі обсяги даних зі SCADA та IoT для аналітики й оптимізації в BIM‑платформах.

Big Data — великі дані; обсяги даних великої кількості, швидкості й різноманітності, що потребують просунутих методів обробки.

BIM (Building Information Modelling)- інформаційне моделювання будівель; колаборативний процес, що використовує структуровану цифрову інформацію для підтримки планування, проєктування, будівництва та експлуатації будівель і інфраструктури протягом усього життєвого циклу..

BIM Coordinator — BIM-координатор; фасилітатор на рівні проєкту: забезпечує узгоджене впровадження BIM-стандартів, координацію моделей, перевірку колізій і контроль якості моделі.

BIM Data — BIM-дані; інформація, вбудована або зв'язана з цифровими моделями, що описує фізичні, функціональні, часові та вартісні характеристики активів.

BIM Dimensions — виміри BIM; розширення традиційної 3D-моделі за рахунок додаткової інформації про проєкт (від 3D до 10D).

BIM Execution Plan (BEP/BXP) — план виконання BIM; детальний документ про реалізацію BIM на проєкті: ролі, інструменти, методи співпраці, контроль якості, що розвивається від етапу до етапу.

BIM Manager — BIM-менеджер; стратегічний лідер впровадження BIM в організації: розробка стратегії, стандарти, координація інтеграції моделей, управління змінами.

BIM Maturity Levels— рівні зрілості BIM; шкала, що описує ступінь співпраці та стандартизації в BIM-процесах (від рівня 0 — без співпраці — до рівня 3 — повністю інтегрований, інтероперабельний BIM).

BIM Specialist (BIM Author, BIM Modeler) — BIM-спеціаліст; технічний експерт, що створює й підтримує деталізовані 3D-BIM-моделі з технічними даними в межах дисципліни.

BIM Total Coordinator — загальний координатор BIM; відповідає за інтеграцію всіх дисциплінарних моделей у федеративну модель і процес випуску моделей у планувальних циклах.

BMS (Building Management System) — система управління будівлею; автоматизація й моніторинг сервісів будівлі (ОВК, освітлення, пожежна безпека,

енергоспоживання). Інтеграція BIM–BMS дає оперативну інформацію для експлуатації.

bSDD (buildingSMART Data Dictionary) — словник даних buildingSMART; глобальна багатомовна онтологія для послідовного визначення термінів, властивостей і класифікацій у BIM.

CAFM (Computer-Aided Facility Management) — системи автоматизованого управління об’єктами; ПЗ для управління будівлями та активами, часто інтегроване з BIM.

CDW (Construction and Demolition Waste) — відходи будівництва та знесення.

City Information Model (CIM) — модель інформації міста; масштабне розширення BIM для міського планування й управління інфраструктурою.

Cloud-Based BIM— хмарний BIM; BIM‑рішення, що розміщені в хмарі й забезпечують спільну роботу в реальному часі, віддалений доступ, автоматичну синхронізацію та масштабоване зберігання даних.

Cloud-Based Platforms — хмарні платформи; віддалені сервери для зберігання, обробки й аналітики даних BMS/BIM.

CMMS (Computerized Maintenance Management System) — комп’ютеризована система управління техобслуговуванням; керує плануванням, виконанням і документацією обслуговування.

COBie (Construction Operations Building Information Exchange) — схема обміну даними (таблична/XML) для структуризації даних про активи й техобслуговування для передачі в експлуатацію.

Common Data Environment (CDE) — спільне цифрове середовище; централізований простір для зберігання й управління всіма даними, документами й моделями проєкту.

Connected Workflows — пов’язані робочі процеси; цифрово зв’язані процеси, що забезпечують безперервність даних, зменшення переробок і кращу координацію між дисциплінами.

Controller (DDC - Direct Digital Controller) — контролер; програмований блок у BMS для обробки сигналів від сенсорів і керування виконавчими механізмами.

CPMS (Capital Planning and Management System) — система планування капітальних витрат; інструмент для прогнозування витрат, ризиків і розподілу ресурсів у довгострокових інфраструктурних інвестиціях.

Cyber-physical Integration — кіберфізична інтеграція; поєднання фізичної інфраструктури з цифровими системами і IoT для моніторингу й адаптивного керування.

Cyber-Physical System — кіберфізична система; тісно інтегровані обчислення, мережі та фізичні процеси.

Cybersecurity in BIM — кібербезпека в BIM; практики й технології для захисту BIM-даних і систем від несанкціонованого доступу й маніпуляцій.

Data Interoperability — інтероперабельність даних; здатність систем обмінюватися, інтерпретувати та використовувати дані між інструментами, форматами і стадіями.

Data Synchronization — синхронізація даних; автоматичне оновлення й узгодження даних між системами для забезпечення консистентності.

Deconstruction Information Model (DIM) — модель інформації для демонтажу; містить дані для EoL: розбору, відновлення матеріалів або утилізації, сприяючи циркулярній економіці.

Design for Disassembly (DfD) — проєктування для розбирання; підхід, що полегшує демонтаж компонентів для повторного використання чи переробки..

Digital Twin — цифровий двійник; динамічна цифрова копія фізичного активу, що оновлюється даними від сенсорів і систем для моніторингу, симуляцій і прогнозного обслуговування.

Dynamic Digital Twin — динамічний цифровий двійник; цифрова модель, що безперервно оновлюється реальними даними для адаптивного управління.

Employer's Information Requirements (EIR) — вимоги замовника; документ, що встановлює потреби в даних, формати, очікування доставки та BIM-цілі.

Environmental Twin — екологічний двійник; цифрова модель, що моделює впливи на довкілля і підтримує стратегії сталості.

EoL (End-of-Life) — кінець життєвого циклу; фінальна фаза активу — демонтаж, утилізація або повторне використання.

Exchange Information Requirements (EIR) — вимоги до обміну інформацією; підмножина EIR, що конкретизує, яку інформацію, кому, коли і в якому форматі потрібно передати.

Facility Management (FM) — експлуатація та обслуговування об'єктів; координація простору, людей і процесів, підсилена BIM-технологіями.

Federated Model — федеративна модель; агрегат кількох дисциплінарних BIM-моделей (архітектура, конструкції, MEP), пов'язаних, але не об'єднаних, що зберігає деталі різних дисциплін.

Field Level (BMS) — польовий рівень; нижній рівень архітектури BMS, що включає сенсори й виконавчі пристрої.

GIS (Geographic Information Systems)— геоінформаційні системи; системи для збору, аналізу і керування просторовими даними; інтеграція GIS і BIM дозволяє багатомасштабне планування й координацію інфраструктури.

Graphical Data — графічні дані; візуальні елементи моделі (лінії, форми, геометрії) для візуалізації й координації, які можуть не містити метаданих.

Graphical Representation — графічне подання; візуальне моделювання елементів у BIM-середовищі для просторової координації, виявлення колізій і візуалізації.

GUI (Graphical User Interface) — графічний інтерфейс; візуальна складова BMS для моніторингу й керування.

Human-Machine Interface (HMI) — інтерфейс людина-машина; графічний інтерфейс для операторів SCADA/BMS.

IDM (Information Delivery Manual) — посібник з доставки інформації; стандартизована методологія (ISO 29481) для визначення, хто, яку інформацію, коли і навіщо обмінює під час життєвого циклу проєкту.

IDS (Information Delivery Specification) — специфікація доставки інформації; машинозчитуваний опис даних, що мають бути в моделі або передані; дозволяє автоматичну валідацію відповідно до проєктних вимог.

IFC (Industry Foundation Classes) — відкрита, нейтральна до вендора схема даних (ISO 16739) для опису інформації про будівлі та інфраструктуру протягом життєвого циклу.

Interoperability — інтероперабельність; здатність різних систем ефективно працювати разом і обмінюватися інформацією (підтримка відкритих стандартів, наприклад IFC).

IoT (Internet of Things) — Інтернет речей; мережа фізичних пристроїв (сенсорів, виконавчих механізмів тощо), що збирають і передають дані для моніторингу, автоматизації й оптимізації.

IPD (Integrated Project Delivery) — інтегрована доставка проєкту; колаборативний підхід, що об’єднує людей, системи й практики для оптимізації результатів проєкту.

ISO 19650 — міжнародний стандарт з управління інформацією в BIM; встановлює структурований підхід впродовж життєвого циклу активу з акцентом на LOIN та колаборативні робочі процеси..

JOC (Job Order Contracting) — форма закупівлі будівельних робіт з попередньо визначеними завданнями й довгостроковими контрактами

LCA (Life Cycle Assessment)— оцінка життєвого циклу; аналіз впливу продукту чи системи на довкілля протягом її життєвого циклу.

Level of Detail — рівень деталізації; стосується виключно візуальної складності елементів моделі (реалістичність), без оцінки якості даних..

Level of Development (LOD)— рівень розробки; рамка, що визначає надійність, детальність і придатність елементів моделі на різних етапах проєкту, включаючи графічне подання та вкладені дані (LOD 100–LOD 500).

Level of Information Need (LOIN) — рівень інформаційної потреби; стандартизований концепт (ISO 19650), що визначає мінімальний обсяг інформації для BIM-елемента залежно від призначення й контексту.

Level of Model Definition (LoMD) — рівень визначеності моделі; комбіноване вимірювання LOD і LOI, що вказує, наскільки повною має бути модель у певний момент.

Management Level (BMS) — рівень управління; верхній рівень BMS з візуалізацією, звітністю та інструментами прийняття рішень.

Master Information Delivery Plan (MIDP) — головний план доставки інформації; графік, який визначає коли інформація розробляється і передається, хто відповідає та в якому форматі.

Material Passport — паспорт матеріалу; структурований цифровий документ з характеристиками будівельних матеріалів для сприяння повторному використанню та циркулярності.

Modbus — протокол комунікації в автоматизації для взаємодії пристроїв, широко застосовується в промислових і енергетичних системах.

Model Governance — управління моделлю; політики та процедури щодо керування цифровими моделями (права доступу, версіювання, погодження, безпека даних).

MVD (Model View Definition) — визначення вигляду моделі; підмножина схеми IFC, що вказує, які дані й зв’язки мають передаватися для конкретного випадку використання.

Non-Graphical Data — неграфічні дані; описові атрибути елементів моделі (матеріали, теплотехнічні показники, частота обслуговування).

Ontology (in BIM context) — онтологія; структурований словник і набір відносин між елементами даних для забезпечення послідовності й інтероперабельності.

Open Storage — відкрите сховище; семантично структурований репозиторій згідно з галузевими стандартами (наприклад, ISO 16739)

Operation and Maintenance (O&M) Phase — фаза експлуатації та обслуговування; найбільш тривалий етап життєвого циклу, що може становити до 85% загальних витрат.

Operational Twin — оперативний двійник; DT, орієнтований на реальне оперативне управління й оптимізацію ресурсів.

Organizational Information Requirements (OIR) — організаційні вимоги до інформації; стратегічні, довготривалі потреби організації, що задають політику управління інформацією.

PDTs (Product Data Templates) — шаблони даних виробу; стандартизовані цифрові шаблони, що визначають властивості для опису продуктів будівництва в уніфікованому форматі.

PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) — ієрархічна модель архітектури SCADA від рівня польових пристроїв до підприємницьких систем.

Performance Twin — двійник продуктивності; DT для постійного моніторингу й прогнозного обслуговування активів.

Process Digital Twin — процесний двійник; моделює робочі процеси (наприклад, ланцюги поставок) для оптимізації у реальному часі.

Product Digital Twin — продукт‑двійник; модель окремого компоненту для тестування й оптимізації.

Programmable Logic Controller (PLC) — програмований логічний контролер; промисловий комп’ютер для керування процесами (частина SCADA/BMS).

Project Information Model (PIM) — модель інформації про проєкт; модель, що розробляється під час проєктування і будівництва, містить графічні й неграфічні дані для доставки проєкту.

Project Information Requirements (PIR) — вимоги проєкту до інформації; проект‑специфічні потреби, похідні від OIR, що визначають створення PIM.

Real-Time Bi-Directional Data Exchange — двосторонній обмін даними в реальному часі; характерний для цифрових двійників, коли дані безперервно циркулюють між фізичним об’єктом і його цифровою копією.

Real-Time Collaboration — співпраця в реальному часі; можливість одночасного перегляду, редагування і коментування спільної моделі користувачами в різних локаціях.

Remote Terminal Unit (RTU) — віддалений термінальний пристрій; мікропроцесорний пристрій для передачі телеметрії в SCADA.

Role-Based Access Control (RBAC) — контроль доступу за ролями; обмеження доступу чи прав редагування залежно від ролі користувача.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — система диспетчерського контролю й збору даних для віддаленого моніторингу і керування інфраструктурою; часто інтегрується з BIM для централізованої візуалізації.

Schema-on-Read — схема при читанні; підхід, коли дані зберігаються у «сирому» вигляді, а структура застосовується під час використання.

Schema-on-Write — схема при записі; підхід, коли дані мають відповідати визначеній структурі до збереження (наприклад, IFC-об'єкти з параметрами).

Semantic Framework — семантична рамка; структурований словник і відносини між даними для послідовної інтерпретації.

Sensor — сенсор; пристрій, що виявляє параметри навколишнього середовища (температура, CO_2 тощо) і передає дані в BMS.

Specialist Planning Level Coordinator — координатор дисципліни; BIM-координатор, що фокусується на конкретній дисципліні (конструкції, архітектура, MEP), відповідає за своєчасну та якісну доставку дисциплінарного BIM-вмісту.

Structured Data — структуровані дані; організована інформація за визначеними схемами (легко запитувати та використовувати у цифрових процесах).

System Digital Twin — системний двійник; поєднує product і process twins для моделювання складних взаємодій системи або об'єкта.

Task Information Delivery Plan (TIDP) — план доставки інформації за завданням; детальний план у рамках MIDP із відповідальностями, змістом і строками для конкретних робочих результатів.

Unstructured Data — неструктуровані дані; інформація без фіксованої структури (зображення, скани, листи), що потребує інтерпретації або обробки.

VDC Manager (Virtual Design and Construction Manager) — менеджер віртуального проєктування; інтегрує BIM з інструментами планування будівництва (4D, 5D) та IoT-даними для оптимізації виконання.

Version Control — контроль версій; метод управління змінами документів чи моделей із можливістю відстеження, порівняння та відкату ревізій.

Zigbee — низькопотужний бездротовий протокол для сенсорних мереж, часто застосовується в ретрофітних BMS-впровадженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Patil R. (2024) The History of BIM: Tracing the Evolution of Building Information Modeling. The Techture. Retrieved from. https://surl.li/eooxiw (відвідано 20.07.2025)
2. BuildingSMART. Доступно онлайн https://surli.cc/wjhsqk (відвідано 20.07.2025)
3. USSC. (2025) Normative regulations. Доступно онлайн https://surl.li/alsjom (відвідано 20.07.2025)
4. Nagy, J., Olah, J., Erdei, E., Mate, D. and Popp, J. (2018), "The role and impact of Industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary", Sustainability, Vol. 10 No. 10, p. 3491, https://doi.org/10.3390/su10103491.
5. Celoza, A., de Oliveira, D.P. and Leite, F. (2023), "Role of BIM contract practices in stakeholder BIM implementation on AEC projects", Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 15 No. 2, https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-9 .
6. Allied Market Research (2023). Building Information Modeling Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Component, by Deployment Mode, by Building Type, by Application, by End-User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023-2032. Доступно онлайн https://www.alliedmarketresearch.com/building-information-modeling-market (відвідано 20.05.2025)
7. Autodesk (2025). What is BIM? https://www.autodesk.com/solutions/aec/bim (відвідано 20.05.2025)
8. Arayici Y. and Aouad G., "Building Information Modeling (BIM) for Construction Lifecycle," no. October 2010, 2015.
9. ACCA software (2025): BIM Data: what are they, what are they used for and why are they so important? BibLus. Доступно онлайн https://surl.li/hfohmt (відвідано 20.05.2025)

10. PAS 1192-2:2013. Incorporating Corrigendum No. 1. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling
11. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles.
12. ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets.
13. ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 3: Operational phase of the assets.
14. ISO 19650-4:2022. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 4: Information exchange
15. ISO 19650-5:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 5: Security-minded approach to information management
16. ISO 19650-6:2025. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 6: Health and safety information.
17. Awe, M.; Malhi, A.; Budka, M.; Mavengere, N.; Dave, B. Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM. Buildings 2025, 15, 1072. https://doi.org/10.3390/buildings15071072

18. Catenda. (2025). BIM Levels. Доступно онлайн https://catenda.com/glossary/bim-levels/ (відвідано 20.05.2025)

19. ACCA Software. (2022). BIM maturity levels explained: BIM level 0, 1, 2, 3 and beyond. BibLus. https://surl.li/sagloz (відвідано 20.05.2025)

20. RIB Software. (2024). Understanding the BIM Maturity Levels: From Level 0 to 3 and Beyond. Доступно онлайн https://surli.cc/cjvtml (відвідано 20.05.2025)

21. Ershadi, M., Jefferies, M., Davis, P., & Mojtahedi, M. (2021). Implementation of Building Information Modelling in infrastructure construction projects: a study of dimensions and strategies. International Journal of Information Systems and Project Management, 9(4), 43-59. https://doi.org/10.12821/ijispm090403

22. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. John Wiley & Sons. http://dx.doi.org/10.1002/9781119287568

23. Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in construction, 18(3), 357-375. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003

24. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. Automation in Construction, 38, 109–127. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

25. ACCA Software. (2024). BIM Dimensions Explained: 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, and 10D BIM. Доступно онлайн https://biblus.accasoftware.com/en/bim-dimensions/ (відвідано 20.06.2025)

26. Hartmann, T., Gao, J., & Fischer, M. (2008). Areas of application for 3D and 4D models on construction projects. Journal of Construction Engineering and management, 134(10), 776-785. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:10(776)

27. Ye, Z., Antwi-Afari, M. F., Tezel, A., Manu, P. (2025). Building information modeling (BIM) in project management: a bibliometric and science mapping review. Engineering, Construction and Architectural Management, 32(5), 3078-3103. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2023-0355

28. Khosrowshahi, F. and Arayici, Y. (2012), "Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry", Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 19 No. 6, pp. 610-635. https://doi.org/10.1108/09699981211277531

29. Zhou, W., Whyte, J., & Sacks, R. (2012). Construction safety and digital design: A review. Automation in construction, 22, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.005

30. Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. Leadership and Management in Engineering, 11(3), 241–252. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

31. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in Construction, 114, 103179. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

32. Catenda. Glossary: Level of Development (LOD) (2025). Доступно онлайн https://surl.lt/chzjac (відвідано 20.06.2025)

33. Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., & Teferle, F. N. (2020). BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review. Sustainability, 12(7), 2670. https://doi.org/10.3390/su12072670

34. BIMForum. (2021). Level of Development (LOD) Specification. Доступно онлайн https://surl.lu/pjmwrr (відвідано 20.06.2025)

35. AIA Document E202-2008. Building Information Modeling Protocol Exhibit

36. Autodesk (n.d.). What is Level of Development (LOD) in BIM? Доступно онлайн https://surl.li/uxhcct (відвідано 20.06.2025)

37. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K. (2011) BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. John Wiley & Sons, Hoboken.

38. Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. Energy Build. 2017, 136, 110–120. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009

39. Kim, Y.-C.; Hong, W.-H.; Park, J.-W.; Cha, G.-W. An estimation framework for building information modeling (BIM)-based demolition waste by type. Waste Manag. Res. 2017, 35, 1285–1295. https://doi.org/10.1177/0734242X17736381

40. Catenda (2025) Level Of Information Need. Доступно онлайн https://catenda.com/glossary/level-of-information-need/ (відвідано 20.06.2025)

41. PLAN.ONE (n.d.) From LOD to LOIN. Доступно онлайн https://en.plan.one/blog-en/from-lod-to-loin/ (відвідано 20.06.2025)

42. Pentagon (n.d.). Demystifying Level of Information Need for Seamless BIM Project Delivery.- Доступно онлайн https://surl.li/nglczs (відвідано 20.06.2025)

43. Zima, K., & Mitera-Kiełbasa, E. (2022). Level of information need for BIM models: Australia, New Zealand and ISO 19650. Civil and Environmental Engineering Reports, 32(4). - http://dx.doi.org/10.2478/ceer-2022-0041

44. ACCA. Biblus. BIM Data: what are they, what are they used for and why are they so important? (2025) Доступно онлайн https://surl.li/lzghdr (відвідано 20.06.2025)

45. Fugas K. (2022) in BIM Corner. Доступно онлайн https://surl.li/fbvkzl (відвідано 20.06.2025)

46. Montague R. (2016) in NBS. Building Information Modelling: What information is in the model? Доступно онлайн https://surl.li/vfsqax (відвідано 20.06.2025)

47. CIMA (n.d.) Доступно онлайн https://surl.li/dztxnh (відвідано 20.06.2025)

48. Catenda. BIM – Building Information Modeling (2025) Доступно онлайн https://surl.li/svfeak (відвідано 20.06.2025)

49. Hossain, M.U.; Ng, S.T. Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. J. Clean. Prod. 2018, 205, 763–780. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.120

50. Röck, M.; Hollberg, A.; Habert, G.; Passer, A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. Build. Environ. 2018, 140, 153–161. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006

51. Densley Tingley, D.; Davison, B. Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. Build. Environ. 2012, 57, 387–395. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005

52. Lu, W.; Webster, C.; Chen, K.; Zhang, X.; Chen, X. Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 68, 587–595. http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.029

53. Cheng, J.C.P.; Ma, L.Y.H. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. Waste Manag. 2013, 33, 1539–1551. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001

54. Catenda. (2022). BIM Facility Management: the importance of BIM in asset management. Доступно онлайн https://surl.lu/nvtxyy (відвідано 20.06.2025)

55. Re Cecconi, F.; Maltese, S.; Dejaco, M.C. Leveraging BIM for digital built environment asset management. Innov. Infrastruct. Solut. 2017, 2, 14. http://doi.org/10.1007/s41062-017-0061-z

56. Marzouk, M.; Abdelkader, E.M.; Al-Gahtani, K. Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects. J. Clean. Prod. 2017, 152, 351–363. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.138

57. Idei.club (2025) Доступно онлайн https://en.idei.club/27951-bim-lifecycle.html (відвідано 20.07.2025)

58. Yeheyis, M.; Hewage, K.; Alam, M.S.; Eskicioglu, C.; Sadiq, R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. Clean Technol. Environ. Policy 2013, 15, 81–91. http://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6

59. Rangasamy, V., & Yang, J. B. (2024). The convergence of BIM, AI and IoT: Reshaping the future of prefabricated construction. Journal of Building Engineering, 84, 108606. http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606

60. Onungwa, I., Olugu-Uduma, N., & Shelden, D. R. (2021). Cloud BIM technology as a means of collaboration and project integration in smart cities. Sage Open, 11(3), 21582440211033250. https://doi.org/10.1177/21582440211033250

61. Thaarrini J. in Desapex (2024). Smart Buildings: BIM and IoT integration.- Доступно онлайн https://surli.cc/iktavz (відвідано 20.07.2025)

62. Altohami, A. B. A., Haron, N. A., Ales Alias, A. H., & Law, T. H. (2021). Investigating Approaches of Integrating BIM, IoT, and Facility Management for Renovating Existing Buildings: A Review. Sustainability, 13(7), 3930. https://doi.org/10.3390/su13073930

63. ACCA software (n.d.) Доступно онлайн https://surl.li/kpaqod (відвідано 20.07.2025)

64. Huang, Z.; Ge, J.; Zhao, K.; Shen, J. Post-evaluation of energy consumption of the green retrofit building. Energy Procedia 2019, 158, 3608–3613. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.903

65. Bhoda S.K. (2024). BIM and IoT in construction management: Technical insights and benefits Доступно онлайн https://surl.li/iivhjz (відвідано 20.07.2025)-

66. Sheenah A. (2024). On the convergence of BMS, IoT, and AV in BIM-enabled environments.-Доступно онлайн https://surl.lu/lpuxfp (відвідано 20.07.2025)

67. ScadaInfo (n.d.) SCADA in Construction Доступно онлайн https://surl.lu/eqzsob (відвідано 20.07.2025)

68. Inductive Automation. (2025). SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition Доступно онлайн https://surli.cc/ekmzes (відвідано 20.07.2025)

69. Mathezer S. in SANS (2021) Introduction to ICS Security Part 2. Доступно онлайн https://surl.li/kwghzi (відвідано 20.07.2025)

70. Awati R. and Loshin P. (2025) in TechTarget. What is SCADA (supervisory control and data acquisition)? Доступно онлайн https://surl.li/wqzedj (відвідано 20.07.2025)

71. Loggia, R., & Flamini, A. (2023). Electrical safety enhanced with BIM, SCADA and digital twin integration: A case study of a MV-LV substation. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(2), 2725-2731. http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2023.3332311

72. Flamini, A., Loggia, R., Massaccesi, A., Moscatiello, C., & Martirano, L. (2022, May). BIM and SCADA integration: the Dynamic Digital Twin. In 2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS) (pp. 1-7). IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/ICPS54075.2022.9773903

73. Upadhyay, D., & Sampalli, S. (2020). SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems: Vulnerability assessment and security recommendations. Computers & Security, 89, 101666. https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101666

74. Quinn, C., Shabestari, A. Z., Litoiu, M., & McArthur, J. J. (2022). Building Automation System Data Integration with BIM: Data Structure and Supporting Case Study. arXiv preprint arXiv:2205.05518.

75. Reginald, A. I. (2015). Integrating BIM with BMS in Energy Performance Assessment: Case Study of a University Building in UK. International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM), 4(1), 19-44. http://dx.doi.org/10.4018/IJ3DIM.2015010102

76. Gabkotech (n.d.) Building Management System (BMS) for Smart and Efficient Operations Доступно онлайн https://surl.li/fhdtdq (відвідано 20.07.2025)

77. Mujumdar, P., & Agarwal, S. (2024, June). Integrating Building Management Systems in High-Rise Structures using Building Information Modeling. In Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA, 7, 1, 277-276. https://doi.org/10.38027/ICCAUA2024IN0320

78. Holbert C. in CIN (2025) What is a Building Management System? Доступно онлайн https://surl.li/znbona (відвідано 20.07.2025)

79. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj

80. Bothwell B., Kaczmarek S.(2023). Science & Tech Spotlight: Digital Twins—Virtual Models of People and Objects. GAO-23-106453

81. Biblus (2024) Digital Twin in Asset Management: complete guide and insights Доступно онлайн https://surl.li/ktujrh (відвідано 20.07.2025)

82. Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J., & Ramos, N. M. M. (2022). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. Buildings, 12(12), 2155. https://doi.org/10.3390/buildings12122155

83. Silverskills (2024). Benefits of Cloud-Based BIM. Доступно онлайн https://surli.cc/czjeke (відвідано 20.07.2025)

84. Afsari, K., Eastman, C. M., & Shelden, D. R. (2016). Cloud-based BIM data transmission: current status and challenges. In ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction (Vol. 33, p. 1). IAARC Publications.

85. Autodesk. (2024). Cloud-Based Construction Workflows. Доступно онлайн https://surl.li/ikpkee (відвідано 20.07.2025)

86. PlanRadar. (2024). Benefits of Cloud-Based BIM. Доступно онлайн https://surl.lu/bsaras (відвідано 20.07.2025)

87. Tejjy Inc. (2023). Cloud-Based BIM: A Complete Guide. Доступно онлайн https://surli.cc/binqbj (відвідано 20.07.2025)

88. Techture (2024). Cloud-Based BIM and the Future of AEC Collaboration. Доступно онлайн https://surli.cc/mniqar (відвідано 20.07.2025)

89. Autodesk Construction Cloud (2024). Connected Construction Workflows. Доступно онлайн https://surl.li/ueivie (відвідано 20.07.2025)

90. Gadade T. in Novatr (2025). Smart Cities & BIM: How Technology is Reshaping Urban Planning. Доступно онлайн https://surl.li/fvttzf (відвідано 20.07.2025)

91. Catenda. ISO 19650 (2025) Доступно онлайн https://surli.cc/kdstpg (відвідано 20.07.2025)

92. Charef, R. (2022). The use of Building Information Modelling in the circular economy context: Several models and a new dimension of BIM (8D). Cleaner Engineering and Technology, 7, 100414. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100414

93. Autodesk (2025). AISO 19650, the Common Data Environment, and Autodesk Construction Cloud- Доступно онлайн https://surl.li/hxeiwq (відвідано 20.07.2025)

94. Catenda (2025). CDE – Common Data Environment. Доступно онлайн https://surl.lu/kifkwx (відвідано 20.07.2025)

95. Catenda (2025). BEP – BIM Execution Plan. Доступно онлайн https://surl.li/uzkjdj (відвідано 20.07.2025)

96. Charef, R. (2022, b). Supporting construction stakeholders with the circular economy: A trans-scaler framework to understand the holistic approach. Cleaner Engineering and Technology, 8, 100454. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100454

97. Patel A. (2025) in United BIM. BIM Execution Plan (BXP) – What, Why, When and How. Доступно онлайн https://surl.li/wcwrjl (відвідано 20.07.2025)
98. Biblus (2025) Exchange Information Requirements: What is an EIR in BIM? Доступно онлайн https://surl.lu/zfkedq (відвідано 20.07.2025)
99. Biblus. BIM Manager, BIM Specialist and BIM Coordinator roles and responsibilities. (2025) Доступно онлайн https://surl.li/wwbsni (відвідано 20.07.2025)
100. Verma S. (2022) in Novatr. What is BIM management? What does the career role involve? Доступно онлайн https://surl.lt/kmbyzo (відвідано 20.07.2025)
101. Tulke, J., Schumann, R. (2018). BIM Manager. In: Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (eds) Building Information Modeling. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_16
102. BimCollab (2024) Доступно онлайн https://surl.li/jfxsft (відвідано 20.07.2025)
103. Biblus. What's a BIM Coordinator: all you need to know about roles, what they do and how to qualify to become one. (2024) Доступно онлайн https://surl.li/ugygii (відвідано 20.07.2025)
104. Petraus B. (2021) in Open Project. The BIM roles and organizational structure Доступно онлайн https://surl.lu/bocpsh (відвідано 20.07.2025)
105. DDC (2024) BIM Roles: Who Does What in a BIM Process? Доступно онлайн https://surl.lt/mtkxzm (відвідано 20.07.2025)
106. León, M. M., Orozco, J. A., Snatos, J. R., & Escobar, A. Y. (2025). Integrating bim and structural analysis to optimize construction . South Florida Journal of Development, 6(8), e5666. https://doi.org/10.46932/sfjdv6n8-016 (accessed 20.07.2025)
107. Miller, J., Schneiderbauer, L., Hauer, M., Jäger, A., Fröch, G., Pfluger, R., & Moser, S. (2025). Enhancing Interoperability Between Building Information Modeling and Building Energy Modeling: Alphanumerical Information Exchange for Energy Optimization in Early Design Stages. Applied Sciences, 15(10), 5789. https://doi.org/10.3390/app15105789 (accessed 20.07.2025)
108. Architecture Lab. (2024). Autodesk Revit Software Review. Retrieved from https://www.architecturelab.net/software/autodesk-revit (accessed 20.07.2025)

109. Autodesk. (2025). Revit 2025 Help Documentation. Retrieved from https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU (accessed 20.07.2025)

110. Interscale. (2025). Revit 2026 vs 2025: Feature Comparison. Retrieved from https://interscale.com.au/blog/revit-2026-vs-2025 (accessed 20.07.2025)

111. Biblus ACCA. (2023). IFC vs RVT: Key Differences in Interoperability. Retrieved from https://biblus.accasoftware.com/en/ifc-vs-rvt-key-differences-in-interoperability (accessed 20.07.2025)

112. Graphisoft. (2024). ArchiCAD – Plans and Products. Retrieved from https://www.graphisoft.com/plans-and-products/archicad (accessed 20.07.2025)

113. AEC Magazine. (2023). Graphisoft Archicad 25 Review. Retrieved from https://aecmag.com/bim/graphisoft-archicad-25 (accessed 20.07.2025)

114. Nemetschek Group. (2024). Allplan Product Information. Retrieved from https://www.allplan.com (accessed 20.07.2025)

115. BuildingSMART International. (2023). OpenBIM and the Nemetschek Group. Retrieved from https://www.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025)

116. Trimble. (2024). Tekla Structures Product Overview. Retrieved from https://www.tekla.com (accessed 20.07.2025)

117. Bentley Systems. (2024). OpenBuildings Designer. Retrieved from https://www.bentley.com/software/openbuildings-designer (accessed 20.07.2025)

118. Bentley Systems. (2024). Digital Twin Solutions for Infrastructure. Retrieved from https://www.bentley.com/digital-twins (accessed 20.07.2025)

119. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. Geneva: ISO.

120. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-2:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva: ISO.

121. Autodesk (2023). Navisworks Manage Overview. Retrieved from https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview (accessed 20.07.2025)
122. Solibri Office – Product Overview (2023). Retrieved from https://www.solibri.com/solutions/solibri-office (accessed 20.07.2025)
123. buildingSMART International. (2023). Retrieved from https://www.buildingsmart.org/bim-collaboration-format-bcf-3-0/ (accessed 20.07.2025)
124. BIMcollab (2024). Retrieved from https://www.bimcollab.com/en/about/about-bimcollab/ (accessed 20.07.2025)
125. Trimble (2024). Trimble Connect – Common Data Environment. Retrieved from https://connect.trimble.com (accessed 20.07.2025)
126. Revizto (2023). Revizto – Integrated Collaboration Platform. Retrieved from https://revizto.com (accessed 20.07.2025)
127. Dalux. (2024). Dalux BIM Viewer and Field Tools. Retrieved from https://www.dalux.com (accessed 20.07.2025)
128. International Organization for Standardization. (2020). ISO 19650-3:2020 – Information management using BIM – Part 3: Operational phase of assets. Geneva: ISO.
129. Bentley Synchro (2024). Retrieved from https://www.bentley.com/software/synchro/ (accessed 20.07.2025)
130. Oracle (2025). Retrieved from https://www.oracle.com/construction-engineering/aconex/ (accessed 20.07.2025)
131. Thinkproject (2025). Retrieved from https://www.thinkproject.com/ (accessed 20.07.2025)
132. Autodesk Construction Cloud (2025). https://construction.autodesk.com/ (accessed 20.07.2025)
133. Graphisoft BIMcloud (2025). Retrieved from https://workfromhome.graphisoft.com/#/ (accessed 20.07.2025).
134. Simple BIM (2025). Retrieved from https://simplebim.com/ (accessed 20.07.2025).
135. BIM-Q (2025). Retrieved from https://www.bimq.de/en/ (accessed 20.07.2025).

136. buildingSMART International. IFC Standards & Documentation. Retrieved from technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ (accessed 20.07.2025).

137. International Organization for Standardization (2018). ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization. Geneva: ISO.

138. buildingSMART International. IFC Standards & Documentation —Retrieved from technical.buildingsmart.org/standards/ifc (accessed 20.07.2025).

139. Solibri. (2021). BCF Workflows in Solibri. Retrieved from https://solibri.com (accessed 20.07.2025).

140. ISO 29481-1:2016. Building information models – Information delivery manual – Part 1: Methodology and format. International Organization for Standardization.

141. Wix, J., & Karlshøj, J. (2010). Information delivery manual: Guide to components and development methods. BuildingSMART International, 5(12), 10.

142. Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., Van Ackere, T., & De Meyer, R. (2017). A method to formally specify information exchanges between actors in the building industry. Advanced Engineering Informatics, 31, 358–369.

143. buildingSMART International. (2022). Information Delivery Specification (IDS) – Candidate Standard. Retrieved from https://technical.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025).

144. Singh, V., Gu, N., & Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. Automation in construction, 20(2), 134-144.

145. International Organization for Standardization. (2012). ISO 29481-2:2012: Building information models — Information delivery manual. Part 2: Interaction framewor. Geneva: ISO.

146. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization.

147. Chipman, T., Weise, M., Bazjanac, V., Maile, T., & See, R. (2016). Implementing IFC-based exchange requirements using Model View Definitions. Building and Environment, 102, 183–194. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.001

148. buildingSMART International. (2024). Model View Definition (MVD) – Technical Documentation. Retrieved from https://technical.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025).

149. Pauwels, P., Törmä, S., & Beetz, J. (2022). Information Delivery Specification: Towards a flexible and machine-readable method for defining exchange requirements in BIM. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 27, 690–705.

150. buildingSMART International. (2024). Retrieved from https://www.buildingsmart.org/users/services/validation-service/ (accessed 20.07.2025).

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

Zinoviy Blikharskyy, Serhiy Bula,
Yaroslav Blikharskyy, Nadiia Kopiika

BIM:
THE DIGITAL INFRASTRUCTURE OF CONSTRUCTION PROJECTS

Workbook

Lviv
Lviv Polytechnic Publishing House
2025

CONTENTS

CHAPTER 1. FOUNDATIONS AND STANDARDS OF DIGITAL INFRASTRUCTURE IN CONSTRUCTION 180

1.1. Introduction. BIM Standards, Guidelines, and Regulatory Frameworks 180

1.2. Architecture of Digital Infrastructure in Construction Projects 184

BIM Maturity Levels: From Fragmented Data to Integrated Delivery 186

BIM Dimensions: Expanding the Scope of Digital Construction 188

Level of Development (LOD): A Structured Path to Model Maturity 191

From LOD to LOIN: Defining the Level of Information in BIM 196

1.3. Data as a Lifecycle Asset: From Design to Decommissioning 199

Data in BIM: Fundamentals 199

Types and Formats of Data in BIM 201

Data Across the Lifecycle 206

1.4. Integrating Smart Systems into BIM: IoT, SCADA, and BMS Synergies 214

Internet of Things (IoT): The Foundation of Smart Infrastructure 215

SCADA Systems in BIM Workflows: Toward Real-Time Operational Intelligence .. 218

The Role of BMS in BIM-Enriched Environments 223

Digital Twins for Real-Time Asset Management 229

CHAPTER 2. SMART SYSTEMS, CLOUD WORKFLOWS, AND COLLABORATION IN BIM 234

2.1. Cloud-Based BIM Platforms and Connected Workflows 234

Cloud-BIM Approaches for Data Flow Integration 235

Cloud-based BIM: Challenges, Advantages and Mitigation Strategies 238

2.2. BIM Information Models and Environments: PIM, AIM, CDE, and BEP Explained 241

The Role of the Common Data Environment (CDE) and BIM Execution Plan (BEP) in Digital Construction Workflows 243

Bridging Design, Construction, and Operation through Information Models 249

2.3. Role Definition in BIM Teams: Ensuring Collaboration and Accountability 251

BIM Manager 252

BIM Coordinator 254

BIM Specialist (Author, Modeler) 256

CHAPTER 3. DIGITAL PLATFORMS IN BIM ENVIRONMENTS 101

3.1. BIM Tools overview 101

3.2. BIM applications 102

3.2.1. Authoring Tools 102

3.2.2. Coordination (Checking) Tools 113

3.2.3. Construction & Field Tools 119

3.3 Collaboration Platforms 126

3.4 Data Structure and Management Tools 129

CHAPTER 4. DATA EXCHANGE AND INTEROPERABILITY 287

4.1. Exchange formats overview 131

4.2. Data formats 133

4.2.1 Industry Foundation Classes (IFC) 133

4.2.2 BIM Collaboration Format (BCF) 136

4.2.3 Construction Operations Building Information Exchange (COBie) 138

4.2.4 Data Sheets and Product Data Templates (PDTs) 139

4.2.5 Semantic services 140

4.3 Methodologies and specifications for information exchange 143

4.3.1. Information Delivery Manual (IDM) 143

4.3.2. Model View Definitions (MVDs) 145

4.3.3. Information Delivery Specification (IDS) 147

4.3.4. Software certification 150

GLOSSARY 152

REFERENCES 318

CHAPTER 1. FOUNDATIONS AND STANDARDS OF DIGITAL INFRASTRUCTURE IN CONSTRUCTION

1.1. Introduction. BIM Standards, Guidelines, and Regulatory Frameworks

Building Information Modelling (BIM) has emerged as a transformative approach in construction, extending beyond traditional 3D modelling to enable collaboration, efficiency, and lifecycle management. Through BIM, all stakeholders—architects, engineers, contractors, and owners—can share accurate digital representations of built assets, facilitating coordinated decision-making from design through construction, operation, and eventual decommissioning. While BIM is often associated with modern technology, its roots trace back several decades.

The concept of BIM began to take shape in the 1970s, driven by the need for more efficient design and construction processes. Charles M. Eastman, a pioneer in computer-aided design, introduced the information model concept in 1975. This system utilized a graphical user interface and a relational database to manage building data, laying the groundwork for what would later be known as BIM [1]. In the following years, Eastman developed the Graphical Language for Interactive Design (GLIDE), which expanded upon BDS by incorporating more building elements and improving data accuracy. These early systems aimed to integrate various aspects of a building project into a single, cohesive model, moving beyond the limitations of traditional 2D drawings.

The 1980s and 1990s saw significant advancements in BIM software. In 1987, Graphisoft released ArchiCAD, one of the first BIM software applications that allowed architects to create virtual building models. This marked a shift from simple 2D CAD tools to more sophisticated 3D modeling platforms [1].

The 1990s introduced other notable BIM tools, including RUCAPS, Sonata, and Reflex. These applications enabled users to model building components and systems, facilitating more detailed and accurate representations of buildings. The development of the Industry Foundation Classes (IFC) standard in the mid-1990s further promoted interoperability between different BIM software, allowing for more seamless data exchange [2].

The early 2000s marked a turning point for BIM with the introduction of Autodesk Revit in 2002. Revit was specifically designed for BIM, offering integrated tools for 3D modeling, data management, and collaboration. Its acquisition by Autodesk in 2002 significantly accelerated BIM adoption across the AEC industry. During this period, the UK government mandated the use of BIM for public projects, driving widespread adoption and setting a precedent for other nations. Simultaneously, BIM evolved to encompass additional dimensions: 4D (time), 5D (cost), and 6D (sustainability), providing a comprehensive toolset for managing every aspect of a building's lifecycle [1]. Timelines details are given in Table 1.1.

Table 1.4. BIM History Timeline

Year	Milestone
1975	Charles Eastman introduces BIM concept
1987	Graphisoft releases ArchiCAD, one of the first BIM software applications
1992	The term "Building Information Modeling" is first introduced
1997	Revit Technologies is founded, later acquired by Autodesk in 2002
2002	Autodesk acquires Revit, marking a significant milestone in BIM adoption
2003	The National Institute of Building Sciences establishes the buildingSMART Alliance
2007	The UK government mandates BIM for public projects
2010s	BIM evolves to include 4D (time), 5D (cost), and 6D (sustainability) dimensions
2020s	BIM becomes the standard in construction, with advancements in AI, machine learning, and cloud computing further enhancing its capabilities

Looking ahead, BIM is poised to continue its evolution. Advancements in artificial intelligence and machine learning are expected to automate tasks, improve accuracy, and provide predictive insights. Cloud-based platforms will facilitate real-time collaboration among stakeholders, regardless of location. Additionally, the integration of the Internet of Things (IoT) with BIM will enable real-time monitoring and management of building systems, leading to more efficient and sustainable buildings.

The successful adoption of BIM relies not only on software and modelling skills but also on adherence to standards and regulations. These frameworks ensure interoperability across platforms, legal compliance, and consistent information delivery,

allowing construction projects to be executed efficiently while minimizing risks of data misinterpretation or loss. Standards form the backbone of structured workflows, supporting the integration of BIM with smart technologies, digital twins, and facility management systems.

Globally, several standards provide guidance for the implementation and use of BIM. The ISO 19650 series represents the international benchmark for information management using BIM. It outlines principles and processes for managing information throughout the lifecycle of a built asset, from inception through design, construction, operation, and eventual decommissioning. The series emphasizes the importance of collaborative working, clear roles and responsibilities, and structured information delivery to achieve efficient and effective project outcomes.

Ukrainian Standards Regulating BIM

Ukraine has developed a comprehensive set of standards to guide the implementation of BIM within the country. These standards align with international best practices while addressing the specific needs and context of the Ukrainian construction industry. Some key standards include [3]:

- **DSTU EN ISO 16757-2:20XX:** This standard focuses on the geometric parameters of building products and equipment, providing guidelines for modeling their geometry to facilitate data exchange and interoperability.
- **DSTU EN ISO 21597-1:20XX:** It defines an open format for the delivery, storage, and archiving of documents related to built assets, supporting the exchange of information throughout the asset's lifecycle.
- **DSTU EN ISO 23386:20XX:** This standard establishes rules for defining and maintaining data vocabularies used in BIM, ensuring consistency and clarity in the description of building properties.
- **DSTU EN ISO 23387:20XX:** It provides principles for the construction and structure of data templates related to building objects, facilitating the digital representation of data in machine-readable formats.

- **DSTU EN ISO 29481-2:20XX:** This standard offers guidance on information delivery, specifying the methodology and format for describing agreed actions performed by participants in a construction project.
- **DSTU ISO 15686-4:2020:** It addresses service life planning using BIM, providing methods for predicting and verifying the service life of buildings and real estate objects.

These standards collectively aim to create a robust framework for BIM implementation in Ukraine, promoting consistency, interoperability, and efficiency in the construction industry.

European Union: EN ISO Standards for Information Modeling

Within the European Union, the adoption of BIM is supported by a suite of EN ISO standards that harmonize practices across member states. Notably:

- **EN ISO 16739:** This standard defines the Industry Foundation Classes (IFC), a neutral and open specification for data exchange in the construction and facility management industries.
- **EN ISO 19650:** As mentioned earlier, this series outlines principles and processes for information management using BIM, providing a structured approach to managing information throughout the asset lifecycle.

IFC (Industry Foundation Classes) serves as an open, neutral schema facilitating interoperability between software platforms, allowing complex data to be exchanged without loss. COBie (Construction Operations Building Information Exchange) provides structured handover information for operations and maintenance, ensuring that facility managers have complete and accurate asset data. Other notable international standards include ISO 16739 (foundation for IFC definitions), PAS 1192 (UK, precursor to ISO 19650), and the National BIM Standard (US), providing process-specific guidance for collaborative workflows.

BIM workflows raise important legal considerations related to data ownership, liability, and intellectual property. Standards and contractual agreements clarify responsibilities for data creation, verification, and updates, as well as accountability for errors. BIM Execution Plans (BEPs) formalize project-specific workflows, roles, and

deliverables, while a Common Data Environment (CDE) centralizes storage and exchange, enabling version control, traceability, and secure collaboration among all stakeholders. Standards and regulations shape how BIM models are developed, shared, and used. They ensure that digital models are consistent, interoperable, and ready for integration with smart systems such as IoT, SCADA, BMS, and digital twins. Compliance with standards also supports lifecycle management, facilitating efficient operation, maintenance, and long-term asset management. These topics will be explored in more depth in the sections that follow.

Building on this foundation, the next sub-section, will explore the technical structure of digital models, BIM maturity, LOD/LOIN definitions, and lifecycle integration, linking regulatory frameworks to practical workflows.

1.2. Architecture of Digital Infrastructure in Construction Projects

The digital transformation of the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry has been driven by evolving technologies and shifting demands for efficiency, transparency, and sustainability [4]. At the core of this transformation is Building Information Modelling (BIM)—a process and ecosystem that unites digital tools, structured data, and collaborative workflows throughout the entire project lifecycle [5]. The growing strategic importance of BIM is reflected in recent market projections, with Allied Market Research (2023) [6] forecasting the global BIM market to reach $34.2 billion by 2032 (see Таблиця 1.2). This strong upward trend highlights the urgent need for a clear and in-depth understanding of the key principles and digital infrastructure that underpin BIM-based project environments.

Table 1.2.

Building Information Modeling Market Report Highlights (adopted from [6])

Aspects	**Details**
Market Size By 2032	USD 34.2 billion
Growth Rate	CAGR of 16%
By Deployment Mode	• On-premise • Cloud
By Building Type	• Commercial • Residential
By Application	• Planning and Modelling

	• Construction and Design • Asset Management • Building System Analysis and Maintenance Scheduling
By End-User	• Architects/Engineers • Contractors • Others
By Component	• Solution • Service
By Region	• North America (U.S., Canada) • Europe (UK, Germany, France, Italy, Spain, Rest of Europe) • Asia-Pacific (China, Japan, India, South Korea, Australia, Rest of Asia-Pacific) • LAMEA (Latin America, Middle East, Africa)
Key Market Players	Autodesk Inc., HEXAGON AB, Dassault Systems, Beck Technology Ltd., Asite Solutions Ltd., Trimble, Inc., Pentagon Solutions Ltd., Nemetschek Group, Bentley Systems, Incorporated, AVEVA Group PLC.

As defined by Autodesk (2025) [7], BIM is "is the holistic process of creating and managing information for a built asset. Based on an intelligent model and enabled by a cloud platform, BIM integrates structured, multi-disciplinary data to produce a digital representation of an asset across its lifecycle, from planning and design to construction and operations" However, BIM is more than a modelling tool. It functions as a sociotechnical system—a convergence of digital infrastructure, human actors, and governance frameworks. It enables multidisciplinary teams to co-develop, share, and manage a digital twin of the built environment that evolves through all phases, from planning and design to construction, operation, and decommissioning.

At the heart of the digital architecture lies the BIM model (Рис. 1.1), composed of intelligent objects that are both parametric and information-rich. These objects—structural elements, mechanical components, furniture, or energy systems—are embedded with both graphical attributes (geometry) and non-graphical data (material properties, performance metrics, lifecycle cost, maintenance schedules). BIM objects can be [8]:

- **Generic objects:** Used in the early design phases, these abstract components capture spatial and functional relationships without specifying detailed performance data. They enable exploration of massing, layout, and early design alternatives.

- **Manufacturer-specific objects:** Introduced in later stages such as detailed design and procurement, these elements include precise geometric definitions and are enriched with real-world technical specifications, such as structural capacity, compliance certifications, or environmental performance data. They form the basis for procurement, fabrication, and lifecycle cost assessments.

These BIM objects are more than visual entities—they are embedded with graphical (2D plans, sections, elevations, and 3D geometry) and non-graphical meta-data (material properties, technical parameters, manufacturer details, scheduling requirements, cost information, energy consumption, carbon footprint, and maintenance schedules) at a specific level of detail.

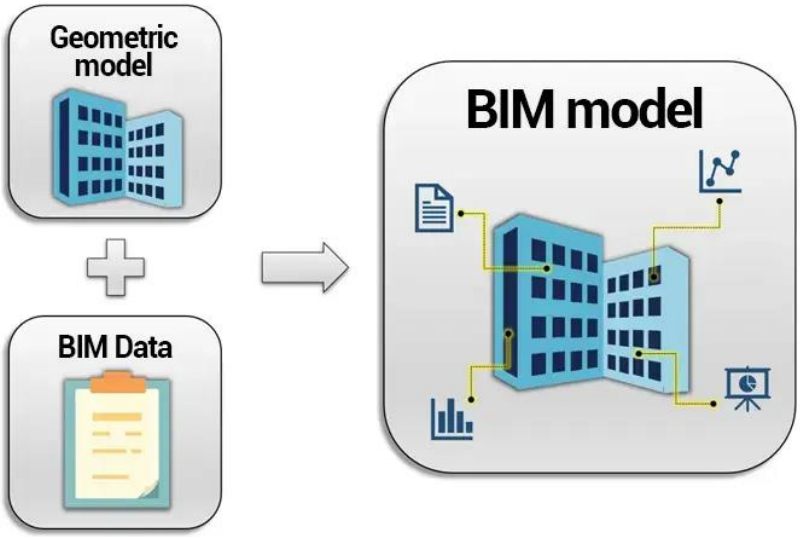


Figure 1.22. Geometry and BIM Data [9]

BIM Maturity Levels: From Fragmented Data to Integrated Delivery

The concept of BIM maturity levels delineates the progressive stages through which the architecture, engineering, and construction industry advances in terms of collaboration, information sharing, and technological integration. These levels, ranging from Level 0 to Level 3 and beyond (see Рис. 1.2), serve as benchmarks for assessing the extent to which BIM methodologies are adopted and implemented within projects and organizations [10,11-16].

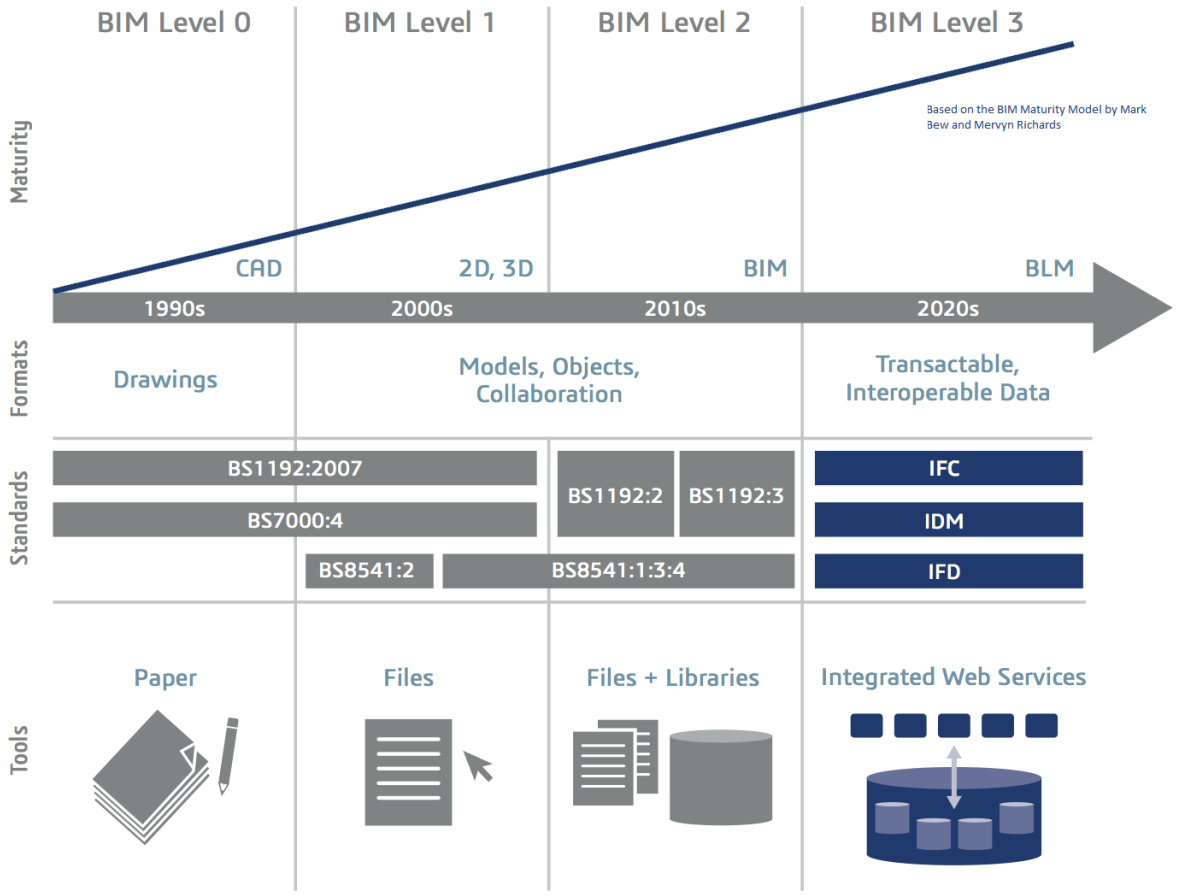


Figure 1.23. Levels of BIM Maturity (Mark Bew and Mervyn Richards in [10]).

Level 0: Traditional Practices with Minimal Collaboration. At the foundational Level 0, the industry operates predominantly using traditional methods, characterized by first improvements by the creation of 2D drawings through Computer-Aided Design (CAD) software. Information exchange is limited to manual drawings, paper-based documents or electronic prints, with negligible digital collaboration among stakeholders [17]. Each participant works in isolation, leading to potential discrepancies and inefficiencies due to the lack of integrated workflows and shared data environments [18].

Level 1: Introduction of Digital Tools and Partial Collaboration. Progressing to Level 1, there is a noticeable shift towards digitalization, with the incorporation of both 2D and 3D CAD tools. While individual disciplines begin to adopt digital methods, collaboration remains limited. Data exchange occurs through a Common Data Environment (CDE), facilitating better information management. However, models are still developed in silos, and there is no unified approach to data integration across different teams.

Level 2: Enhanced Collaboration through Federated Models. Level 2 marks a significant advancement in BIM maturity, emphasizing collaborative working practices. Here, all stakeholders develop their own 3D models, which are then combined into a federated model. This approach allows for better coordination and clash detection, as models from various disciplines are integrated within a shared environment [18,19]. The use of standardized formats, such as Industry Foundation Classes (IFC), ensures interoperability and efficient information exchange. This level also aligns with the principles outlined in ISO 19650, promoting structured information management throughout the project lifecycle.

Level 3: Full Integration and Lifecycle Management. At Level 3, BIM reaches its most advanced stage, characterized by full integration and real-time collaboration among all project participants. A single, shared model serves as the central repository of information, accessible to all stakeholders. This model-centric approach facilitates seamless data exchange, enabling comprehensive lifecycle management from design and construction to operation and maintenance. The integration of technologies such as cloud computing and digital twins further enhances the capabilities of BIM at this level, allowing for predictive analytics and optimized asset management [8,17]. While Level 3 represents the pinnacle of current BIM maturity, the industry continues to explore dimensions beyond this stage [20].

BIM Dimensions: Expanding the Scope of Digital Construction

As was explained in the previous subsection, BIM represents a paradigm shift from traditional 2D drawings toward integrated digital representations of construction projects. Rather than merely providing visual plans, BIM offers a data-rich environment that supports all phases of a structure’s lifecycle—from conception to decommissioning. Over time, BIM has expanded to incorporate multiple "dimensions," each representing a layer of information that enhances planning, execution, and management (Рис. 1.3). While there is widespread confusion, BIM maturity levels are often mistakenly equated with BIM dimensions, though they represent fundamentally different concepts. BIM dimensions, hence, refer to the layers of information integrated into a digital construction model, each adding value to different aspects of the project lifecycle. BIM goes far

beyond basic three-dimensional (3D) modelling—it encompasses additional ‘dimensions’ such as time (4D), cost (5D), sustainability (6D), and others. These dimensions enhance the model with data that supports planning, execution, operation, and management of the built asset.

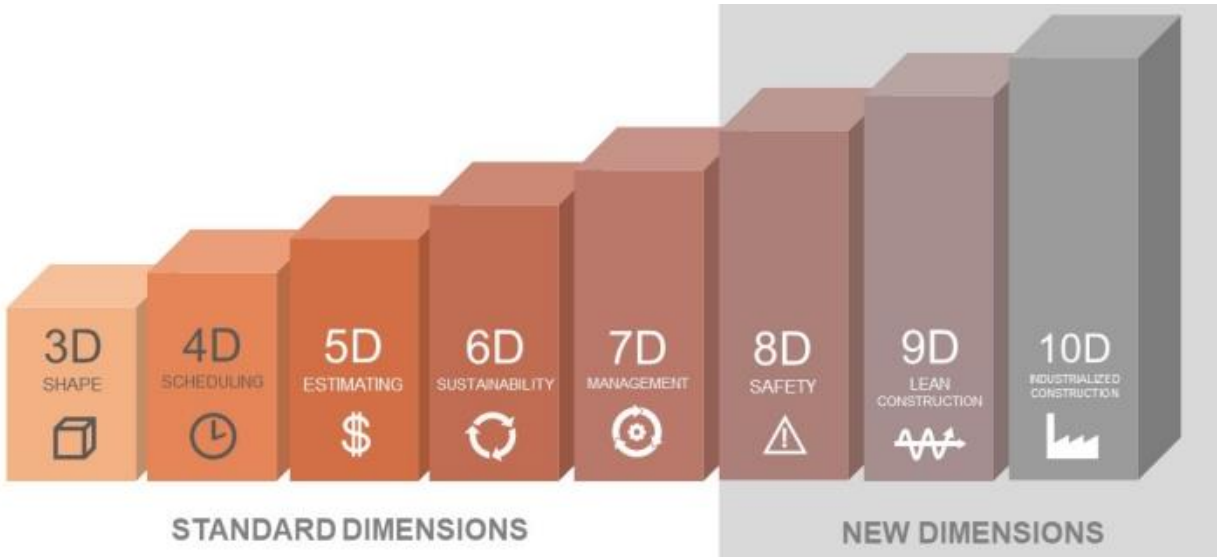


Figure 1.24. The 10 dimensions of BIM Levels [25].

The evolution of BIM typically begins with **1D**, which refers to information management and documentation. It ensures that data is collected, structured, and shared across the project team, supporting collaboration through centralized data exchange platforms [21,22]. **2D BIM** corresponds to traditional technical drawings—plans, elevations, and sections—which remain essential but limited in conveying complex spatial relationships or performance aspects. While still common in practice, 2D lacks the depth to address modern construction needs, such as automated quantity take-offs. Hence, 2D provides a static snapshot rather than a dynamic view of the project [23]. The transition to **3D BIM** introduces three-dimensional geometry, allowing accurate visualization of architectural, structural, and MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) components. It enhances coordination among disciplines, supports clash detection, and provides a shared understanding of the design intent [24]. It is essential to note that 3D BIM significantly reduces design errors and rework by providing a shared, accurate model [25]. The 3D BIM dimension is recognised as the most popular and widely used, introducing the minimum requirement for construction project in most countries.

However, additional levels of information propose unique potential to further enrich the digital model, going well beyond simple geometric representation.

Incorporating the time dimension, **4D BIM** integrates elements of the 3D model to the project schedule. This enables simulation of construction sequences, logistics planning, and visualization of site activities over time. It enhances communication between contractors and clients by forecasting how the project will unfold day by day [26]. **5D BIM** integrates cost estimation into the model, associating components with unit costs and enabling real-time budgeting. This supports more accurate tendering, financial planning, and value engineering. Quantities can be extracted automatically and linked to cost databases, enabling real-time budgeting and cost optimization throughout the design and construction process [27]. Moreover, 5D BIM allows cost forecasting based on design changes, improving transparency and control throughout the budgeting process [25]. The **6D** dimension introduces sustainability and energy performance parameters. By linking building elements with environmental data—such as thermal performance, lifecycle emissions, and energy usage—designers can evaluate the ecological footprint of materials and systems [28]. In regard to this dimension, it is important to note that 6D BIM supports certifications like LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) or BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) by enabling environmental simulations early in the design process. **7D BIM** focuses on facility management by integrating information on warranties, maintenance schedules, product specifications, and operation protocols. Owners and operators can use the BIM model beyond construction to optimize asset performance over its lifespan. This dimension is critical for predictive maintenance and long-term asset management [17,21].

In addition to the 7 standard dimensions, described above, there is an open discussion on the three “new dimensions of BIM”, currently not standardised, whilst gaining wide attention (Рис. 1.3). **8D BIM**, hence, focuses on health and safety planning and management. Risk-prone zones and hazardous tasks can be modelled and visualized, allowing safety planners to mitigate potential threats before construction begins. This proactive approach supports the implementation of site-specific safety measures and regulatory compliance [29]. **9D BIM** reflects lean construction principles—eliminating

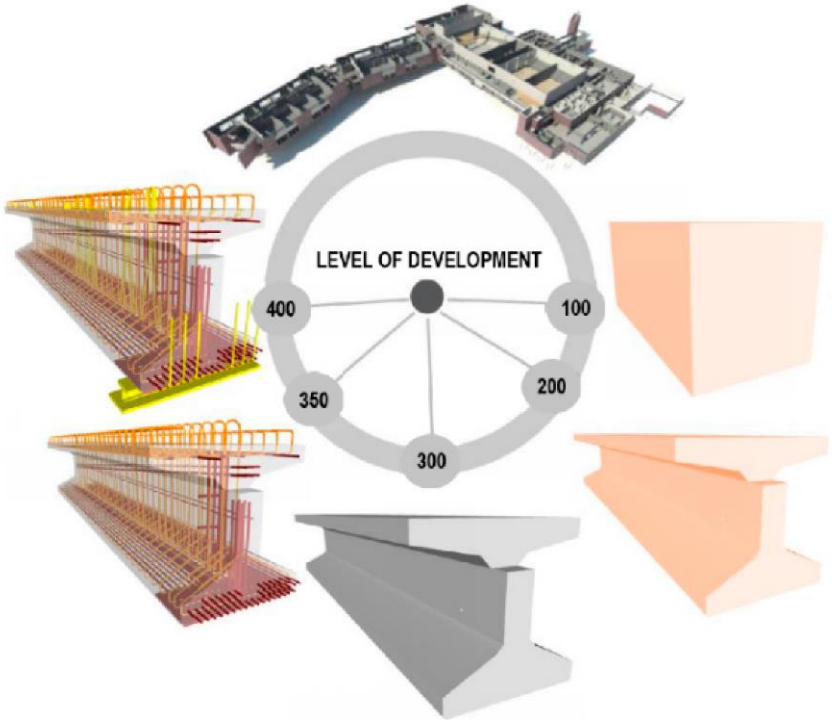
waste, improving logistics, and maximizing value. It emphasizes collaborative workflows and real-time feedback loops, often facilitated through mobile applications and cloud-based platforms [30]. Integration of lean methodologies within BIM ensures more efficient resource use and streamlined site operations. Finally, **10D BIM** marks the frontier of digital transformation in construction, aimed at industrialising the sector and radically improving productivity, coordination, and quality. It represents a convergence of advanced technologies, real-time data streams, and standardized processes to support full lifecycle management—from design to deconstruction—through an integrated digital ecosystem [31]. At its core, 10D BIM integrates smart systems such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), robotics, and digital twins. These technologies enable real-time monitoring, predictive analytics, and autonomous responses to changes in physical, commercial, and environmental data. Beyond improving execution, 10D BIM also supports resilience and adaptive planning, particularly in Smart City initiatives and large-scale infrastructure projects where systems must dynamically respond to user demands, environmental stressors, or emergency scenarios.

These “new dimensions”, therefore, is not just an evolution of BIM capabilities—it signals a transformation of the construction industry into a digitally integrated, data-driven, and highly automated production environment, where efficiency, quality, and sustainability are engineered by default. The progressive enrichment of BIM dimensions reflects its transition from a design tool to a comprehensive infrastructure intelligence system. By embedding multidimensional data into a unified model, BIM empowers stakeholders to design smarter, build faster, and operate more efficiently—while meeting evolving demands of sustainability, safety, and resilience.

Level of Development (LOD): A Structured Path to Model Maturity

In the context of BIM, the Level of Development (LOD) represents a systematic approach to defining the reliability, completeness, and usability of model elements at each stage of a construction project. The LOD concept serves as a foundation for aligning expectations between project stakeholders, ensuring that the data embedded within a model is appropriate for its intended use—whether that be conceptual visualization, cost estimation, construction, or operation and maintenance (see Рис. 1.4).

a)



b)

Figure 1.25. Level Of Development (LOD): (a) main LODs [32]; b)examples [33].

IFC facilitates communication between building information models and platforms by providing standardised data. However, the building information models themselves must contain adequate and consistent levels of detail to conform with BIM-based workflows or to interoperate with external BIM-compliant databases such as material/component (M/C) banks. This requires selecting the appropriate Level of Development or Level of Detail (LoD) [33]. The higher the LoD, the higher the detail of each object, as can be seen in Рис. 1.4, b.

In BIM, the Level of Development (LOD) provides a structured and standardized approach to describe the evolution of model elements from conceptual sketches to as-

built documentation. It articulates the degree of detail, precision, and information associated with each element, enabling project stakeholders to make informed decisions throughout the asset lifecycle—from design and construction to operation and maintenance. LOD serves as a shared language between architects, engineers, contractors, owners, and facility managers, setting clear expectations about how much information a model should include at different stages and how trustworthy that information should be for specific tasks like cost estimation, scheduling, procurement, fabrication, or asset management.

It is important to distinguish between the terms Level of Development and Level of Detail, which are sometimes mistakenly used interchangeably. While they are closely related, they focus on different aspects of the model [32]. The Level of Detail refers specifically to the visual and graphical complexity of BIM elements—how realistically and intricately an object is modelled from a visual standpoint. In contrast, the Level of Development emphasizes the accuracy, completeness, and trustworthiness of both the graphical representation and the associated data. It is the LOD that determines whether a model element is suitable for particular decision-making tasks, such as fabrication planning or facility management. As the BIMForum LOD Specification emphasizes [34], LOD is not merely about what an object looks like—it's about what an object is capable of conveying and supporting in terms of real-world project decisions.

The evolution of the LOD concept dates back before its formal standardization. In 2008, the American Institute of Architects (AIA) introduced a five-tier classification system that has since become a foundational reference in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry [35]. Today, the LOD framework is widely accepted as an industry standard, with defined levels ranging from LOD 100 to LOD 500. Each level corresponds to a specific phase of model maturity and describes the graphical representation, associated metadata, and intended use of each element within the model (see Table 1.3).

At the earliest stage, **LOD 100**, the model includes basic conceptual geometry that represents a building element in a purely symbolic manner. It captures essential information such as general size, shape, location, orientation, and massing. The purpose

of this stage is primarily to support spatial planning and preliminary feasibility studies. The geometry lacks detail, but it provides sufficient abstraction to initiate discussions and explore design alternatives [32,36]. As the project progresses into schematic design, **LOD 200** introduces approximate geometries with more defined shapes, placements, and generic system representations. Elements begin to resemble their actual counterparts, although still represented in generalized terms. This level of development allows for initial quantity take-offs, basic clash detection, and early coordination between disciplines. Limited property data may be attached, such as material types or performance assumptions, to support early-stage decision-making [37].

LOD 300 marks a significant transition to a level of accuracy suitable for construction documentation. Here, model elements are represented as specific systems, objects, or assemblies, complete with defined dimensions, geometry, and relative positions within the overall project model. Non-graphical information such as technical specifications and material data is also typically integrated. The model at this stage becomes a central resource for producing drawings, validating coordination between trades, and generating accurate cost estimates. It is also the minimum LoD considered sufficient for LCA and sustainability assessments, due to its balance between accuracy and manageability [38]. Building upon this, **LOD 350** incorporates details related to how elements interact with adjacent systems or components. This level addresses connections, interfaces, supports, and other constructability-related considerations that are essential for generating shop drawings and planning construction workflows. For instance, the relationship between structural framing and mechanical systems or the installation constraints of prefabricated components becomes explicitly modelled. It is at this stage that the model begins to function not just as a design tool, but as a reliable foundation for actual construction planning. **LOD 400** represents the fabrication-level stage, where the model is enriched with the exact information required for manufacturing and assembly. Components are modelled as build-ready elements, including precise quantities, dimensions, materials, and installation details. The model at LOD 400 is often used directly for off-site fabrication and on-site construction, making accuracy and reliability of the highest importance. Manufacturers' specifications, fabrication instructions, and

sequencing data may also be embedded within the model, transforming it into a tool for production control. This level is also critical in demolition planning and sustainability-driven scenarios, such as Design for Disassembly (DfD), due to their inclusion of material quantities, specifications, and assembly details [39].

Table 1.3. Level Of Development (LOD)

LOD	Description	Typical Uses
LOD 100 – Conceptual	Represents general massing, orientation, and approximate volume. Elements are symbolic and abstract.	Feasibility studies, preliminary planning, early-stage coordination.
LOD 200 – Approximate Geometry	Elements have generalized shapes and approximate location. Includes basic system types and some performance data.	Schematic design, early clash detection, cost estimation.
LOD 300 – Precise Geometry	Model elements are defined with accurate geometry, dimensions, and location. Includes specific systems and components.	Construction documentation, quantity take-offs, coordination drawings.
LOD 350 – Interfaces Modelled	Adds detail regarding how components interact with adjoining systems (e.g. mechanical supports, connections).	Constructability analysis, sequencing, and clash resolution.
LOD 400 – Fabrication Ready	Includes complete fabrication details, installation tolerances, and manufacturer specifications. Elements are buildable.	Prefabrication, procurement, installation.
LOD 500 – As-Built	Field-verified model of what was actually constructed, including precise location, size, and operational data.	Facilities management, maintenance, digital twins.

Finally, **LOD 500** reflects the as-built condition of the completed structure. At this level, every modelled element has been verified in the field for actual geometry, position, and attributes. The model includes all revisions, modifications, and real-world deviations that occurred during construction. It becomes a comprehensive digital twin of the physical asset, serving long-term facility and asset management functions. The LOD 500 model contains non-geometrical data such as equipment warranties, operation manuals, service schedules, and performance metrics, supporting effective maintenance, monitoring, and eventual refurbishment or decommissioning [32,36]. Moreover, for demolition planning and end-of-life assessments, LoD 500 is essential to enable accurate calculation of material volumes, waste flows, and logistics (e.g., number of required transport units).

The structured nature of the LOD framework offers several key benefits. First, it enhances communication and coordination among stakeholders by providing a common language and set of expectations regarding the model's content and use. Second, it supports informed decision-making by ensuring that only appropriately detailed and reliable data is used for critical project decisions. Third, it provides a methodical approach to model development, enabling efficient planning, tracking, and quality control. Finally, by defining the model’s intended use at each stage, it contributes to improved project outcomes, reducing the likelihood of rework, delays, and cost overruns. As BIM moves beyond simple visualization into realms of predictive analytics, sustainability, and lifecycle optimization, the Level of Development becomes increasingly critical. It transforms the model from a visual artifact into a performance-oriented, information-rich asset. By formalizing how information matures over time, LOD enhances trust, efficiency, and value across every phase of a construction project.

From LOD to LOIN: Defining the Level of Information in BIM

While the Level of Development (LOD) framework has long served as a practical tool to define how detailed and reliable model elements should be, it has often been interpreted differently across projects and regions. With the increasing adoption of ISO 19650 as the international standard for information management in the built environment, a more structured, flexible, and outcome-oriented concept has emerged: **the Level of Information Need (LOIN).**

LOIN moves beyond the geometry-centric logic of LOD and shifts the focus to **why** information is needed, **what** kind of information is required, and **when** it should be delivered (Рис. 1.5). It acts as a unifying principle that harmonizes graphical (geometry), alphanumerical (data), and documentation (files or reports) needs into a single, cohesive framework tailored to specific project or asset-related decisions [40,41]. This evolution is not simply semantic—it reflects a critical shift in BIM practice from producing information for its own sake to delivering fit-for-purpose information that serves defined use cases.

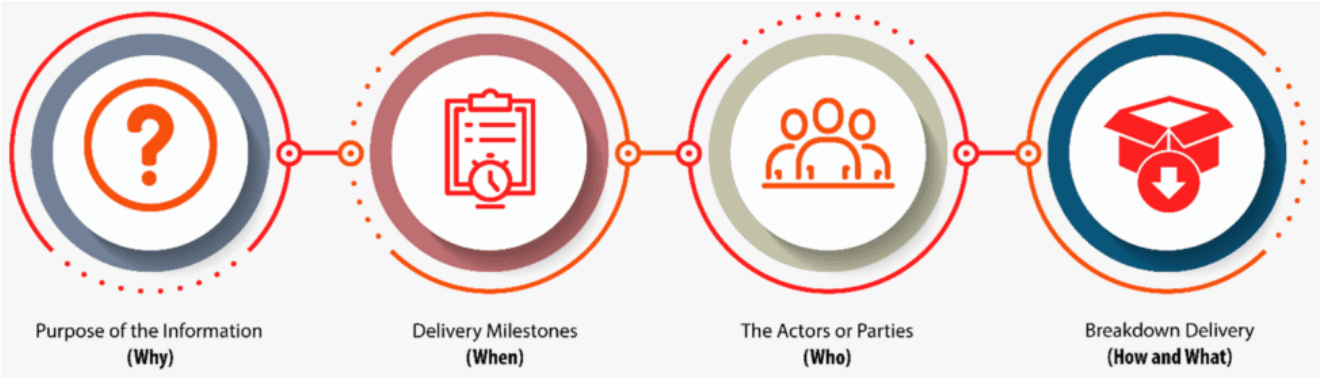


Figure 1.26. A Practical 4-Step to apply LOIN in Construction Projects [42].

Traditional LOD specifications have undoubtedly contributed to the standardization of BIM execution. However, they often suffer from being too rigid or too loosely interpreted, particularly in complex or international projects. The ISO 19650 standard addresses this by introducing LOIN as a performance-based approach to information modelling—emphasizing the "right information, at the right time, to the right people".

According to ISO 19650, every information requirement should be expressed with respect to:

- **Purpose:** What decision or activity is the information supporting?
- **Form:** What format is needed—model geometry, properties, reports, or linked documentation?
- **Quality:** How complete, accurate, and verifiable should the information be?

This shift is essential for reducing waste, improving coordination, and aligning BIM outputs with client expectations, especially as projects become more data-driven and lifecycle-focused. LOIN, hence, offers a scalable and context-sensitive alternative to traditional LOD, allowing stakeholders to specify exactly the level of graphical and non-graphical information required for any given task—whether it's energy simulation, procurement, maintenance planning, or regulatory compliance. The Level of Information Need includes three interrelated components [40]:

- **Geometry (Graphical Data)** – The required detail in the visual representation of the element (similar to traditional LOD).

- **Alphanumeric Information** – Structured, non-graphical data attached to model elements (e.g., performance characteristics, cost, manufacturer data).
- **Documentation** – External files or documents referenced or linked to the element (e.g., certificates, product datasheets, installation manuals).

Unlike LOD, which often combines these aspects under one umbrella term, LOIN allows each component to be separately specified and individually validated, offering far greater precision and adaptability. For example, a component may require a low level of geometric detail but a high degree of non-graphical data to meet procurement needs.

Traditionally, projects relied heavily on static documents. Today, digital models dominate communication, but it's alphanumeric content that is now the primary growth area. Structured, interoperable data allows models to function as data-rich assets, enabling predictive maintenance and lifecycle optimization. In contrast, geometric models are increasingly seen as placeholders or containers for this information, while document-based delivery continues to decline in relevance [41,43]. This shift underlines the value of LOIN: providing only the right information, at the right time, for the right purpose—avoiding data overload while supporting performance-driven outcomes (Рис. 1.6).

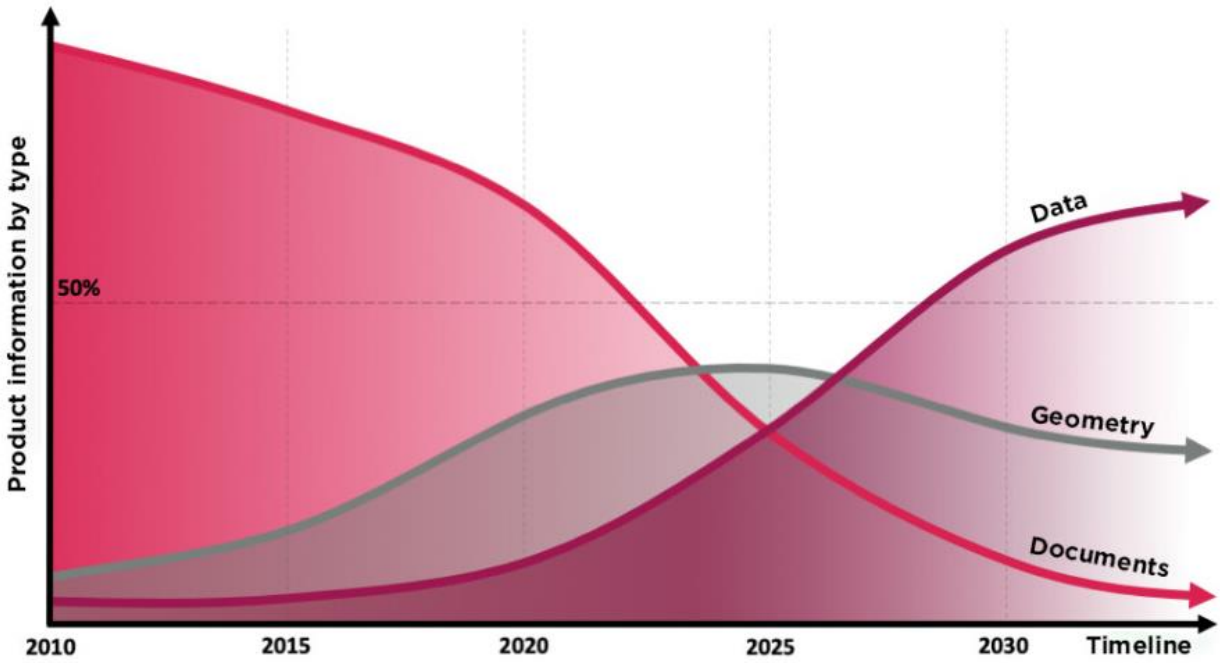


Figure 1.27. Trends in the provision of information (plan.one (n.d.)).

One of the persistent challenges with LOIN is its abstraction—it requires a cultural and procedural shift away from model-centric thinking toward value-based information planning [43]. However, when well implemented, it significantly improves project clarity and reduces information overload by ensuring only relevant, decision-supportive data is produced. The ISO 19650-compliant framework also enables automated validation and model checking against predefined requirements, reducing subjectivity and manual overhead. Tools that support this, including rule-based BIM validation platforms, are becoming more prevalent in digital delivery workflows.

The introduction of the Level of Information Need marks a fundamental step in the maturation of BIM practices. Where LOD provided structure to the model's evolution, LOIN embeds purpose into every piece of information produced. It ensures that BIM is not just about building better models—but about building better decisions, better collaboration, and ultimately, better assets.

1.3. Data as a Lifecycle Asset: From Design to Decommissioning

Data in BIM: Fundamentals

In the context of BIM, data is not just a digital by-product of design—it is a foundational asset that accompanies and empowers a structure throughout its entire lifecycle, from early planning through operation and eventual decommissioning. Understanding data as a lifecycle asset means recognizing its evolving role across different project phases and how it enables decision-making, efficiency, and long-term value. At its core, data consists of facts, values, or measurements that describe physical or abstract characteristics of objects—such as dimensions, materials, or cost codes. In BIM environments, this data is embedded into or linked with digital representations of buildings, making it an actionable and shareable resource. Every model element—whether a wall, beam, or HVAC component—can contain structured data (e.g., material type, fire rating) and unstructured data (e.g., images, PDFs, or meeting notes). Properties in BIM are grouped logically into property sets, which can be predefined or user-defined. This flexible data structure allows BIM to capture project-specific requirements, making the model a living source of knowledge throughout the project's lifecycle. BIM data

extends far beyond geometric modelling [44]. It integrates multiple dimensions of information crucial for the lifecycle management of structures (Рис.1.7):

- **Material and Design Data:** Define the physical characteristics and design intent.
- **Planning Data (4D):** Attach scheduling information, enabling time-based simulations.
- **Cost Data (5D):** Link financial information to quantify budgets and track expenditures.
- **Structural and Energy Data:** Support analysis and optimization during design and operation.
- **Environmental, Health, and Safety** Data: Ensure compliance and sustainable practices.
- **Maintenance and Demolition Data:** Facilitate facility management and end-of-life planning.

Figure 1.28. Types of BIM Data [44]

However, it is important to find the right balance in data inclusion. Excessive detail can complicate model management and usability, while too little data reduces BIM to a mere 3D visualization without lifecycle value. The quantity and type of data included should reflect the project's phase, goals, client requirements, and stakeholder needs.

Disregard to particular detailing, properly structured BIM data enhances project outcomes across all phases, enabling [44]:

- Greater control and oversight during design and construction.
- More accurate documentation, including precise quantities and specifications.
- Simplified analysis and calculations, supporting design verification and performance evaluation.
- Conflict detection between geometry and metadata, reducing errors.
- Real-time tracking of schedule, cost, and resource use.
- Improved interoperability, enhancing communication among diverse stakeholders.
- Reliable asset management, particularly in operation and maintenance.
- Compliance assurance, through transparent, traceable data flows.
- Consistent quality, contributing to long-term performance and resilience.

Types and Formats of Data in BIM

Effective use of BIM relies on how well project data is structured, shared, modified, and stored among stakeholders. A critical first step is identifying what types of data are relevant to the specific project—ranging from geometric parameters to lifecycle and maintenance requirements. Once this is defined, BIM data can be organized in two primary configurations: **integrated directly into the model** or **linked externally to it** [44]**.**

When BIM data is **integrated into the model**, the necessary attributes and properties are embedded within the digital elements themselves. This is typically done using the IFC (Industry Foundation Classes) schema, an open and standardized format that enables detailed representation of each object, including its relationships, functions, and properties. This configuration ensures that all the information is immediately available within the model, allowing users to access object-specific data quickly through its metadata panels or information sheets. However, while this method enhances accessibility and interoperability, it has a downside: embedding large volumes of data can result in a heavy and slow model. This can compromise performance, especially on complex projects or when using hardware with limited capacity.

To address this, an alternative approach is to **link BIM data to the model** while storing the bulk of the information in an external environment—typically a Common Data

Environment (CDE). In this setup, the model remains lightweight and manageable, while still maintaining access to essential project data through references or hyperlinks. For instance, a BIM element might be connected to a maintenance log, product specification sheet, or inspection record stored in the CDE. This separation supports collaborative workflows and allows parallel data updates without constantly reprocessing the central BIM model. More details regarding CDE are provided in following sections.

The choice of data format for sharing and delivering BIM content largely depends on intended use and required interoperability [44]. To support collaboration among different tools and stakeholders, open formats like IFC are preferred. IFC enables consistent data exchange across various software platforms and is recognized internationally, promoting smoother workflows and clearer communication. Another widely used open format is COBie (Construction-Operations Building Information Exchange). Unlike IFC, COBie is typically structured as a spreadsheet (often in XML or XLS format) that captures non-graphical data needed for facility management—such as asset identifiers, locations, manufacturers, and maintenance schedules. This is particularly valuable during the handover phase, where clarity and usability of information take precedence. Alternatively, proprietary formats (like Revit's .RVT or ArchiCAD's .PLA) may be used, particularly within single-vendor workflows. However, these require compatible software to access and manipulate the data. To promote broader usability, especially during operation and maintenance, open formats are generally more sustainable and accessible in the long term.

In BIM, understanding the distinction between structured and unstructured data is crucial for efficient project management and information flow. These two types of data differ in how they are organized, stored, and interpreted [45] (see Рис.1.8, Table 1.4).

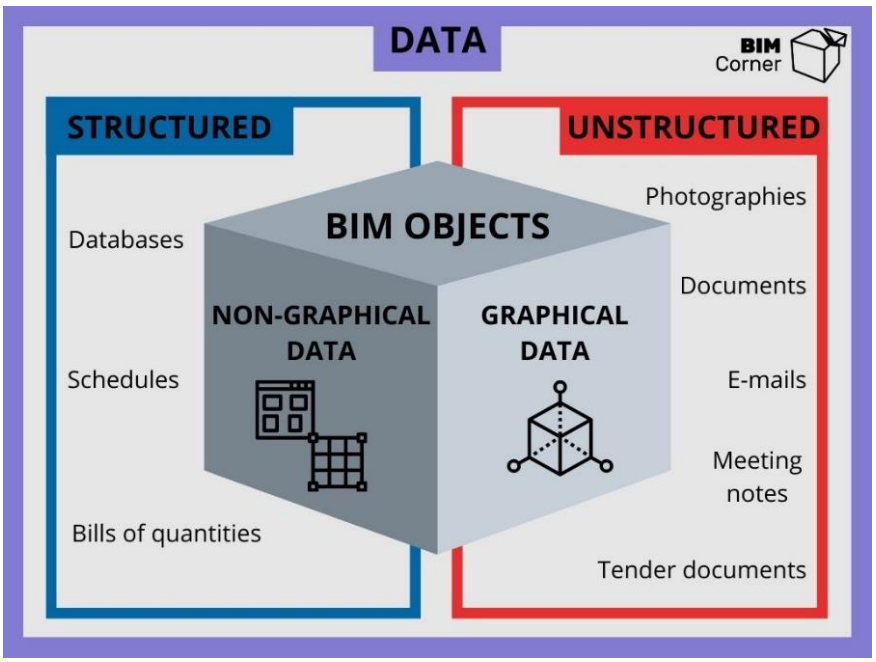


Figure 1.29. Structured and unstructured data and BIM objects [45]

Table 1.4. Comparative overview of traditional and cloud-based BIM (adopted from [45])

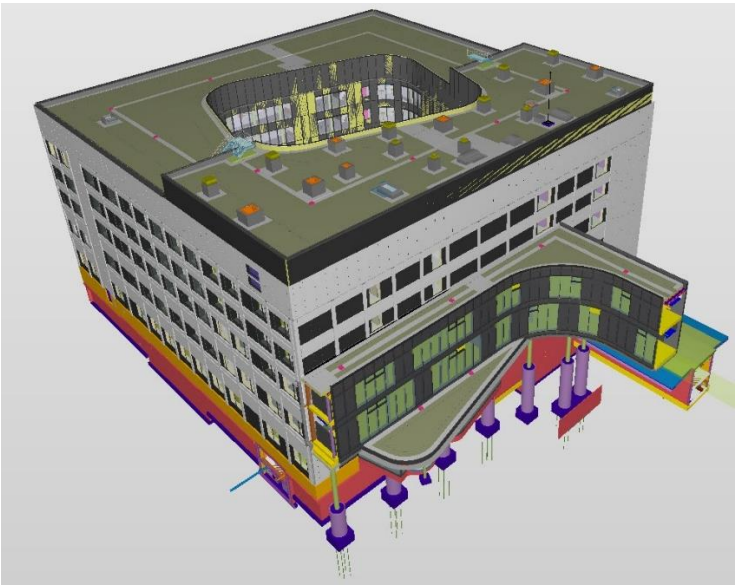
Structured Data	Unstructured Data
BIM objects (e.g., walls, doors, MEP items) BIM models (IFC, RVT with metadata) Bills of quantities (BOQs) Project schedules (e.g., Primavera, MS Project) Tender documents (with structured templates) Structured Excel spreadsheets (with defined headers and data types)	Photographs (e.g., site progress, defects) Meeting recordings (audio/video) Meeting notes (scanned or free-form text) E-mails (communications, instructions) PDFs (unstructured specifications, drawings) Unstructured Excel files (inconsistent formatting)

- **Structured data** (or data model) is organized according to a predefined schema, making it easy to store in databases and retrieve through queries. In the context of BIM, structured data typically includes BIM objects like walls, doors, or HVAC elements, each described by a set of attributes—such as dimensions, material, fire resistance, and location. This is often referred to as schema-on-write, meaning the data must fit into the structure before being entered. The main benefit of structured data is its simplicity of querying and automation, making it indispensable for tasks like scheduling, quantity take-offs, clash detection, and performance analysis [45].

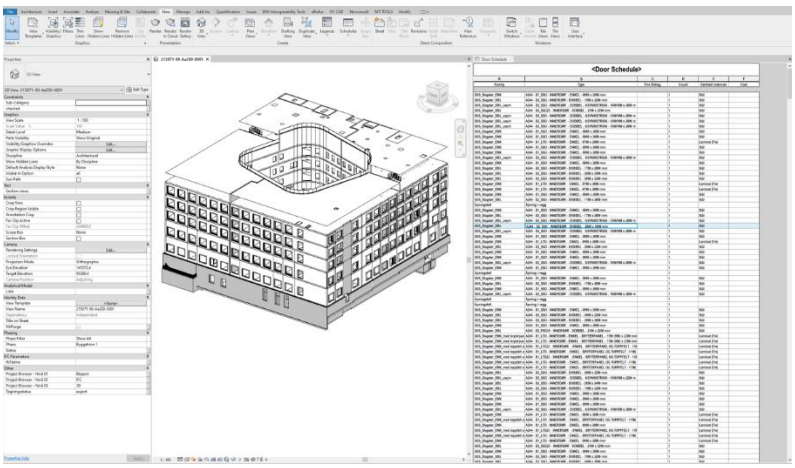
- By contrast, **unstructured data** does not follow a formal model or schema. It includes files such as photographs, PDFs, meeting notes, emails, and scanned documents. These are often stored in their native formats and require manual interpretation or advanced processing tools to extract useful information. This type of data is referred to as schema-on-read, as its structure is interpreted only when accessed. For instance, a photo of a construction site contains valuable insights—such as materials in use or site conditions—but this information must be interpreted by a knowledgeable human or an AI model [45].

BIM data is classified into graphical and non-graphical categories (Рис.1.9; [45]).

- **Graphical data** includes visual elements such as line styles, colours, symbols, and geometric representations. The main function of these elements is to facilitate distinguishing components within the model and facilitate spatial coordination, but they typically lack embedded structured metadata. The Level of Detail (LOD) in PAS1192-2 [10] defines how much graphical detail is required at each project stage.
- **Non-graphical** data encompasses the functional and descriptive attributes associated with model elements—such as material specifications, performance ratings, and maintenance requirements—which support decision-making across the asset's lifecycle. The Level of Information (LOI) in PAS1192-2 defines how much non-graphical data is required to be provided at different stages of the project.



a)



b)

Figure 1.30.Graphical (a) and non-graphical (b) data in BIM: example of general view of New Stavanger University Hospital and door schedule on Nye SUS project [45].

However, the term “information model” extends beyond this dichotomy [46]. According to PAS1192-2 [10], an information model comprises not only graphical and non-graphical data but also associated documents, all maintained within a Common Data Environment (CDE), as shown by Рис.2.10. This model evolves throughout a project’s lifecycle in two key forms:

- **The Project Information Model (PIM)** originates during design and is developed through the construction phase, capturing all project-related data across stakeholders.
- **The Asset Information Model (AIM)** emerges from the validated “as-built” data and serves asset operation and maintenance over the building’s life, as per PAS1192-3.

Together, PIM and AIM reflect the comprehensive digital representation of a built asset. To specify the necessary depth of this information, PAS1192-2 introduces the Level of Model Definition (LoMD)—a combination of LOD for graphical content and LOI for data attributes. In more details these terms will be discussed in the following sections (see Section 2.2).

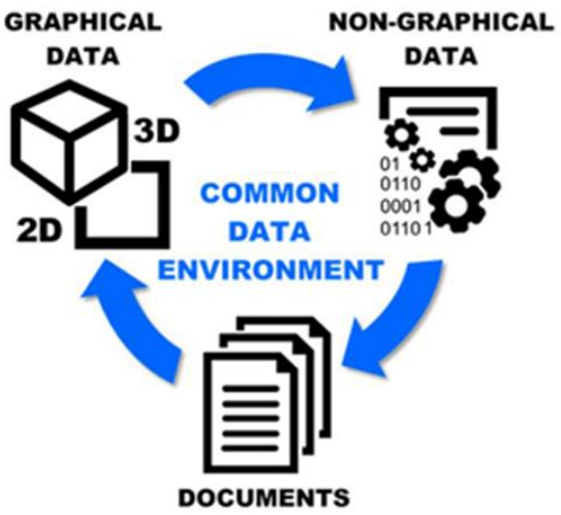


Figure 1.31. Graphical, non-graphical data and documents in CDE [46]

Thus, an information model is not merely a 3D BIM file. It is a federated structure of interoperable datasets—graphical views, embedded metadata, and external documents—that enable effective collaboration, asset tracking, compliance assurance, and informed decision-making across all phases of the built environment's lifecycle. Understanding the structure and components of the information model provides the foundation for a more holistic view of information management in construction. However, these data types do not exist in isolation or serve a single moment in time. Their true value emerges when we examine how they evolve, interact, and accumulate meaning across all stages of the asset lifecycle—from concept and design through construction, operation, and eventual decommissioning. This brings us to the next crucial aspect of digital construction: Data Across the Lifecycle.

Data Across the Lifecycle

Digital data is not static—it evolves with the asset, reflecting its physical state, performance, and contextual relevance over time. In BIM, this data follows the trajectory of the asset lifecycle, supporting informed decision-making at every stage: from early planning to end-of-life strategies (Рис.1.11). Leveraging this continuous data stream is critical for sustainability, resilience, and circular economy integration. Detailed description of main phases and streams of data exchange in BIM during lifecycle is given in Рис.2.12.

Figure 1.32. BIM during lifecycle [47]

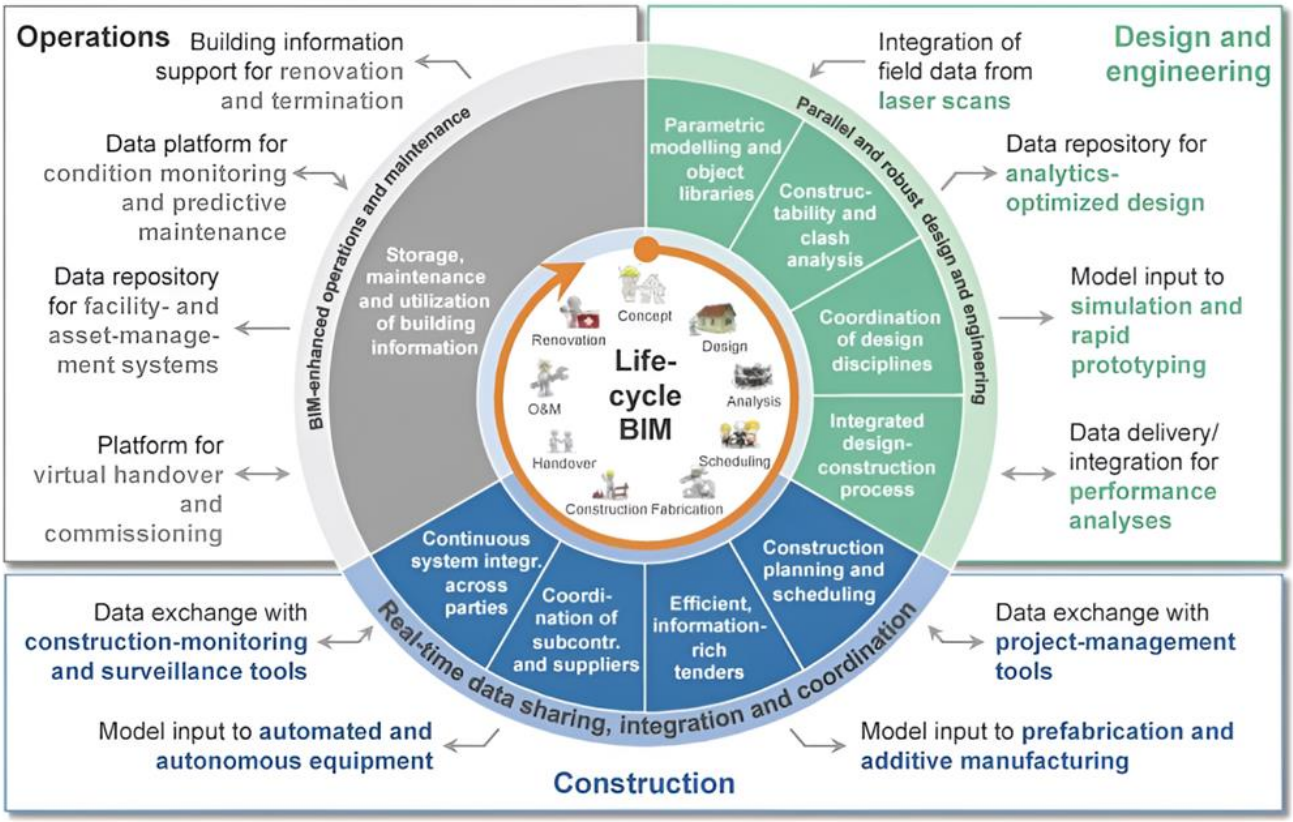


Figure 1.33. Main phases and streams of data exchange in BIM during lifecycle [48]

III. Design and Planning Phase

At the conceptual and detailed design stages, BIM models are the backbone of digital construction. They embed both geometric (3D) and parametric metadata, such as material properties, energy performance, environmental impacts, cost estimations (5D), time schedules (4D), and carbon metrics (6D). Recent studies emphasize the potential of BIM to accelerate Life Cycle Assessment (LCA) workflows during early design, where decisions have the greatest impact. However, most BIM-LCA studies still neglect End-of-Life (EoL) considerations. For example, Hossain and Ng reported that only 27% of BIM-based LCA studies included construction and demolition waste (CDW) [49]. This suggests a need to expand the data structures and naming conventions used in BIM models to enable complete LCA. Furthermore, standardized data ontologies—such as those proposed by Röck et al. (2018) and Densley Tingley & Davison (2012) —support material inventories for circular design and reuse potential [50,51]. Tools like Sakura, which assess Design for Disassembly (DfD) alternatives, show how BIM data can inform low-carbon, high-resilience design choices early on.

IV. Construction Phase

As the asset moves into construction, BIM evolves from a planning tool to a dynamic control system. Real-time updates enabled by real-time monitoring devices and on-site sensors ensure continuous data flow. This phase, hence, captures:

- Procurement data and logistics
- Construction sequencing and updates via 4D/5D BIM
- Installation protocols and Health & Safety documentation
- On-site changes and as-built verification via photogrammetry or laser scanning

Waste estimation tools integrated into BIM platforms (e.g., frameworks developed in [52]) can calculate construction waste generation by mapping model data to Waste Generation Rate (WGR) databases [33]. This allows for proactive waste reduction during the build phase. Moreover, the comparison of design alternatives using BIM—as demonstrated by Cheng and Ma, 2013—can highlight environmentally superior

construction strategies [53]. This provides value beyond geometry, influencing both the material footprint and logistical planning of the project.

III. Operation and Maintenance (O&M)

In the operational phase, BIM data transitions into a facility management (FM) resource (see Рис.2.13). Embedded metadata—such as manufacturer details, serial numbers, expected service life, and maintenance schedules—supports predictive and preventive maintenance, real-time performance monitoring through digital twins, change-of-use and retrofitting planning. In particular, FM in BIM enables [54]:

- increasing collaboration between the parties involved;
- improving decision-making processes;
- reduction of time and costs associated with interventions;
- facilitation smart and more effective maintenance;
- optimised space planning;
- reduction of energy consumption and improved user safety;
- identification of potential issues.

However, challenges persist. As Re Cecconi et al argue, integration between BIM and legacy Computer-Aided Facility Management (CAFM) tools is often weak [55]. Linking BIM with emerging technologies, such as digital twins (more details, - please, see next section) can resolve this by ensuring an up-to-date, spatially aware, and performance-driven FM system. Also, studies such as those by Marzouk et al. [56] have explored how BIM-based data can capture and track end-of-life (EoL) emissions of individual elements. This expands the role of BIM from mere asset management to environmental impact assessment, ensuring alignment with decarbonisation goals.

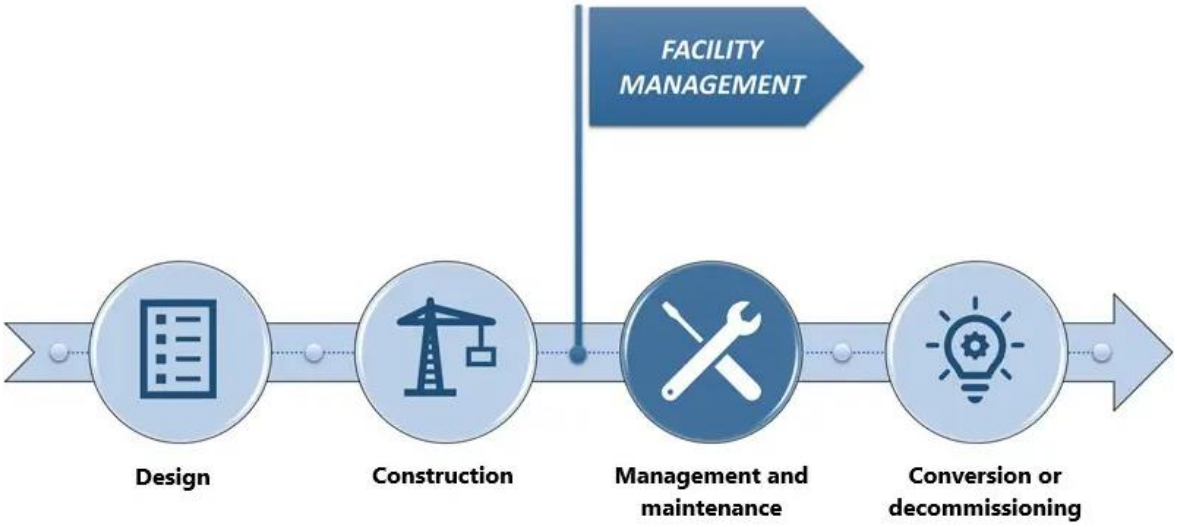


Figure 1.34. Facility Management in the BIM process [54]

IV. Refurbishment and Decommissioning

Towards the end-of-life (EoL) of an asset, BIM retains strategic value. It informs decisions about recycling, retrofitting, or safe demolition. High-quality BIM data can identify reusable components, support selective deconstruction, and improve construction and demolition waste (CDW) management. This supports circular economy principles and regulatory compliance, reducing waste and environmental impact [33]. According to Yeheyis et al. [58], a lifecycle-based Construction Waste LCA-based Sustainability Index (CWLSI) can guide stakeholders on material sorting, reuse potential, and environmental trade-offs. In particular, using environmental, social and economic sub-indices facilitates CDW decision-making assessment in relation to material selection, sorting, recycling, reuse and CDW treatment. In this scope, assuming default demolition values can lead to unreliable LCA outputs. Hence, BIM-based multi-step information exchange protocols and dynamic material passports can facilitate accurate waste quantification.

To complement this discussion, Рис.1.14 presents a holistic view of how Big Data flows across the facility lifecycle, interfacing with key business processes and digital technologies. The diagram highlights the interplay between planning, design, construction, operation, and decommissioning, mapped to associated data-intensive systems such as:

- CPMS (Capital Planning and Management System) – used in early "what-if" analysis and budget forecasting
- IPD/JOC (Integrated Project Delivery / Job Order Contracting) – used for cost estimation and collaborative delivery
- CAFM (Computer-Aided Facility Management) and CMMS (Computerized Maintenance Management System) – critical in O&M
- GIS (Geographical Information System) – linking spatial and automation data to decision-making.

Each phase generates, consumes, and reuses data that flows into a central "Big Data" ecosystem, which supports lifecycle-based asset management and sustainability strategies. Such an approach also reinforces the need for data interoperability across systems which remains a major challenge in real-world implementations—especially in retrofitting or extending service life in aging infrastructure. An emphasis should also be made on the cyber-physical integration required for resilient asset management.

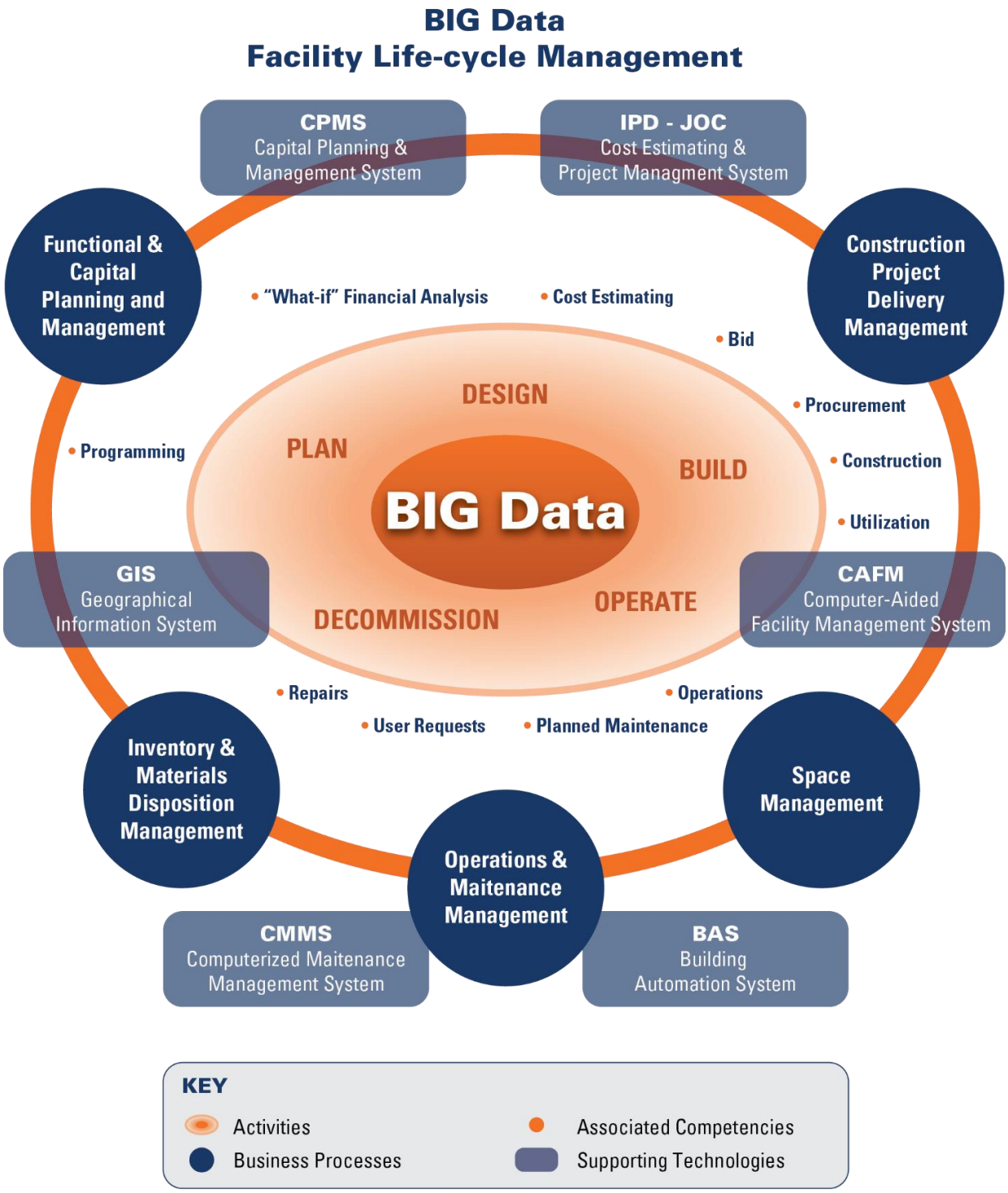


Figure 1.35. Data in BIM within the lifecycle: activities, business processes, associated competencies Facility Management in the BIM process (4Clicks Solutions in [57])

To comprehensively understand the role of BIM data throughout the lifecycle of built assets, Table 1.5 presents an integrated overview of key activities, data types, benefits, and challenges at each stage—from planning to decommissioning.

Table 1.5. BIM Data Across the Facility Lifecycle: Benefits and Challenges

Lifecycle Stage	Key Activities	Types of Data	Benefits	Challenges
Plan	Site selection, feasibility studies, budgeting	Spatial data, topography, program requirements, zoning	Improved strategic decisions, accurate forecasting, early risk identification	Data incompleteness, lack of integration with GIS and financial systems
Design	Concept, schematic & detailed design	3D geometry, material specs, energy models, design alternatives	Design optimization, clash detection, stakeholder visualization	Interdisciplinary coordination, model complexity, standards inconsistency
Build	Scheduling, procurement, construction	4D scheduling, 5D cost, logistics, QA/QC data	Reduced delays and cost overruns, better site coordination	Real-time updates, model–field disconnects, contractor BIM adoption gaps
Operate	Asset use, monitoring, helpdesk, user management	Real-time sensor data, asset registry, usage patterns	Operational efficiency, reduced downtime, occupant comfort	Integration with legacy systems, cybersecurity risks, high data volume
Maintain	Planned & reactive maintenance	Work orders, repair logs, failure histories, component IDs	Proactive maintenance, cost savings, asset lifespan extension	Inconsistent data capture, need for continuous updates
Optimize	Energy management, space utilization	Energy consumption, occupancy rates, performance KPIs	Energy cost savings, sustainability compliance, space efficiency	Complex analytics, system interoperability, data accuracy
Decommission	Repurposing, disposal, renovation planning	LCA data, material inventories, condition reports	Sustainable reuse, cost-effective end-of-life planning	Incomplete historical data, unclear ownership of digital models

In summary, the effective use of data across the facility lifecycle is foundational for enabling informed decision-making, optimizing resource allocation, and extending the service life of built assets. As illustrated, the integration of various data-centric systems—ranging from capital planning tools to automated maintenance platforms—highlights the shift toward a digitally interconnected ecosystem. However, realizing the full potential of lifecycle data hinges on how seamlessly these systems can interoperate and respond in

real time to changing operational needs and external conditions. This sets the stage for the next section, which explores the convergence of smart systems within the BIM environment. These technologies serve as critical enablers of real-time monitoring, automation, and adaptive control, further strengthening the role of BIM as a dynamic platform for resilient and intelligent infrastructure management.

1.4. Integrating Smart Systems into BIM: IoT, SCADA, and BMS Synergies

A central shift in modern construction and infrastructure management is the integration of smart operational systems—notably IoT (Internet of Things), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), and BMS (Building Management Systems)—into cloud-based BIM environments (Рис.1.15). This integration marks a departure from static design models to dynamic, data-rich ecosystems that enable real-time monitoring, predictive maintenance, and adaptive control across the life cycle of buildings and infrastructure. BIM platforms, when linked with IoT, AI, and GIS, evolve into interoperable digital twins, capable of mirroring physical systems in real-time [59]. This convergence underpins not only facility-level management but also city-scale simulations through City Information Models (CIM) [60]. These interconnected models provide a backbone for urban resilience, sustainability, and data-driven decision-making.

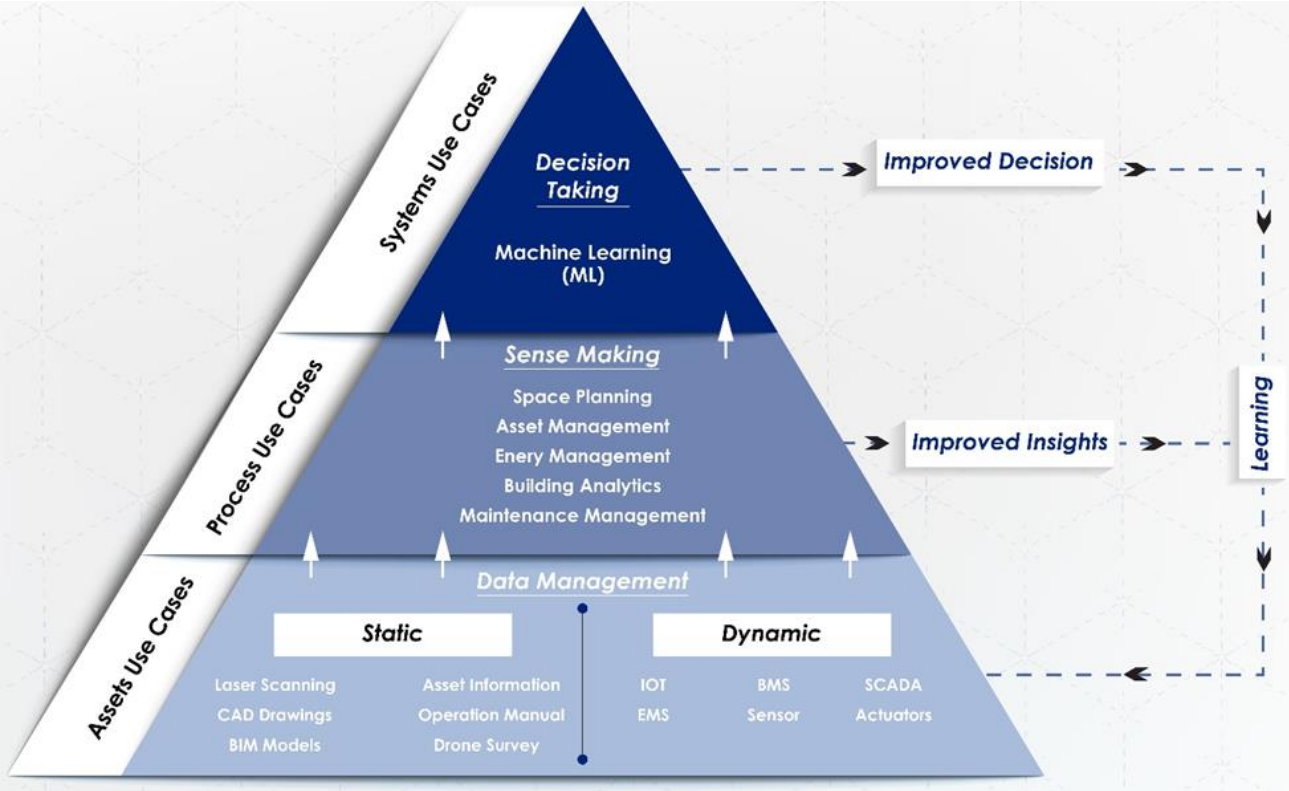


Figure 1.36. Integration of Smart Systems into BIM for improved decision-making [61]

Internet of Things (IoT): The Foundation of Smart Infrastructure

The Internet of Things (IoT) refers to a network of physical objects—such as sensors, devices, and systems—embedded with software and connectivity features that allow them to collect, exchange, and respond to data in real time. In the context of the built environment, IoT enables buildings to "sense" and monitor parameters like temperature, humidity, structural vibrations, energy consumption, and occupancy [59]. These interconnected devices communicate via the internet or local networks, making it possible to automate operations, support predictive maintenance, and enhance decision-making across all phases of the building lifecycle (Рис.1.16).

Integrating BIM with the IoT represents a transformative step in the digital management of existing buildings, particularly during the Operation and Maintenance (O&M) phase—the longest and most cost-intensive period of a building’s life cycle. As reported by Altohami et al, O&M accounts for up to 85% of the total project cost, primarily due to labour, material, and ongoing maintenance demands [62]. However, the data essential for efficient management during this phase often remains fragmented,

outdated, or manually collected, thereby hindering informed decision-making, particularly for retrofitting and renovation efforts.

Figure 1.37. IoT for construction asset [63] (ACCA software (n.d.))

To address these limitations, BIM–IoT integration has emerged as a viable solution, enabling real-time monitoring, predictive maintenance, and advanced energy management through the convergence of digital models and live sensor data via three-stage model [62]:

- Establishing Open Storage – Unified and semantically rich data repositories are developed based on industry standards (e.g., ISO 16739, ISO 12006), enabling structured data ingestion and retrieval.
- Gathering BIM and Live Data – Architectural, structural, and MEP data are digitized and integrated with IoT sensor information through techniques such as laser scanning, photogrammetry, and digital mapping.
- Feeding Live Data into Storage – A continuous flow of real-time data (e.g., from HVAC, occupancy, energy meters) is linked back to the BIM environment via Application Programming Interfaces (APIs) and relational databases, ensuring up-to-date digital twins.

Additionally, as building systems become more complex due to increasing sustainability and safety requirements, the integration of BIM with IoT is not merely

technical but also conceptual. It involves transitioning from static models to dynamic, data-driven environments, where digital twins enable simulation, performance tracking, and scenario planning. These capabilities are crucial for optimizing energy usage, which currently accounts for a significant share of global consumption in existing buildings [62,64].

When integrated with BIM, IoT provides a live feedback loop between the digital model and the physical environment. IoT sensors embedded in structures stream data into BIM platforms, allowing real-time visualization of key parameters such as temperature, stress, humidity, and occupancy [61,65]. This linkage empowers stakeholders to:

- Identify inefficiencies in energy or space use
- Simulate building performance under varying conditions
- Trigger alerts and interventions during anomalies (e.g., in disaster-prone zones)
- Inform lifecycle decisions from design through maintenance

The result is a self-aware infrastructure system, where BIM functions not just as a design tool, but as a continuously updated digital twin facilitating data-driven management.

However, certain challenges remain. Interoperability between heterogeneous systems, cybersecurity, and the need for skilled professionals are persistent barriers. Standardized protocols, robust data governance, and investment in workforce training are essential to overcome these issues and fully realize the potential of smart infrastructure [61,66]. To summarise key challenges, BIM–IoT integration faces hurdles:

- Cybersecurity: The real-time flow of sensitive data demands robust encryption and governance.
- Interoperability: Systems must adhere to common standards and protocols to function seamlessly.
- Scalability and Cost: High initial investment and technical complexity can inhibit widespread adoption.
- Skills Gap: Managing these technologies requires interdisciplinary expertise across IT, engineering, and data analytics.

In summary, the integration of IoT and BIM represents more than a technological enhancement—it marks a transformative shift in how infrastructure is conceived, monitored, and managed. By embedding real-time data flows into the fabric of the built environment, this convergence supports not only operational efficiency but also broader goals of sustainability, resilience, and human-centric design. As we move from passive assets to intelligent, self-adaptive systems, understanding the role of supervisory platforms becomes essential. The next layer of this transformation is shaped by Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, which provide the critical oversight and coordination needed to harness the full potential of distributed, data-driven infrastructures.

SCADA Systems in BIM Workflows: Toward Real-Time Operational Intelligence

As the complexity of building systems grows and the demand for real-time, data-driven decision-making intensifies, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems are emerging as vital components in BIM–enabled environments. Traditionally used in industrial automation and utility management, SCADA platforms are now increasingly integrated into smart building ecosystems to monitor, control, and optimize physical assets. Their ability to centralize telemetry data, issue control commands, and visualize system-wide operations in real time aligns seamlessly with the goals of BIM—particularly in the operation and maintenance phases of a building's lifecycle [67].

At their core, SCADA systems combine field sensors, remote terminal units (RTUs) or programmable logic controllers (PLCs), communication infrastructure, and a human-machine interface (HMI). Sensors capture physical parameters like temperature or flow rate, which are then processed by RTUs or PLCs [68](Inductive Automation. (2025); Figure 17). The data is transmitted via communication networks to an HMI, where operators can visualize it and take informed actions. This interconnected architecture allows for both real-time oversight and automated responses, enabling timely interventions and smoother operations.

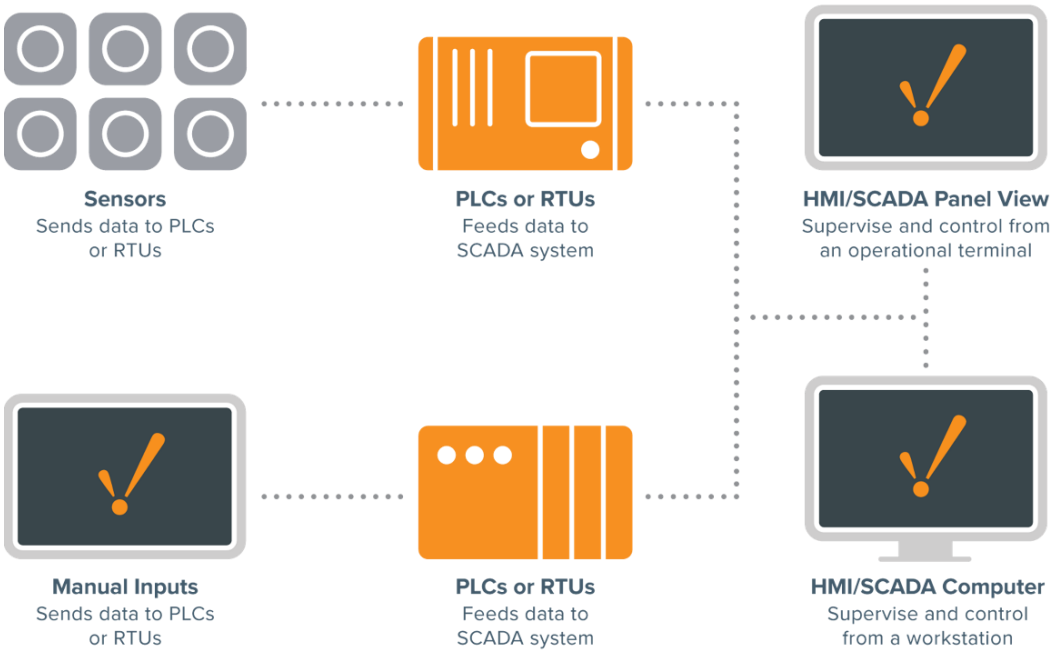


Figure 1.38. Basic SCADA Diagram [68]

Designing a SCADA system for construction requires careful selection of hardware compatible with site conditions, robust and scalable communication networks, and clear definitions of control logic tailored to the project's needs. Cybersecurity and maintainability are also critical considerations, given the exposure of these systems to both digital and environmental risks.

The SCADA architecture—often aligned with the Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) [69]—spans from Level 0 field devices to Level 4 business systems, providing a hierarchical structure that ensures consistent data flow and control from the physical layer to strategic management [70], see Рис.2.18:

- **Level 0 – Field Devices**: This foundational level includes physical devices like sensors that collect real-time data from the environment and actuators that perform control actions based on system commands.
- **Level 1 – Direct Control:** At this level, local control hardware such as Programmable Logic Controllers (PLCs) and Remote Terminal Units (RTUs) interact directly with field devices. They gather sensor data and issue control signals to actuators, often using dedicated processors or embedded systems for specific tasks.

- **Level 2 – Local Supervision:** This level encompasses supervisory systems that coordinate and monitor Level 1 controllers. It includes tools for alarm management, basic data analytics, and process visualization to support efficient local operations.
- **Level 3 – Site-Wide Control:** Here, centralized supervisory platforms consolidate data from across the site or facility. These systems provide high-level control, reporting, and interface with Human-Machine Interfaces (HMIs) while supporting alert systems and integration with plant-wide operations.
- **Level 4 – Operations Management:** Focused on production planning and coordination, this level bridges real-time operations with business management systems. It includes tools for scheduling, logistics, and broader process optimization.
- **Level 5 – Enterprise IT** (Outside SCADA Scope): Although not typically within the SCADA domain, this level involves enterprise-wide services—such as HR systems, customer relationship management (CRM), internal communications, and cybersecurity—usually hosted in corporate data centers.

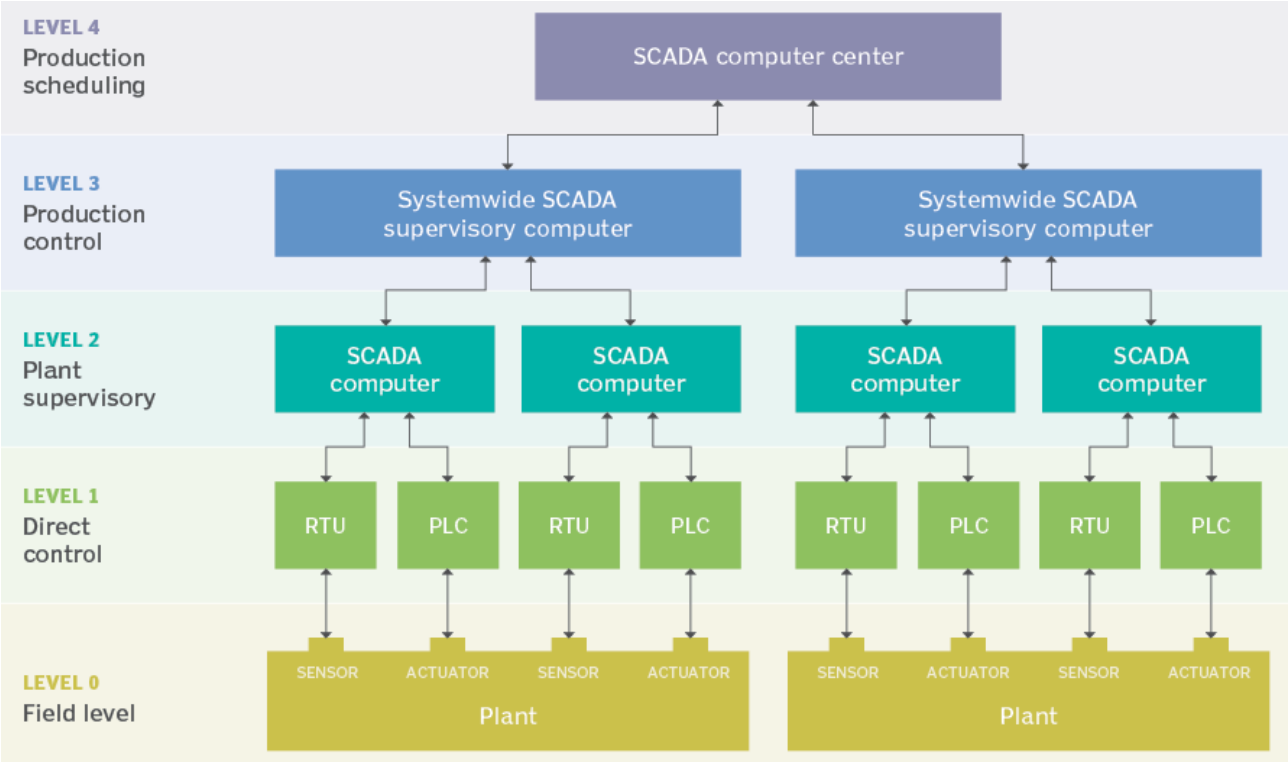


Figure 1.39. Layers of SCADA system architecture [70]

Modern SCADA systems have evolved beyond their original function of basic control and monitoring. Today, they are deeply integrated with cloud computing, Internet

of Things (IoT) platforms, and edge computing, enabling remote operation, scalable data storage, and predictive maintenance. These capabilities are especially critical in sectors such as energy, water management, manufacturing, and transportation—where failures can result in significant financial loss and societal disruption. In such high-stakes environments, SCADA systems not only ensure operational efficiency and continuity but also enable the development of resilient digital infrastructure, particularly in remote or hazard-prone areas. Unlike legacy monolithic architectures, contemporary SCADA platforms are modular, interoperable, and capable of supporting standard communication protocols and web-based interfaces. This modularity facilitates seamless integration with other digital technologies including BIM, Geographic Information Systems (GIS), and AI-driven analytics. While traditional SCADA relied on wired infrastructure, current deployments increasingly support wireless connectivity and distributed logic, aligning with the principles of smart infrastructure [68].

In the construction sector, SCADA systems bring significant operational benefits [67]. They automate routine tasks, minimize downtime through early fault detection, and enable predictive maintenance strategies. Real-time alerts—triggered by anomalies such as overheating or gas leaks—not only reduce equipment wear but also enhance on-site safety. Over time, energy optimization and improved resource utilization contribute to substantial cost savings.

A key advancement lies in the integration of SCADA with BIM [67]. This fusion transforms static digital models into dynamic management tools by embedding real-time sensor data—such as temperature, voltage, or pressure—within the 3D spatial context of infrastructure assets. This integration supports not only visual analytics but also predictive intervention, ensuring more agile and informed decision-making. A practical illustration comes from the integration of SCADA with BIM and digital twins in medium-voltage/low-voltage substations. In this scenario, live electrical parameters were visualized within the BIM environment, supporting risk assessment and enhancing safety [71]. Similarly, dynamic BIM models linked to SCADA systems can detect equipment faults, such as crane malfunctions, and trigger updates that inform maintenance scheduling or real-time workflow adjustments. This concept aligns with the Dynamic

Digital Twin paradigm, wherein BIM is no longer a static design artifact but an actively updated system that mirrors real-time conditions through automated feedback loops. Such dynamic integration of the physical and digital layers is essential for achieving adaptive and resilient infrastructure management [72]. SCADA-enabled systems are increasingly used for monitoring HVAC performance, managing concrete curing and material flow, and tracking the operational status of heavy machinery. When paired with BIM, these applications gain a contextual interface, enhancing visibility across construction and operational phases [67].

However, several implementation challenges remain [73]. Fragmented equipment ecosystems, frequent site layout changes, and varying communication standards hinder seamless deployment. Addressing these issues requires investment in modular architecture, the use of open communication protocols, and targeted staff training. Cybersecurity is also a key concern, necessitating robust encryption, secure network design, and protection of field-level devices.

Looking forward, SCADA systems are set to play a central role in smart construction environments. Cloud-based platforms now support centralized monitoring across distributed sites. The convergence with AI and machine learning enables systems to move from reactive monitoring to predictive analytics and autonomous control. Augmented Reality (AR) is beginning to visualize live data on-site, while IoT devices expand the range of measurable variables, from structural stress to environmental conditions. Realizing the full potential of SCADA–BIM integration requires the adoption of standardized semantic frameworks and interoperable data models [74]. Aligning SCADA telemetry with BIM object properties is of prevalent importance to enable meaningful analysis and responsive automation. This effort supports the broader vision of Big BIM Data, where SCADA feeds cloud-based analytics platforms to optimize facility performance and lifecycle strategies.

The integration of SCADA into BIM creates a cyber-physical ecosystem in which digital models are not merely passive records but active components of operational intelligence. This synergy empowers stakeholders with contextual, real-time insights that improve safety, performance, and sustainability. As digital infrastructure evolves, the

BIM–SCADA connection will underpin the next generation of Building Management Systems (BMS), orchestrating diverse subsystems—such as HVAC, lighting, energy, and security—into unified, intelligent environments.

The Role of BMS in BIM-Enriched Environments

Building Management Systems (BMS), also referred to as Building Automation Systems (BAS) or Building Automation Control Systems (BACS) are centralized, computer-based platforms that connect to a facility hardware and subsystems through sensors and actuators, collecting real-time operational data and executing predefined control logic ([75], Рис.1.19). This data-driven orchestration enables precise regulation of temperature, lighting levels, energy flows, and access control functions that were traditionally managed in isolation. Modern BMS implementations extend beyond energy optimization: they ensure occupant comfort, streamline maintenance, and provide actionable insights into building performance [76]. When paired with BIM, the BMS gains a spatially contextualized interface, allowing operators to monitor and control systems through an intuitive 3D environment. Instead of sifting through disconnected dashboards, facilities managers can interact with digital twins of assets and spaces, visualizing live parameters such as temperature deviations, CO2 levels, or equipment malfunctions within the geometric model of the building. This fusion facilitates better-informed decision-making and faster response times, especially in complex facilities such as hospitals, airports, or high-rise office towers. Advanced BMS platforms, hence offer real-time energy monitoring, IoT-enabled device integration, and centralized control across distributed systems [76]. In such configurations, data from HVAC sensors, motion detectors, or solar inverters is relayed to the BMS, which can issue real-time adjustments or predictive maintenance alerts. When this intelligence is mapped onto a BIM model, stakeholders from engineers to facility managers can gain operational transparency and control at both the micro and macro levels [77].

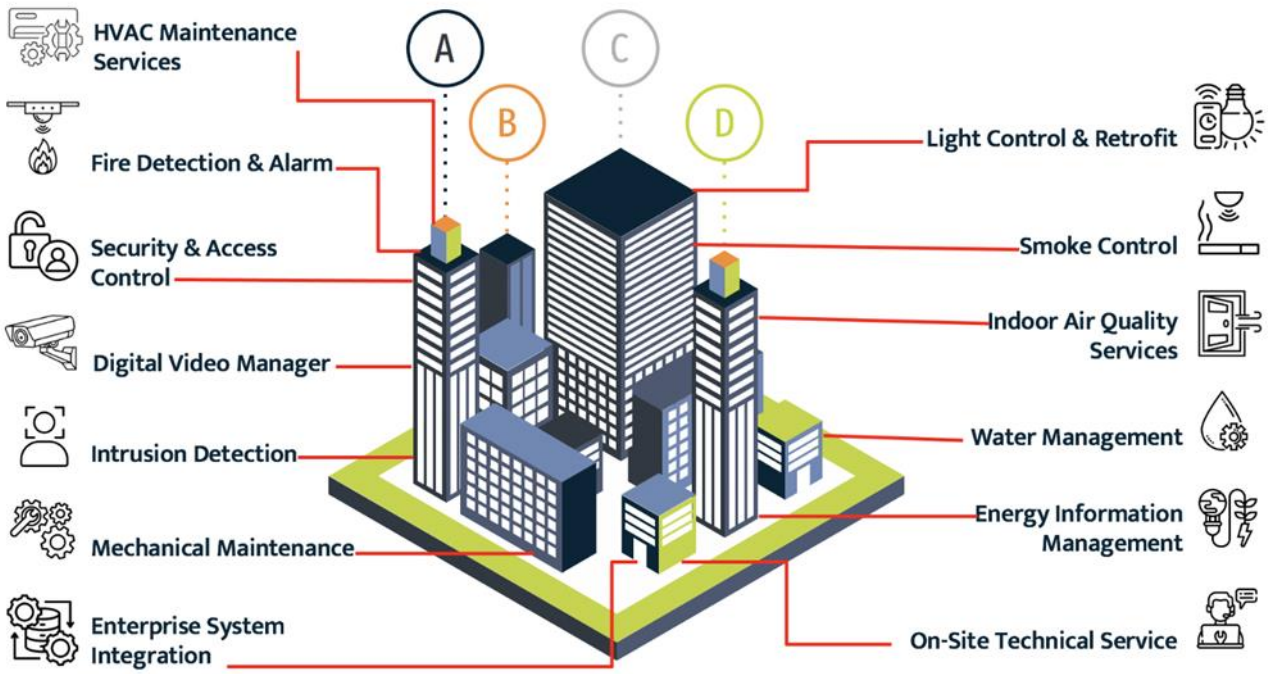


Figure 1.40. Building Management Systems (BMS)[76]

The architecture of a BMS is typically layered into three levels: field, automation, and management (Рис. *1.20*). At the field level, various sensors (e.g., for temperature, humidity, occupancy, air quality) and actuators (e.g., valves, dampers) interface directly with the building's environment, collecting real-time data and executing control actions. These components feed into the automation level, where programmable controllers—often Direct Digital Controllers (DDCs)—aggregate and analyze this data against predefined setpoints and conditions. The controllers then issue commands to optimize system performance, such as adjusting airflow rates or switching lighting schedules. This mid-layer ensures responsive control and system coordination. The highest is the management layer, which provides a graphical user interface (GUI) through Human-Machine Interfaces (HMIs) or web applications. This layer allows users to visualize system performance, respond to alarms, and make high-level operational decisions. Advanced BMS platforms also offer trend analysis, reporting tools, and integration with cloud-based platforms, which are essential features for implementing AI and predictive maintenance workflows [78].

The hardware backbone of a BMS includes control panels, typically housed in plant rooms, which centralize data processing and controller logic [75]. Sensors deployed

throughout the building track environmental variables, while actuators and meters perform localized control and monitoring. These components are linked through a communication infrastructure, which may be wired (e.g., Ethernet) or wireless (e.g., Zigbee, Wi-Fi), depending on building layout and operational requirements. In retrofit scenarios, wireless systems often offer faster deployment with less disruption to occupants and infrastructure. The communication between BMS components is governed by standardized protocols such as BACnet and Modbus, which ensure interoperability between diverse devices and manufacturers [78]. These protocols define how data is structured, exchanged, and understood, allowing legacy systems to interface with modern IoT devices reliably. BACnet, in particular, has emerged as a widely adopted protocol in smart building environments due to its robust support for HVAC, lighting, and security integrations.

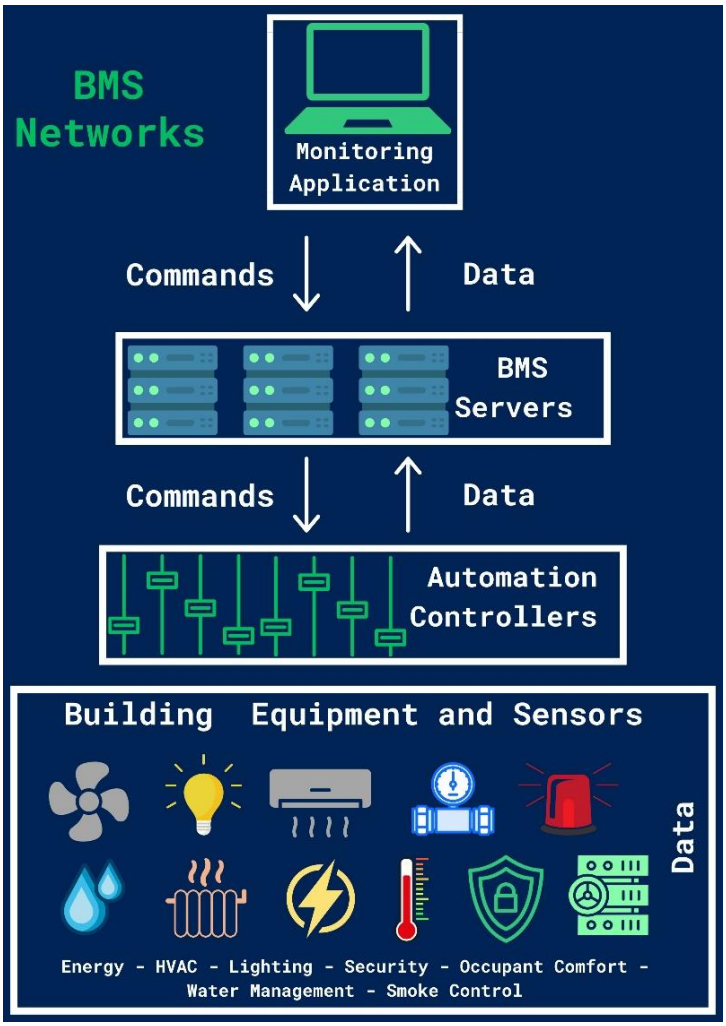


Figure 1.41. BMS architecture [78]

The implementation of a modern BMS brings numerous operational, economic, and environmental benefits ([78], Table 1.6). One of the most critical advantages lies in energy efficiency. A well-integrated BMS automates and optimizes the operation of key mechanical and electrical systems, such as HVAC, lighting, and power distribution. By enabling processes like occupancy-based temperature adjustments and intelligent lighting controls, a BMS significantly reduces energy consumption. Techniques such as smart scheduling and demand-controlled ventilation help fine-tune system performance and minimize energy waste, leading to substantial cost savings over time. Beyond energy management, BMSs improve occupant comfort by maintaining consistent indoor environmental conditions. The ability to automatically regulate temperature, humidity, and air quality based on real-time data creates a healthier and more productive indoor environment. Moreover, BMSs contribute to safety by integrating emergency systems—like smoke detectors and fire alarms—into a centralized platform, enabling swift, coordinated responses during critical events. Routine monitoring and self-adjustments also reduce the risk of system malfunctions. Operational efficiency is another key benefit. BMS helps reduce maintenance costs and prolong equipment lifespan by facilitating predictive maintenance and early fault detection. Facility managers gain access to centralized data, which simplifies compliance with audits and supports strategic decision-making. Regulatory compliance, particularly with stringent energy and emissions standards, is also made easier through automated reporting, positioning buildings as environmentally responsible and increasing their market value. Furthermore, BMS platforms provide improved asset management by tracking performance metrics and enabling ISO 55000-aligned processes. Enhanced security features, such as controlled access and real-time surveillance, ensure the protection of both occupants and infrastructure.

Despite their benefits, BMS implementations come with inherent challenges ([78], Table 1.6). One of the primary hurdles is integration complexity—especially in older buildings not originally designed for centralized automation. Compatibility issues between legacy equipment and modern systems require thoughtful planning and

sometimes costly retrofits. Traditional BMSs also often fall short in advanced energy analytics and fault localization. For instance, detecting the root cause of thermal anomalies—such as pinpointing a faulty air handling unit—may not be straightforward without enhanced analytics. Cost remains a notable concern. High upfront investments are required, particularly for advanced and fully integrated systems. While these costs are typically offset by long-term operational savings, they can be a barrier to adoption, especially in smaller facilities. Moreover, effective use of a BMS hinges on staff training. Operators must understand how to interpret the system's outputs and act upon them in a timely and informed manner. To address these challenges, it is essential to select scalable and open-platform BMS solutions that allow future upgrades and third-party integration. Vendor support for training and lifecycle services also plays a critical role in ensuring long-term value. With careful planning and investment in human and technical resources, the challenges associated with BMS implementation can be mitigated [75].

Table 1.6. Integration of BMS: Benefits and Challenges

Category	Benefits	Challenges
Energy Management	- Reduced energy consumption via automation - Lower utility bills	- Legacy systems may lack compatibility - Complex integration with existing infrastructure
Occupant Comfort	- Stable indoor climate - Automated adjustment based on occupancy or schedule	- Requires ongoing calibration - Needs user feedback for optimal settings
Operational Costs	- Predictive maintenance reduces downtime - Longer equipment lifespan	- High initial installation cost - ROI may be delayed without proper tuning
Safety & Security	- Centralized fire, smoke, and intrusion detection - Improved emergency response	- Cybersecurity risks increase with connectivity - Complex system management
Compliance & Reporting	- Supports green certifications - Automated data logging for regulations	- Requires staff training to interpret and use data correctly
Asset Management	- Data-driven decisions - Integration with ISO 55000 frameworks	- System upgrades can be costly - Vendor lock-in risk if using proprietary solutions

Globally, regulatory requirements for BMS implementation vary. In the United States and United Kingdom, there is currently no general legal obligation to install a BMS in commercial buildings. However, the European Union has taken a more proactive stance. Under the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) [79], all tertiary buildings with an effective rated output exceeding 290 kW are required to integrate BACS by January 2025. This directive, adopted in 2020, reflects the EU's commitment to improving building energy efficiency and reducing emissions. As member states transpose the directive into national law, BMS implementation is becoming mandatory for a growing number of properties, especially hotels, offices, and warehouses [78].

The cost of installing or upgrading a BMS depends on several factors [78]. Building size and type are key determinants; larger and more complex facilities, such as hospitals or data centers, naturally incur higher costs due to their operational demands. Another factor is the extent of integration required—systems that connect with lighting, HVAC, fire safety, and access control features will be more expensive to install but offer higher long-term returns. System openness is another important cost variable. Open, non-proprietary platforms typically provide better long-term value by supporting third-party integrations and analytics capabilities. The installation environment also plays a role—retrofitting older buildings tends to be more expensive than deploying BMS in new constructions due to legacy system challenges. Generally, BMS installation costs range between $2.50 and $7.50 per square meter. For buildings over 50,000 square feet, these investments are often recouped through operational efficiencies. Selecting the right vendor and technology suite is thus critical for balancing upfront cost with long-term benefits.

Several global companies lead the BMS industry (Table 1.7), offering sophisticated and widely adopted solutions. These companies are instrumental in shaping the global BMS market through innovation, scalability, and cross-sectoral application [78].

Table 1.7. Major BMS Providers

Company	Strengths
Honeywell	Global reach; strong automation and energy solutions. Owns Trend (UK/IE).
Johnson Controls	Metasys system; strong in global HVAC and energy management.
Schneider Electric	EcoStruxure platform; emphasizes IoT and smart grid integration.
Siemens	Desigo and Synco systems; known for deep industry integration.
Emerson	Focused on high-performance facilities and energy-efficient control.

In conclusion, Building Management Systems (BMS) are evolving from static control platforms into intelligent, adaptive ecosystems enabled by IoT, AI, and machine learning. These technologies enhance system responsiveness, predictive capabilities, and overall energy performance, while also supporting decarbonization and climate resilience targets. As buildings become increasingly data-rich and interconnected, BMS serve not only as tools for operational efficiency but as enablers of long-term sustainability and occupant-centric design. Integrating BMS into the BIM environment further amplifies their value, transforming traditional models into dynamic, cyber-physical systems. This convergence sets the stage for the next frontier in built environment intelligence—Digital Twins (DT), which offer a real-time, bidirectional bridge between physical assets and their virtual counterparts.

Digital Twins for Real-Time Asset Management

Digital Twins (DT) represent the most advanced layer in the digital evolution of construction and facility management. Unlike static digital models, DTs create a living, continuously updated virtual representation of a physical asset-be it a component, system, or entire building-by integrating real-time data from sensors, IoT devices, and BMS (Рис.1.21). This continuous data exchange enables not only real-time monitoring but also advanced simulation, predictive analytics, and automated decision-making.

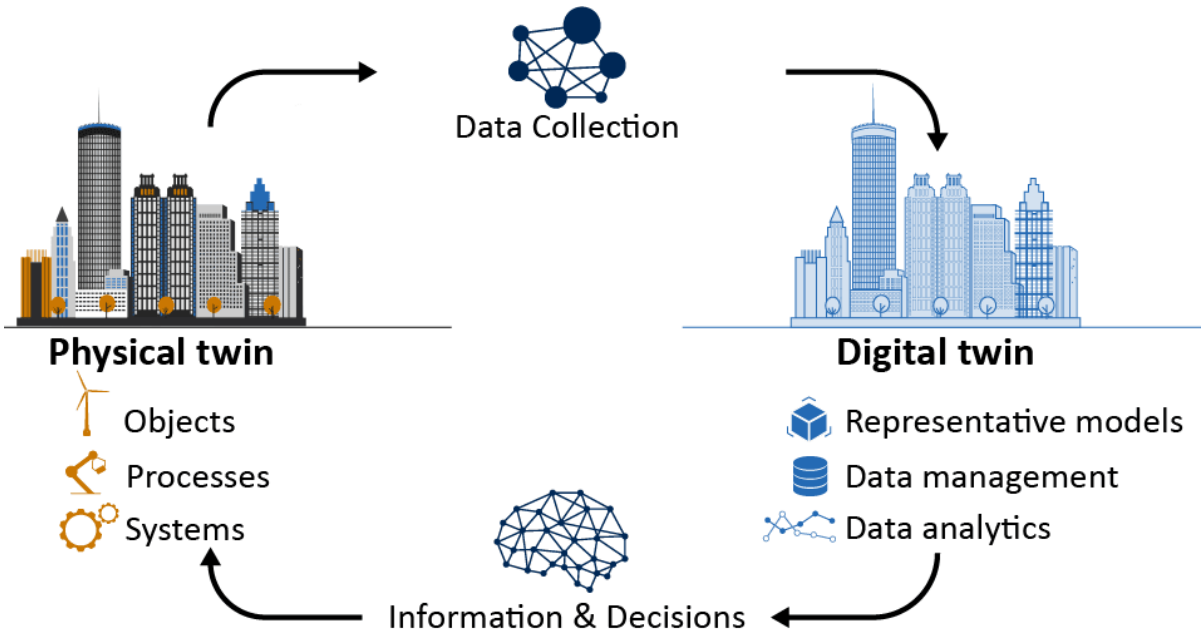


Figure 1.42. DT for real-life assessment [80]

Digital twins are generally categorized based on their scope and application [81]:

- **Product digital twins** replicate individual physical assets and are widely used in manufacturing to test and optimize product performance under various conditions.
- **Process digital twins** simulate workflows such as production lines or supply chains, enabling real-time process optimization and efficiency gains.
- **System digital twins** combine product and process models to represent entire systems, allowing for integrated analysis and management of complex interactions.

In addition to these core categories, more specific types are emerging [81]. For example, **Performance Twins** focus on continuous monitoring and predictive maintenance, **Operational Twins** deliver real-time operational insights to optimize response and resource use, and **Environmental Twins** simulate environmental impacts and guide sustainability strategies.

In industrial settings, DTs enhance productivity and resource efficiency, enabling real-time simulations that help production plans adapt dynamically to changing conditions. By streamlining communication across the supply chain and allowing early identification of inefficiencies, they reduce material waste and operational delays. Digital twins also facilitate virtual commissioning of equipment, simulate tracking systems, and improve overall coordination within and across production units. DTs impact on asset

management lies in consolidation of real-time data on equipment condition and performance, reducing the time and cost of maintenance. By forecasting future maintenance needs and optimizing intervention schedules, they reduce unplanned downtime and extend asset lifespan. Furthermore, digital twins improve operational safety by minimizing the risks associated with unexpected failures, while also enabling continuous improvements in asset quality and system performance [81].

DTs can be defined by the presence of three fundamental elements [82]:

- **A Physical Counterpart:** Every digital twin must be tied to a real-world asset, whether it is a building, bridge, machine, or urban system. This physical entity is not just a conceptual model but an actual operational object that generates data through sensors, usage, and interaction with its environment.
- **A Digital Representation:** This is a high-fidelity, dynamic model that mirrors the physical asset in virtual space. It contains not only geometric and material information (as in BIM) but also behavioural, operational, and performance data. The digital representation evolves in parallel with the real object, reflecting changes such as wear, usage patterns, or environmental influences.
- **A Real-Time, Bi-Directional Connection (the "twin relationship"):** The key differentiator of a digital twin lies in its live link to the physical counterpart. Data flows from the physical asset to the digital model through embedded sensors and IoT systems. This enables real-time updates and status monitoring. Crucially, the link is bi-directional: information, insights, and even control actions from the digital model can influence or inform the physical asset. This creates a feedback loop that supports predictive maintenance, optimization, and autonomous decision-making.

Therefore, while BIM focuses on structured modelling and semantic representation of built assets, digital twins extend this by incorporating real-time sensor data and simulation capabilities. This allows for dynamic interaction with the physical world, making DTs not just static models but responsive systems. The evolution from BIM to digital twins can be summarised along three dimensions:

- **Scope:** BIM focuses on the physical and structural aspects of built assets, while DTs include operational, environmental, and behavioural components.

- **Communication:** DTs support bi-directional data flows between physical and virtual environments, enabling real-time updates and predictive analytics.
- **Structure:** While BIM relies on standardized, static data structures, DTs are dynamic systems capable of adapting to changing inputs and conditions.

The functionality of a Digital Twin is deeply reliant on the robustness of its underlying digital infrastructure. IoT ensures comprehensive data capture from the built environment, while BMS acts as the operational backbone that controls and responds to that data. Together, these layers feed into the DT, allowing it to simulate future states, test scenarios, and optimize performance without interfering with the physical system. As such, DTs provide a unique capability to visualize and evaluate building behaviour over time, identify maintenance needs before failures occur, and plan for adaptive upgrades or emergency responses with unprecedented accuracy.

As DTs become increasingly embedded in the AEC industry and asset management practices, their role in optimizing performance, reducing risks, and improving decision-making is widely acknowledged. DTs offer a transformative shift from reactive to proactive asset management by integrating real-time sensor data, predictive analytics, and intelligent simulations. They allow stakeholders to visualize, test, and adjust the operation of physical assets before making real-world interventions, enhancing safety, efficiency, and sustainability. However, the deployment of DTs also introduces a new set of technical, financial, and organizational challenges. These include high implementation costs, data integration complexities, cybersecurity risks, and the need for specialized skills. Moreover, scaling DTs across large infrastructure networks or public systems raises concerns around interoperability, data privacy, and long-term maintenance. The following Table 1.8 outlines the major benefits and challenges associated with DT implementation, offering a balanced view of their potential and limitations.

Table 1.8. Digital Twins in Real-Time Asset Management: Benefits vs. Challenges

Benefits	Challenges
Real-time monitoring and control of assets, leading to improved operational efficiency.	**High initial cost** of deployment, including sensors, data infrastructure, and modeling tools.
Predictive maintenance through data analytics reduces downtime and prolongs asset life.	**Data integration complexity**, especially when combining legacy systems, IoT devices, and BIM data.
Simulation of future scenarios helps in planning and risk mitigation.	**Cybersecurity risks** due to continuous data exchange and connectivity.
Improved decision-making via insights derived from real-time and historical data.	**Skilled workforce requirement** to build, manage, and interpret DT systems.
Enhanced collaboration across stakeholders through shared virtual models.	**Lack of standardization** in data formats, protocols, and interoperability across platforms.
Sustainability optimization by tracking energy use, emissions, and environmental impacts.	**Scalability issues** for large or complex infrastructure networks.
Faster response in emergencies by modeling real-time asset behavior and forecasting.	**Dependence on sensor quality and coverage** for accuracy and reliability.
Support for circularity and lifecycle planning through continuous monitoring.	**Ethical and privacy concerns** related to data collection and use in public assets.

To conclude, Digital Twins represent a significant advancement in the evolution of digital asset management, moving beyond static models to dynamic, data-driven systems that support predictive maintenance, informed decision-making, and real-time responsiveness. While their implementation poses challenges, the potential for improving the performance and resilience of infrastructure is substantial. The effectiveness of Digital Twins is amplified through cloud-based platforms and AI algorithms, enabling not just visualization but also intelligent forecasting and decision-making support. This sets the stage for a deeper dive into the role of connected workflows and cloud-based BIM platforms in enabling seamless data integration, collaboration, and system-wide optimization.

CHAPTER 2. SMART SYSTEMS, CLOUD WORKFLOWS, AND COLLABORATION IN BIM

2.1. Cloud-Based BIM Platforms and Connected Workflows

The rapid growth of emerging technologies and patterns of increasing BIM implementation in construction projects underscores the increasing demand for automated, integrated, and cloud-enabled BIM solutions capable of supporting real-time collaboration, scalability, and intelligent data workflows across the project lifecycle [83].

The digital transformation of the construction sector, therefore, has been accelerated by the adoption of cloud-based technologies, and one of the most significant developments in this domain is the emergence of cloud-based BIM platforms. These platforms have redefined collaboration by providing shared digital environments where all stakeholders—architects, engineers, contractors, and facility managers—can access, modify, and contribute to project data in real time, regardless of their physical location. Traditionally, BIM environments operated in silos, where design data had to be manually exchanged via files, often leading to errors, version control issues, and delays in coordination. The advent of cloud-based BIM has changed this paradigm by introducing centralized, always-accessible data repositories hosted on scalable, high-performance infrastructure. This allows project partners to work simultaneously on federated models, improving transparency, decision-making, and speed of delivery across the entire project lifecycle [60,84].

Cloud-BIM systems integrate various BIM functionalities—design coordination, model checking, quantity estimation, site reporting, and facility management—into a single digital workflow. Platforms such as Autodesk Construction Cloud, Graphisoft BIMcloud, Trimble Connect, and BIMServer.org exemplify this integrated approach [87]. These platforms enable not only document storage and access but also structured workflows for issue tracking, clash detection, construction sequencing, and asset data integration [86,88]. The central value of cloud-based BIM lies in its ability to streamline complex, multidisciplinary coordination (Figure 2.1). For example, Autodesk BIM 360 offers modules like "Docs" for document control, "Design" for model coordination, and "Build" for site operations, all within a unified environment [87]. These tools facilitate

connected workflows that link planning, design, construction, and operations into a continuous, data-rich process [89].

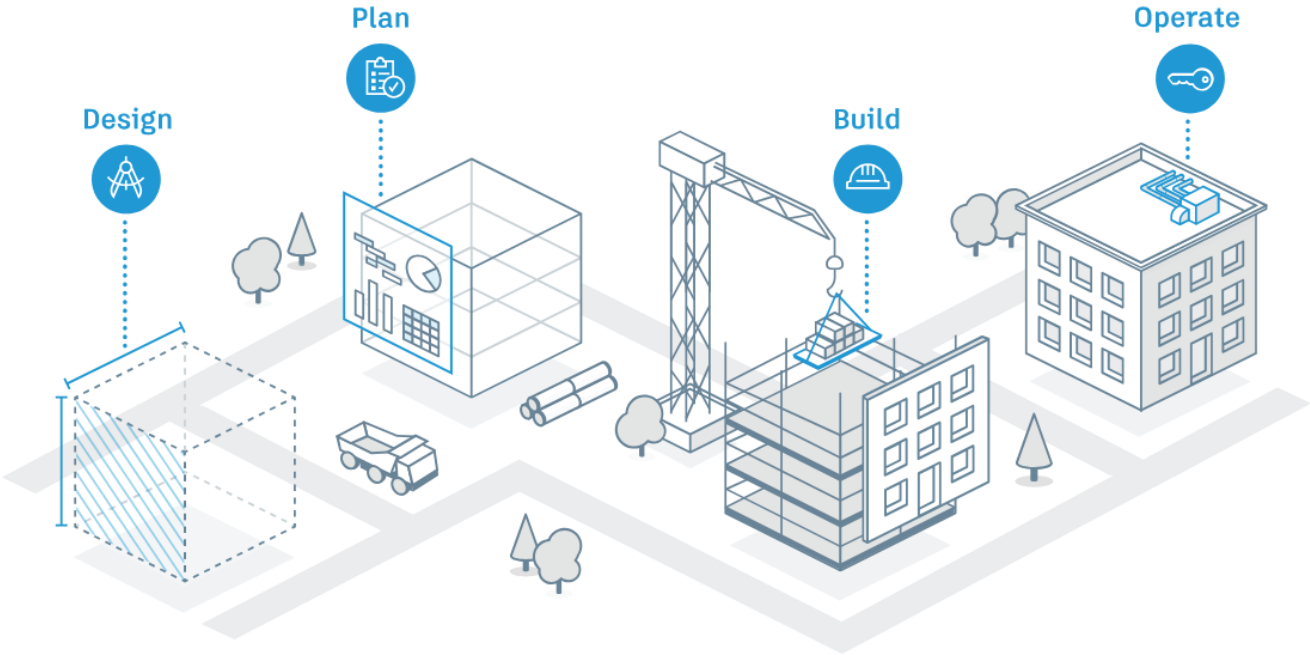


Figure 2.1. Philosophy of Cloud-Based BIM Platforms and Connected Workflows in Autodesk Construction Cloud [89].

The benefits of adopting cloud-BIM are well documented. These platforms support real-time access to models, enabling users to visualize, comment on, and update project elements with immediate feedback from collaborators. This real-time environment reduces the risk of working with outdated information and minimizes conflicts among trades. Project teams gain enhanced traceability through centralized issue logs, version histories, and activity dashboards, which are particularly beneficial for quality control, compliance auditing, and reporting during construction and operation [83,87].

Cloud-BIM Approaches for Data Flow Integration

From a technical standpoint, cloud-based BIM facilitates distributed data sharing using several methods. Afsari et al. classify these into three main categories: **manual file transfer** (often through IFC files), **BIM server technologies**, and **data interchange hubs** (Figure 2.1) [84]. Manual file transfers rely on exporting and importing files between systems—typically in open standards such as IFC—while BIM servers act as centralized databases that manage model versions and updates. Examples include

Autodesk Revit Server and BIMServer.org. A more recent approach involves data interchange hubs such as Flux, which automate synchronization between design tools (e.g., Revit, Rhino) in near real time via application plugins.

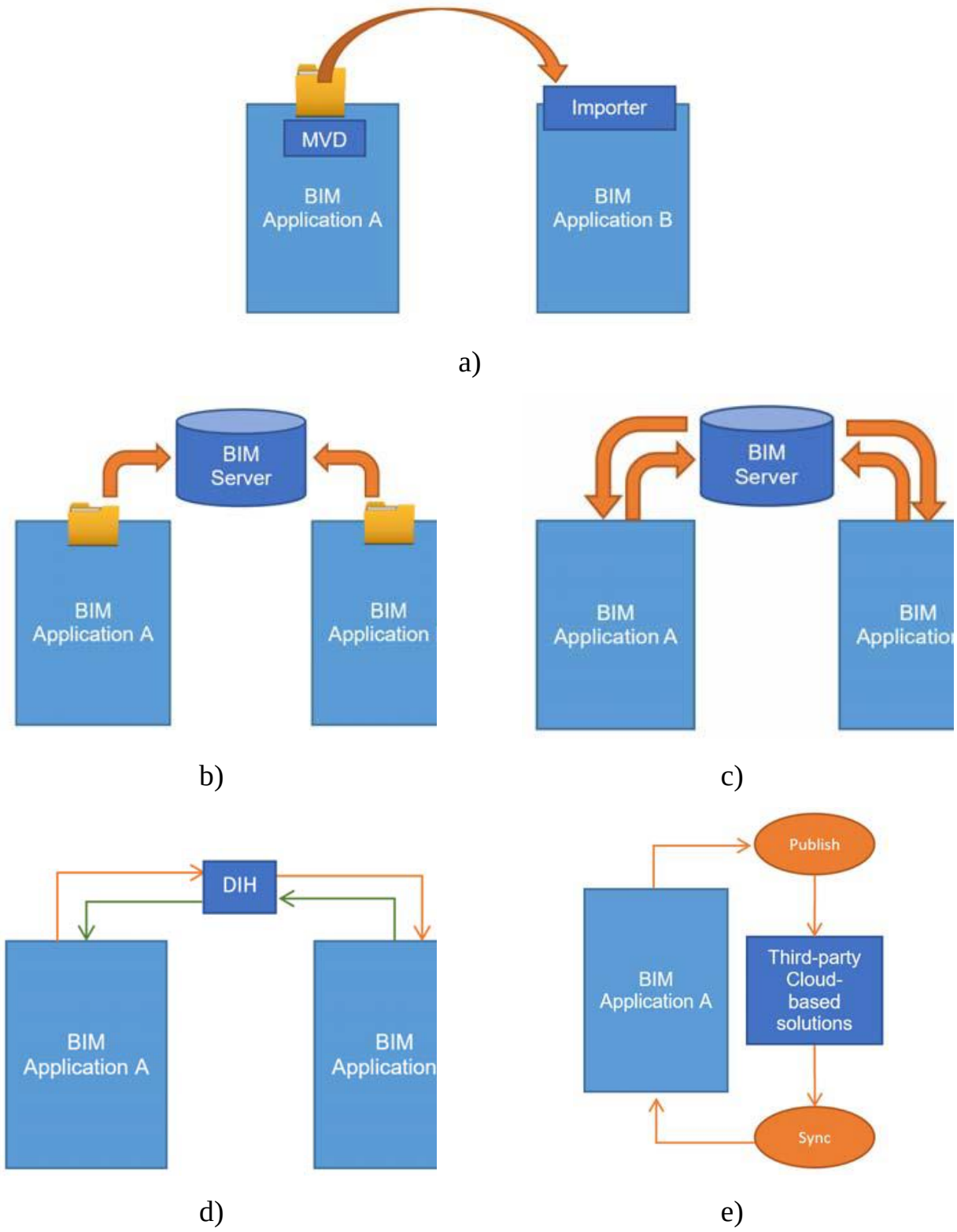


Figure 2.2. Cloud-BIM approaches for data flow integration [84]: a) manual file transfer; b) BIM server technology in data transmission between applications

developed by different vendors. c) the same, - by one vendor d) Integration data flow for Data Interchange Hub (i.e. Flux) solution; e) third-party Cloud-based BIM solutions.

Each of these methods has strengths and limitations (Table 2.1). Manual file-based workflows can adhere to open standards like IFC and MVDs, supporting vendor-neutral data exchange, but they tend to be static and unidirectional, requiring repeated manual updates with every model iteration. BIM servers improve centralization and data querying but face scalability and interoperability issues when managing large, federated models. Data interchange hubs enable real-time synchronization but are often limited by platform dependency and narrow software support [84]. A useful comparison of cloud-BIM integration approaches is provided below (see Table 2.1).

Table 2.1. Comparison of Cloud-BIM data integration methodologies (adopted from [84])

Integration Approach	**Description**	**Strengths**	**Limitations**
Manual File Transfer	Export/import of models using IFC or native formats	Platform-neutral, widely adopted	One-way updates, versioning conflicts, high coordination cost
BIM Server Technologies	Centralized repositories storing model data (e.g., BIMServer, Revit Server)	Real-time collaboration, version control	Limited scalability, proprietary format constraints
Data Interchange Hubs	Real-time syncing using plugins/APIs (e.g., Flux, BIM 360 Design Collaboration)	Real-time updates, task-based syncing	Narrow tool compatibility, vendor dependency

Beyond the BIM data integration tools designed for seamless cross-platform data exchange and multidisciplinary collaboration, a range of third-party cloud-based solutions have also emerged (Figure 2.2., e). These purpose-built tools connect with BIM authoring software via plug-ins, enabling the extraction and transfer of model data into dedicated environments where advanced or specialized services—such as analytical functions—can be performed.

Cloud-based BIM: Challenges, Advantages and Mitigation Strategies

As the AEC industry rapidly transitions towards digitalization, cloud-based BIM platforms have emerged as critical enablers of integrated, collaborative, and lifecycle-driven project delivery. These platforms transform how data is created, accessed, managed, and analyzed across multiple stakeholders and disciplines. Their evolution represents a shift from isolated design tools to interconnected digital ecosystems that support complex infrastructure and smart city development [88, 90]. The integration of BIM with cloud infrastructure, therefore, introduces a new paradigm of connected workflows. Cloud-based platforms enhance the design–build–operate continuum by offering (see Figure 2.3):

- **Real-time, location-independent collaboration:** Project teams can co-author models, assign tasks, and resolve issues in real time, regardless of their geographic location. This leads to faster decision-making, fewer delays, and improved coordination between stakeholders [86].
- **On-demand, scalable data storage:** Cloud platforms eliminate the need for expensive on-premises servers, offering elastic storage that adapts to project demands. This supports long-term data archiving, large model file handling, and version control [87].
- **Automated synchronization and issue management:** Integrated model checking, clash detection, and issue tracking tools reduce manual errors and streamline quality control throughout design and construction.
- **Mobile and IoT-enabled site integration:** Through mobile devices and connected sensors, field teams can access up-to-date models and receive real-time data from the construction environment. This supports tasks like progress tracking, safety monitoring, and maintenance planning [88].

These capabilities contribute to a more coordinated, transparent, and efficient project environment, ultimately reducing delays and lifecycle costs.

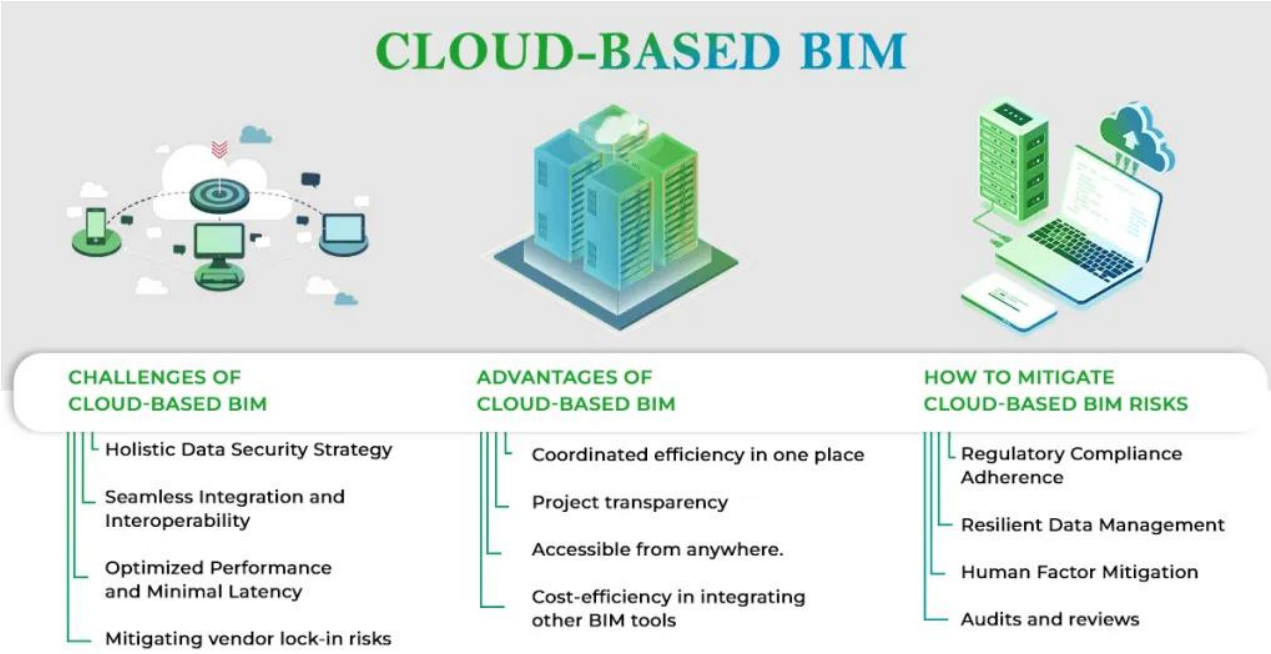


Figure 2.3. Cloud-based BIM: challenges, advantages and mitigation strategies [88].

Despite these advancements, several challenges persist. One of the most pressing issues is interoperability. While open standards such as IFC have enabled data exchange across platforms, many cloud BIM applications are still developed with proprietary schemas that hinder seamless integration. Furthermore, governance concerns, such as model ownership, access rights, and data privacy, remain unresolved in many regions. These issues are particularly critical in cloud environments where multiple stakeholders from different organizations are simultaneously editing and reviewing project models [60,84]. Data security is another important concern. Cloud-based BIM platforms must ensure secure user authentication, access control, and data encryption, especially when dealing with sensitive infrastructure or contractual information. Some platforms now integrate role-based access systems and audit trails to address these needs, but standardization and legal frameworks are still catching up with the technology. The most widely recognised limitations and challenges, hence, can be summarized as follows:

- **Interoperability:** Although standards like Industry Foundation Classes (IFC) support data exchange, many cloud BIM applications still rely on proprietary schemas, complicating integration across platforms and disciplines [60].

- **Data governance:** Ambiguities around model ownership, access control, data liability, and revision history pose significant risks. Without well-defined legal and procedural frameworks, trust among stakeholders is difficult to establish [84].
- **Cybersecurity:** Cloud-based systems must ensure data confidentiality and integrity through robust encryption, multi-factor authentication, and secure APIs. Sensitive project data (e.g., government infrastructure) demands high levels of security, which are not uniformly enforced across vendors [86].
- **Skills gap and adoption barriers:** Small firms and public-sector organizations often lack the expertise or financial resources to deploy and maintain cloud-based workflows effectively. Standardized training and digital literacy initiatives are needed.

To address the persistent challenges in implementing cloud-based BIM platforms, several risk mitigation strategies must be systematically applied [87]. First and foremost, ensuring regulatory compliance is critical. This includes adherence to international standards and local regulations concerning data protection, digital transactions, and cybersecurity. Legal frameworks are often still evolving, and project stakeholders must remain vigilant in updating policies to remain compliant throughout the asset lifecycle.

Another key area is the implementation of resilient data management strategies. This involves using robust cloud storage systems with redundancy, regular backups, and failover mechanisms to protect data integrity against potential losses or cyberattacks. Decentralized or distributed storage infrastructures may also be employed to improve resilience and accessibility. Human factor mitigation plays a vital role in safeguarding cloud-based systems. Many errors in BIM workflows arise from incorrect access, poor digital literacy, or mishandling of sensitive information. To minimize these risks, organizations should invest in structured digital training programs and enforce role-based access control to limit model editing to authorized personnel.

Finally, continuous auditing and review protocols are essential. Regular checks of user activities, model changes, and system access logs can identify irregularities early, reinforce accountability, and ensure transparency in model governance. These reviews also support quality assurance, especially in multi-stakeholder environments where many users interact with the model simultaneously [87]. By integrating these mitigation

strategies into the project's digital infrastructure plan, cloud-based BIM platforms can offer not only enhanced collaboration and efficiency but also secure, compliant, and future-ready workflows. To summarize the shift, the Table 2.2 contrasts traditional BIM systems with modern cloud-based workflows.

Table 2.2. Comparative overview of traditional and cloud-based BIM

Feature	Traditional BIM	Cloud-Based BIM
Access	Desktop-based, single location	Web/mobile access, simultaneous multi-user collaboration
Storage	Local servers, file duplication	Scalable, centralized cloud repositories
Collaboration	Sequential, document-driven	Concurrent, real-time co-authoring and commenting
Integration	Limited to design phase tools	Interoperable with GIS, IoT, AI, and facilities systems
Model Updates	Manual file uploads and version control	Automatic sync, version tracking, and change history
Security	Local security protocols	Cloud encryption, access roles, and audit trails
Use Cases	Design documentation	Digital twins, predictive maintenance, smart cities

Cloud-based BIM, hence, represents not only a technological shift but a fundamental rethinking of how construction information is generated, shared, and utilized. By enabling integrated, data-rich workflows that span the entire building lifecycle, it offers a path toward more efficient, collaborative, and resilient infrastructure delivery. However, for this potential to be fully realized, issues related to interoperability, governance, and long-term sustainability of data must be addressed through ongoing standardization efforts and research.

2.2. BIM Information Models and Environments: PIM, AIM, CDE, and BEP Explained

In a digital construction environment, information must be systematically generated, managed, exchanged, and preserved throughout a project's lifecycle. BIM provides a framework for this through structured information models and collaborative environments. Four key components that underpin this process are: the Project Information Model (PIM), Asset Information Model (AIM), the Common Data

Environment (CDE), and the BIM Execution Plan (BEP). Understanding the distinctions and connections between these is critical to effective information management in AEC projects. This framework is governed internationally by ISO 19650, which builds upon the earlier UK-based PAS 1192 standards. While PAS 1192 introduced guidelines to meet the immediate needs of the building industry, ISO 19650 expanded this into a globally recognized system that formalizes collaborative information management across the asset lifecycle. ISO 19650 is structured into several parts [91], see Figure 2.4:

- ISO 19650-1 outlines the core concepts and principles of information management, including definitions for AIM, PIM, and CDE, as well as the stages of maturity in BIM adoption.
- ISO 19650-2 focuses on the delivery phase of projects, detailing the implementation of BEPs, MIDPs (Master Information Delivery Plans), and TIDPs (Task Information Delivery Plans) to manage design and construction information workflows.
- ISO 19650-3 addresses the operational phase, where the AIM becomes the central source for managing post-delivery asset data, linking to facilities management and ongoing maintenance.
- ISO 19650-4 defines the processes for information exchange, particularly the Exchange Information Requirements (EIR), and aligns these with delivery and operational phases.
- ISO 19650-5 adds a layer of security protocols, ensuring that information is handled with integrity, especially in sensitive infrastructure projects.

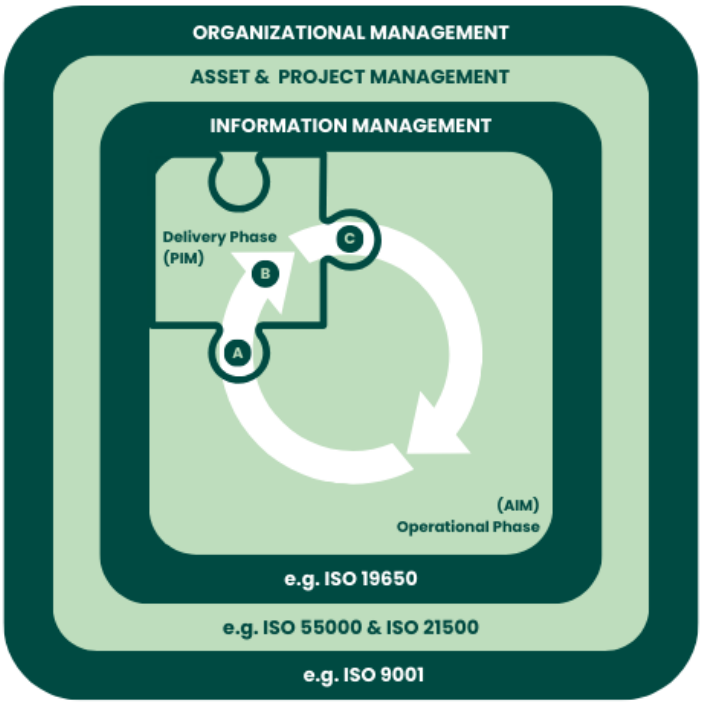
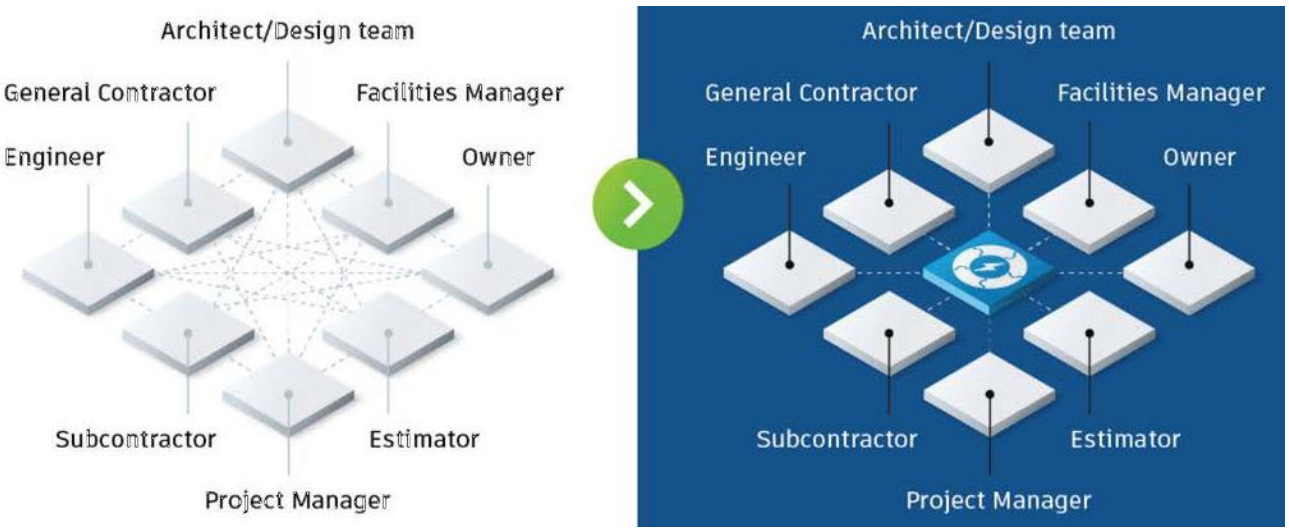


Figure 2.4. ISO 19650 in Asset Lifecycle BIM: A: start of delivery phase — transfer of relevant information from AIM to PIM; B: progressive development of the design intent model into the virtual construction model; C: end of delivery phase — transfer of relevant information from PIM to AIM [91].

The Role of the Common Data Environment (CDE) and BIM Execution Plan (BEP) in Digital Construction Workflows

A **Common Data Environment (CDE)** is a centralized digital platform specifically designed to host, manage, and share all project-related information in construction workflows [92]. Acting as a single source of information, it consolidates both graphical (e.g., BIM models, drawings) and non-graphical (e.g., reports, contracts) data, ensuring every stakeholder has consistent, up-to-date access to project information throughout the asset's lifecycle [91]. CDE – Common Data Environment). The CDE enhances collaboration by integrating data, teams, and workflows into a cohesive digital ecosystem. By reducing duplication, enabling version control, and standardizing communication, the CDE improves project quality, reduces risks, and accelerates decision-making. This centralized system supports everything from initial design to construction and facility management, offering real-time updates and role-based access controls for secure, traceable data exchanges [93] (Figure 2.5).



a) *b)*

Figure 2.5. Traditional (a) information flow versus common data environment (b) [93].

A CDE typically comprises two interconnected components. The first is the information management environment, responsible for the organization, storage, and version control of documents and data. This may include file repositories, Electronic Document Management Systems (EDMS), or data integration platforms. The second component is the project management environment, which supports scheduling, task management, dashboard reporting, and facilitates the overall BIM process management. Solutions that integrate these two components provide greater workflow continuity and reduce the complexity of managing multiple systems [94].

A robust CDE captures a wide range of data, typically grouped into [94]:

- **Design and Documentation:** 2D/3D models, clash detection outputs, specifications, and contracts.
- **Project Transparency Assets:** Site photos, change orders, communication records. These data allows for remote monitoring, ensures transparency and clear communication and provides a historical record of the project.
- **Operational and Asset Information:** Component metadata, maintenance logs, and as-built data for post-construction use. this group of information targets facility management, aiding in future operation and maintenance, knowledge sharing and continuous improvement in future projects

Adoption of a CDE, hence, delivers several key benefits [93, 94]:

- Enhanced Collaboration: Enables multi-disciplinary teams to access, review, and update data in real time—eliminating data silos.
- Data Integrity and Transparency: Role-based access control and audit trails foster trust, accountability, and data security.
- Improved Efficiency and Quality: Real-time data sharing, BIM integration, and automation minimize rework and support timely decisions.
- Risk Reduction: Centralized control over document flow reduces inconsistencies and improves regulatory compliance.
- Scalability and Reusability: Historical project data stored in the CDE can be reused to improve future project planning, benchmarking, and performance analytics.

When selecting a CDE solution, key technical criteria include usability, scalability to accommodate projects of varying size and complexity, seamless integration with existing software tools, robust security features, and reliable vendor support. As the construction industry increasingly embraces digital transformation, implementing a standardized and efficient CDE is essential for improving project delivery outcomes and ensuring interoperability across diverse teams and technologies.

Importantly, the effective use of a CDE requires adherence to defined standards and processes, which are formalized within the BIM Execution Plan (BEP). The BEP specifies the chosen CDE platform, user roles, access rights, information classification schemes, naming conventions, and protocols for validation and information exchange. These rules align with international standards such as ISO 19650, which defines the requirements for managing information over the lifecycle of built assets, ensuring consistent and controlled data management practices.

The **BIM Execution Plan (BEP or BXP)** is a foundational project document that defines how Building Information Modeling (BIM) will be implemented throughout a construction project (see Figure 2.6). It serves as a comprehensive roadmap that translates the client's BIM objectives into actionable processes, roles, responsibilities, and workflows tailored to the project's specific context—whether it is new construction, rehabilitation, subdivision, or other types of developments [95]. The BEP's primary purpose is to ensure the successful deployment of BIM by establishing a collaborative

framework that aligns all project participants—from architects and engineers to contractors and facility managers—on the expectations and methodologies for BIM use. It specifies how information will be created, exchanged, managed, and validated during each phase of the project lifecycle, from initial programming and design through construction, operation, and maintenance. Hence, **key elements of the BIM Execution Plan** include [95]:

XI. Project Context and BIM Objectives- The BEP begins by defining the scope, duration, and BIM goals of the project. This includes identifying all stakeholders, with particular emphasis on those responsible for BIM coordination and management, such as BIM managers and coordinators.

XII. Roles and Responsibilities- It delineates the responsibilities of each stakeholder involved in the BIM process, clarifying who produces, manages, and reviews BIM deliverables at each project stage. This includes defining the level of authority and accountability in managing BIM workflows.

XIII. BIM Work Methodology and Information Exchange- The BEP outlines the processes and protocols for model development, collaboration, and data sharing. It addresses critical questions: What data is required? Who needs it? When should it be delivered? How should data be structured and validated? This includes defining the coordination procedures to integrate multidisciplinary models effectively.

XIV. CDE and Collaboration Platform- The document specifies the digital environment and tools to be used as the CDE for storing, sharing, and managing project information. This section covers technical aspects such as platform capabilities, data security measures, access control, insurance and liability considerations, and system lifespan.

XV. Software Tools and Exchange Formats- The BEP lists all software applications employed by the project team and specifies exchange formats for interoperability, typically native formats or open standards such as IFC (Industry Foundation Classes).

XVI. Level of Development (LOD) and Level of Information (LOI)- It defines the expected model detail and information richness at each project phase, setting benchmarks for the quality and completeness of BIM deliverables (see section 1.2).

XVII. BIM Deliverables and Documentation- The plan enumerates the specific BIM outputs, such as coordinated models, drawings, schedules, and reports, ensuring clarity about deliverables, submission deadlines, and review cycles.

XVIII. Project Milestones and Schedule- The BEP includes a timeline for BIM-related tasks and key milestones, coordinating BIM activities with overall project management schedules.

XIX. File Naming and Data Management Protocols- It establishes conventions for file naming, version control, annotation standards, and data transfer mechanisms to maintain consistency and avoid ambiguity (see section 1.3).

XX. Quality Assurance and BIM Coordination Procedures- The plan incorporates processes for model validation, clash detection, issue resolution, and iterative reviews to maintain BIM integrity and minimize errors.

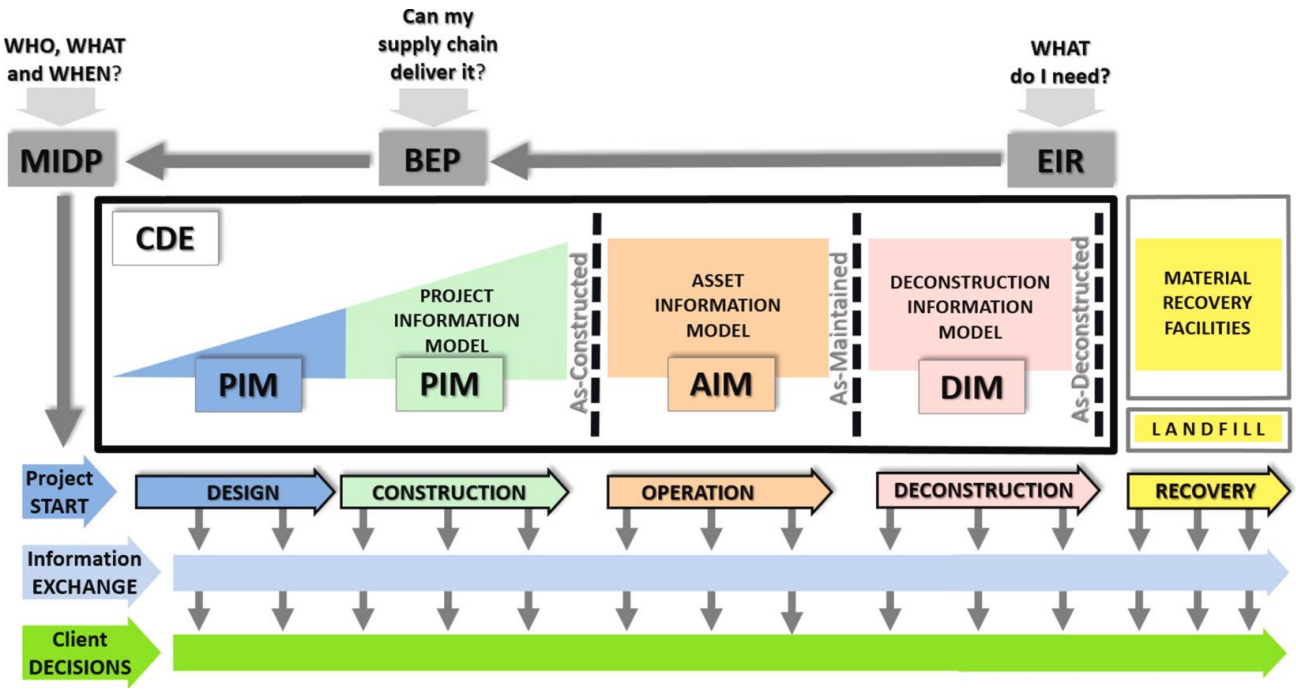


Figure 2.6. Schema of Information Delivery Cycle in the Asset Lifecycle (PAS 1192 in [92,96].

In real-world application, the BEP serves a function similar to an RFI (Request for Information) or RFP (Request for Proposal), tools commonly used in the Information Technology and procurement sectors. It is developed as a direct response to the Employer's Information Requirements (EIR), which articulate the client's expectations and objectives for the BIM process [97]. The EIR sets the stage, and the BEP responds by detailing how those expectations will be met in terms of processes, roles, deliverables, and timelines (see Figure 2.6). At the beginning of a project, the owner typically provides a template or outline expressing the intended outcomes of BIM integration. Based on this, the design team or contractor formulates a tailored BEP that lays out the entire execution strategy—from modelling responsibilities and collaboration methods to data handling procedures and quality control protocols. This document then becomes an operational guide for the project's digital delivery, ensuring alignment between all involved stakeholders. The BEP typically evolves in two major phases: Pre-Contract and Post-Contract [97].

I. In the **Pre-Contract phase**, potential suppliers prepare an initial BEP in response to the EIR, outlining their proposed methods and capabilities. This version is more strategic and demonstrates the bidder's understanding of the client's needs and the project's digital requirements.

II. Once the contract is awarded, **the Post-Contract BEP** is developed in greater detail. It integrates with the Master Information Delivery Plan (MIDP), which sets out who is responsible for generating what information, when it will be delivered, and in what format. This is supported by Task Information Delivery Plans (TIDPs) from individual teams, which specify the finer details of each deliverable.

While not legally mandatory in all projects, when adopted, the BEP becomes a binding framework for BIM management. It introduces a high level of transparency into what is traditionally a fragmented process. First, it supports on-time and on-budget delivery by offering a shared framework for coordination. Everyone involved, from architects to contractors, understands their scope, expected contributions, and timelines. This clarity is particularly valuable when there are scope adjustments or unforeseen changes, as the BEP provides a consistent reference point to manage such developments

without derailing the project. In essence, the BEP transforms BIM from a modelling technology into a project management framework. When thoughtfully prepared and implemented, it becomes the foundation for delivering efficient, transparent, and high-quality construction outcomes.

Bridging Design, Construction, and Operation through Information Models

The traditional Information Delivery Cycle in PAS 1192-2:2013 provided the foundation for BIM Level 2 adoption by specifying information needs for capital delivery. However, it lacked a comprehensive view of the asset's entire lifecycle, particularly the end-of-life (EOL) stage. This shortcoming is addressed in the circular framework by [96] (Figure 2.6, Figure 2.7), which spans three interconnected phases: Design & Build, Operation & Maintenance, and End-of-Life. Central to this approach is the progressive development and transformation of Project Information Model (PIM), Asset Information Model (AIM), and Deconstruction Information Model (DIM)—each driven by evolving information requirements (Employer's Information Requirements (EIR), Asset Information Requirements (AIR), Organizational Information Requirements (OIR), Project Information Requirements (PIR) and the Deconstruction Information Requirements (DIR)).

II. **PIM (Project Information Model) – Design and Construction Intelligence.** The Project Information Model (PIM) is developed during the design and construction stages in response to the Employer's Information Requirements (EIR)—a foundational document that defines the client's data needs, standards, formats, and delivery expectations across all project stages. The EIR ensures alignment with strategic, technical, and managerial objectives by establishing workflows, collaborative procedures, and levels of detail. Created during the pre-tender phase, the EIR distinguishes itself from the BIM Execution Plan (BEP), which outlines how project teams intend to meet these requirements [98]. The PIM, therefore, includes both graphical and non-graphical information, forming the basis for the Digital As-Built Record, which captures all as-constructed data. Despite its potential, practitioners acknowledge the challenges in maintaining PIM accuracy and completeness—critical for a reliable handover.

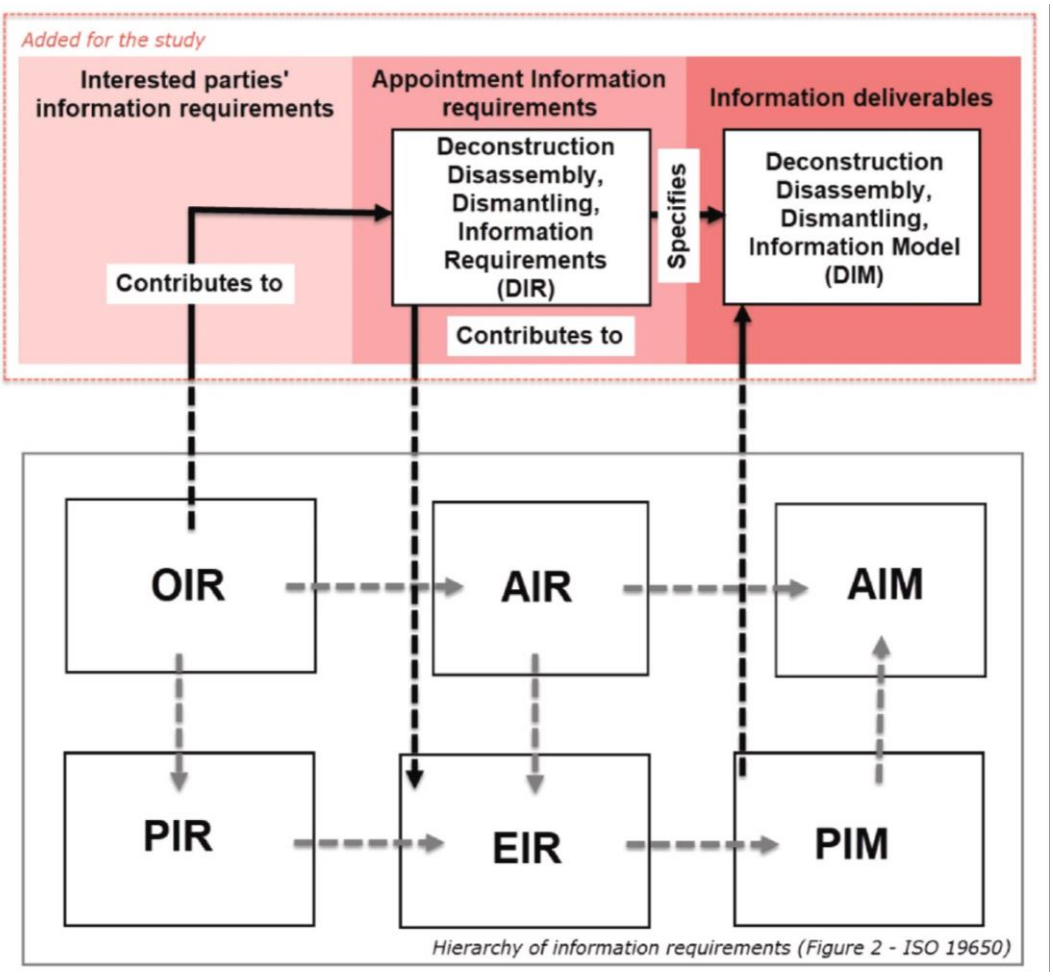


Figure 2.7. Relationships between elements of information management during the asset lifecycle (adapted from ISO, 19650 by [96].

IV. **AIM (Asset Information Model) – Operational Data and Facility Management.** Upon project completion, the PIM transitions into the Asset Information Model (AIM)—a geometrically simplified but semantically enriched model used during the asset's operational phase. AIM supports facility management, maintenance planning, and operational optimization, embedding documents like O&M manuals, commissioning records, and asset performance metrics. It also incorporates circular economy (CE) data—reusability scores, recyclability indicators, and material provenance—establishing it as a dynamic digital building passport. The AIM is continuously updated throughout the asset's use phase, particularly via the "As-Maintained" model, which ensures accuracy before any EOL decision-making. Its reliability is underpinned by structured data

drops and governed through the CDE and delivery protocols detailed in the BEP and MIDP.

V. **DIM (Deconstruction Information Model) – End-of-Life Planning and Circularity Enablement.** At the final stage of asset lifecycle the To fully close the loop, this framework introduces the Deconstruction Information Model (DIM) is introduced—a concept supported by Deconstruction Information Requirements (DIR), which is formalized early in the project alongside EIRs. DIM integrates PIM and AIM data to support selective demolition, material recovery, and component reuse—key strategies in circular built environment practices. As Charef [96] notes, incorporating DIRs early ensures that circular objectives—e.g., minimum reuse or recycling rates—are embedded from project inception. The DIM ensures traceability through lifecycle validation points and compliance with initial DIRs, reinforcing the idea of designing for deconstruction. Tools and standards aligned with ISO 19650 and PAS 1192 help enforce information consistency and interoperability, especially at critical data exchange points. The DIM is populated through a series of structured data drops and validation points, ensuring traceability and compliance with client specifications. This approach aligns with the CDE and key contractual documents (EIR, BEP, MIDP), promoting consistency and collaboration across stakeholders—from design to deconstruction.

In summary, the synergy of PIM, AIM, CDE, and BEP—structured and governed through ISO 19650—forms the backbone of a digitally integrated construction process, enabling standardized, secure, and efficient information management across all phases of asset development and operation.

2.3. Role Definition in BIM Teams: Ensuring Collaboration and Accountability

Effective collaboration in BIM-enabled projects requires a clearly defined organisational structure. The complexity of digital workflows, multidimensional data, and interoperability challenges makes it essential that every team member's role is explicitly stated and well understood. This avoids confusion, enhances data accountability, and facilitates productive collaboration across all project phases—from design to operation

[99]. The three core roles within a BIM environment—BIM Manager, BIM Coordinator, and BIM Author (or BIM Specialist, Modeler)—form the backbone of collaborative digital project delivery (Figure 2.8).

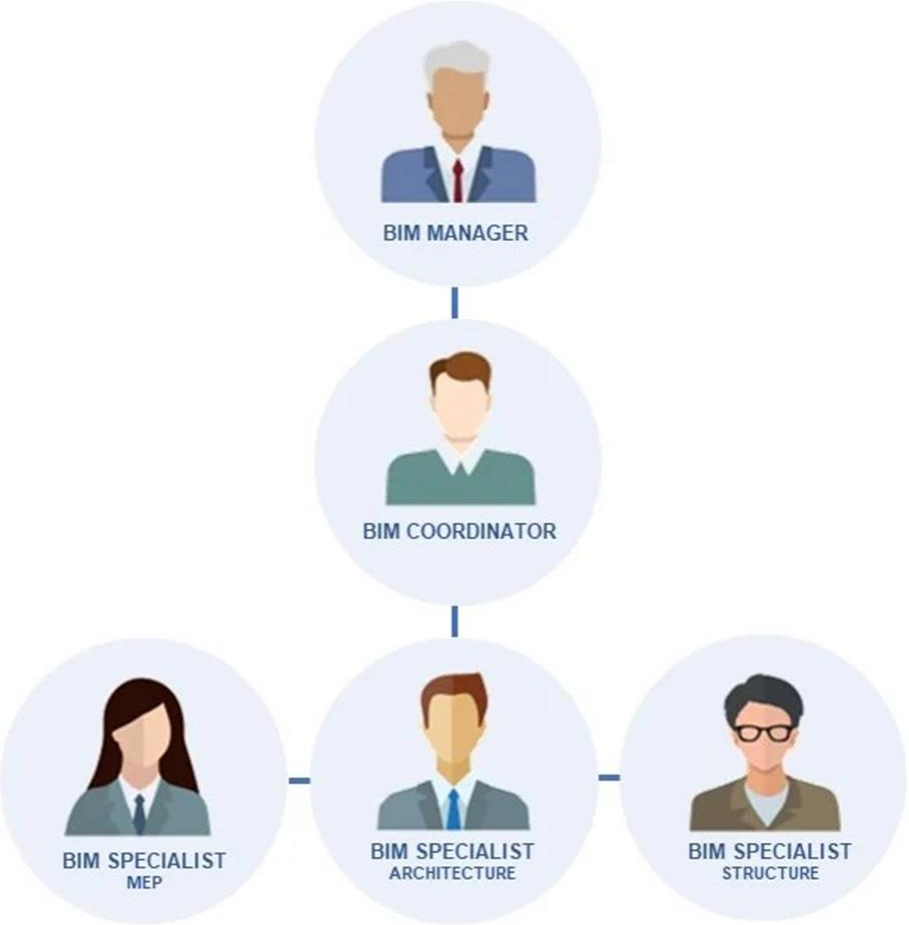


Figure 2.8. BIM Roles: Detailed Career Information [100].

BIM Manager

The BIM Manager is responsible for the strategic leadership, integration, and advancement of BIM across the entire organization. They set the vision for BIM adoption, manage its deployment, and ensure consistency with organizational goals and industry standards [99]. As the primary driver of BIM-related innovation, the BIM Manager develops and maintains BIM Execution Plans, establishes governance frameworks, and mentors a multidisciplinary team of BIM specialists. They ensure that BIM practices deliver business value, improve project efficiency, and uphold the highest levels of quality across all deliverables. The BIM Manager plays a critical role in change

management, digital transformation, and aligning digital construction technologies with organizational processes (Figure 2.9).

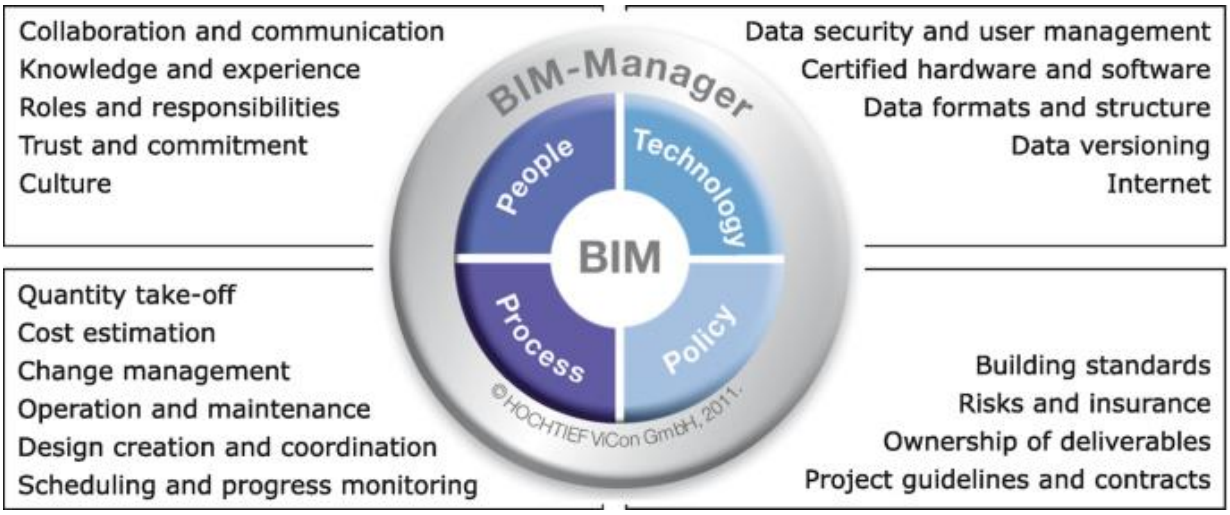


Figure 2.9. BIM Manager: Role in Life Cycle [101].

Key responsibilities of BIM Manager include the following [102]:

- Define and implement the organization-wide BIM strategy and execution framework.
- Develop and maintain BIM standards, protocols, and workflows in alignment with ISO 19650 or equivalent.
- Oversee the creation, implementation, and updating of BEPs.
- Lead and mentor BIM teams, supporting their technical development and fostering a culture of collaboration and innovation.
- Coordinate the integration of multi-disciplinary models and oversee their quality assurance.
- Conduct regular BIM audits, model checks, and ensure compliance with data standards and project-specific requirements.
- Manage software platforms, toolsets, licenses, and digital resources for optimal use across departments.
- Lead BIM training initiatives and knowledge-sharing sessions.
- Engage with senior management, reporting on BIM implementation progress, performance metrics, and strategic improvements.

- Monitor emerging trends and technologies in BIM and implement them to maintain a competitive edge.
- Act as the liaison with clients, contractors, and consultants on BIM-related aspects of projects.

They require a strong foundation in BIM platforms (e.g., coordination software, federated model environments, IFC viewers) and must also possess leadership skills to align teams, tools, and processes with project goals. Though not always a traditional manager, the BIM Manager holds significant decision-making authority.

BIM Coordinator

The BIM Coordinator plays a pivotal role in ensuring project-level BIM implementation is consistent, collaborative, and aligned with the overall strategic direction set by the BIM Manager. With interdisciplinary expertise, the BIM Coordinator connects the macro-level strategy of the BIM Manager with the technical execution by BIM Specialists, acting as a key facilitator of information flows, model coordination, and technical validation throughout the project lifecycle. They operate across design disciplines—such as architectural, structural, and MEP—overseeing the integration, validation, and clash resolution of federated models. BIM Coordinators ensure that digital design processes follow the agreed standards, deliverables, and timelines, optimizing performance and preventing design errors before construction begins [103]. Key responsibilities of BIM Coordinator are the following [102]:

- Implement and enforce BIM standards and workflows within the project scope.
- Maintain and update the BIM Execution Plan (BEP) and ensure team compliance.
- Coordinate model integration from architectural, structural, MEP, and other disciplines.
- Facilitate interdisciplinary collaboration and run coordination meetings.
- Perform clash detection using BIM coordination tools and drive resolution workflows.
- Ensure timely delivery of BIM outputs that align with project milestones and client requirements.

- Manage model validation, quality control, and version tracking.
- Support project stakeholders in understanding and applying BIM deliverables.
- Keep abreast of BIM-related innovations and introduce tools or methods that enhance project delivery.
- Document lessons learned and feed them back into the organizational knowledge base.

Within BIM coordination, two distinct yet complementary roles exist: the BIM Total Coordinator and the Specialist Planning Level Coordinator [104]. The BIM Total Coordinator is responsible for overseeing the integration of all discipline-specific models into a unified, federated model. This role ensures cross-trade compatibility, both geometrically (e.g. collision detection) and informationally (e.g. attribute consistency), and manages the overall delivery of agreed content to the client. They also supervise the use of the CDE and coordinate the model release process in accordance with the planning cycles. On the other hand, the BIM Coordinator at the specialist planning level focuses on a specific discipline—such as structural, architectural, or MEP design. This coordinator ensures the punctual and quality-compliant delivery of the discipline-specific BIM content, aligned with project requirements. They act as the primary contact for the BIM Total Coordinator and often face the unique challenge of balancing project expectations with internal company standards and workflows.

A proficient BIM Coordinator must demonstrate advanced technical skills in BIM software and coordination platforms, particularly in clash detection tools like Navisworks, and in handling IFC models through editing and validation utilities. They need a strong interdisciplinary understanding of the AEC domains to effectively manage cross-domain interactions. Familiarity with openBIM standards—notably ISO 19650 and IFC protocols—is essential, along with the capacity to translate these into actionable modelling practices [103]. Equally important are soft skills, including clear communication, team facilitation, and the ability to mediate between technical experts and project managers. A competent coordinator also ensures the regulatory compliance of models, maintaining both quality and traceability throughout the design and construction process.

BIM Specialist (Author, Modeler)

The BIM Specialist is a technical expert responsible for developing and maintaining detailed, data-rich 3D models that represent the physical and functional characteristics of the built environment. Typically aligned with a specific discipline—such as architecture, structure, or MEP—the BIM Specialist transforms design concepts into constructible digital models using specialized software tools like Revit, ArchiCAD, or Civil 3D. Also referred to as BIM Authors or BIM Modelers, these professionals are essential contributors to model accuracy, interoperability, and project coordination. Their work is pivotal across the entire project lifecycle—enabling data-driven decision-making from early design through construction and into facility management. As the core producers of digital content, BIM Specialists work closely with architects, engineers, BIM Coordinators, and construction managers to align the model with technical specifications, client requirements, and evolving site conditions (Biblus. BIM Manager, BIM Specialist and BIM Coordinator roles and responsibilities. (2025)). Their work underpins the BIM process and enables data-driven decision-making throughout the project lifecycle—from design to construction and facility management. Key responsibilities, hence, include [102]:

- Create, modify, and maintain accurate 3D BIM models using relevant software (e.g., Revit, ArchiCAD, Civil 3D).
- Translate design intent and technical specifications into parametric models.
- Ensure compliance with modelling standards, templates, and project-specific requirements.
- Conduct clash detection and coordinate with other disciplines to resolve model conflicts.
- Collaborate with architects, engineers, and coordinators to integrate and align model data.
- Implement revisions and updates as per project changes and stakeholder feedback.
- Perform ongoing model audits and validation checks to ensure completeness and accuracy.

- Contribute to documentation, drawing extraction, and data outputs for downstream use.
- Stay informed of modelling best practices, tools, and workflows to enhance productivity.

BIM Specialists form a vital link between design intent and digital execution. When working alongside BIM Architects and Designers, they translate creative visions into detailed digital assets. In collaboration with BIM Construction Managers, they help simulate construction processes, detect site-related issues early, and contribute to schedule and cost optimization. Their role also supports Facility Managers by embedding asset-level data for use in operations and maintenance post-handover. As digital modelling continues to evolve, BIM Specialists are expected to adopt a cross-disciplinary mindset, ensuring that models not only serve their immediate design function but also support collaborative, lifecycle-driven BIM workflows [105].

This collaborative dynamic is best understood within the broader lifecycle context of BIM implementation. Figure 2.10 illustrates how BIM-enabled roles align with key project phases—from planning and construction to operation, refurbishment, and demolition. It shows how different AECO professionals (architects, engineers, contractors, facility managers) contribute at various stages, supported by project and asset information management workflows (PIM and AIM). Importantly, the figure highlights the role of owners, developers, and asset managers in overseeing data sovereignty, managing risk, and ensuring long-term value creation. This end-to-end integration reflects the growing importance of information continuity and structured data across the lifecycle of built assets.

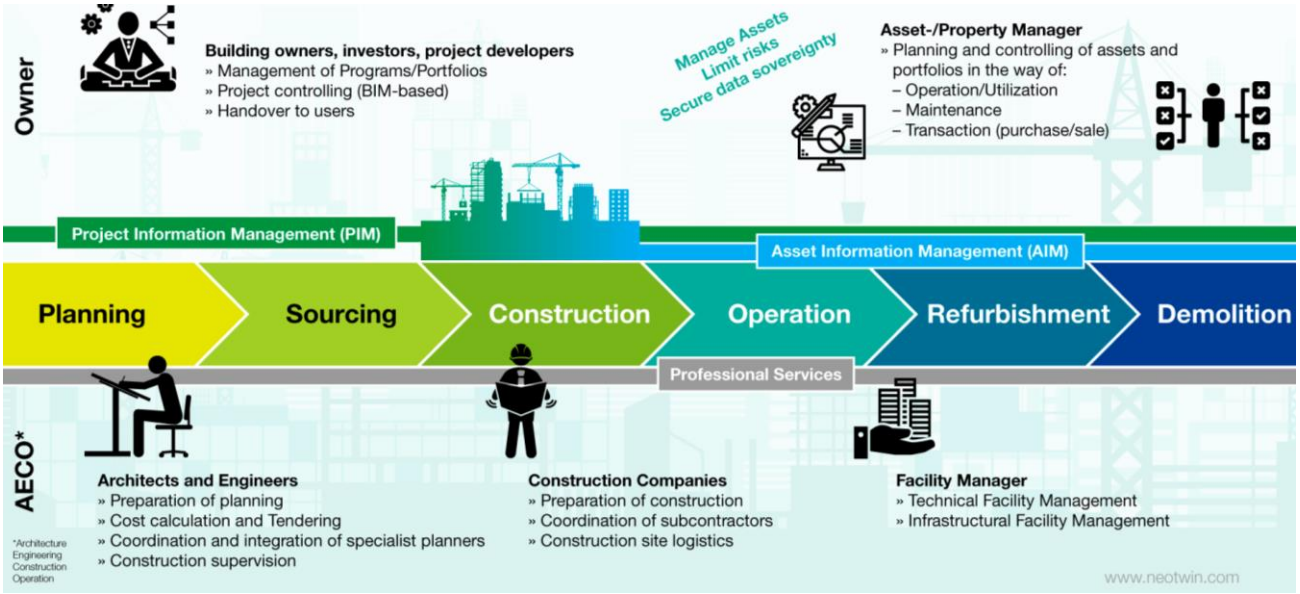


Figure 2.10. Authors in BIM [57].

Beyond core BIM coordination and modelling roles, several additional positions play essential parts in supporting efficient BIM workflows across the project lifecycle. The CDE Manager ensures that all project documentation is securely stored, traceable, and accessible within the Common Data Environment, facilitating transparency and collaboration. A BIM Lead provides discipline-specific leadership, guiding teams in the production of consistent and compliant BIM outputs. Meanwhile, the Project Manager integrates BIM strategies into the broader delivery framework, balancing scope, schedule, and budget. The Design Team Leader serves as a critical link between client expectations and model development, ensuring alignment with modelling protocols. Supporting roles such as Modeler I/II assist in technical drafting and model creation under the supervision of specialists, contributing to the production pipeline. Finally, the VDC Manager plays a strategic role by integrating BIM models with advanced planning tools—enabling construction sequencing, cost estimation, and real-time data applications through 4D/5D and IoT technologies. Table 2.3 provides detailed comparison of key BIM-related roles across several dimensions—project stages, core skills, main responsibilities, tools used, and data inputs/outputs.

Table 2.3. The comparative analysis of key BIM-related roles

Role	Project Stages Involved	Core Skills	Key Responsibilities	Typical Tools	Main Inputs	Main Outputs
BIM Specialist / Modeler	Design, Construction, FM	Parametric modeling, clash detection, coordination	Create and maintain detailed 3D models; integrate data across disciplines	Revit, ArchiCAD, Navisworks, Civil 3D	Design drawings, specs, BEP	Coordinated models, clash reports, as-builts
BIM Coordinator	Design, Construction	Multidisciplinary BIM, CDE workflows, issue tracking	Federate models, resolve clashes, ensure compliance with protocols	Navisworks, BIM Collab, Solibri	Discipline models, coordination rules	Federated models, issue logs
BIM Manager	All phases	BIM strategy, ISO 19650, process design, stakeholder comms	Develop and oversee BIM implementation plan, ensure standards are applied project-wide	CDE platform, BIM authoring tools	EIR, BEP, project requirements	BIM execution plans, compliance audits
CDE Manager	All phases	Data management, document control, traceability	Administer the Common Data Environment, ensure secure and versioned info access	Autodesk Docs, SharePoint, Aconex	Document inputs, metadata, revision history	Verified documentation, access control logs
BIM Lead (Discipline)	Design	Discipline-specific BIM knowledge, QA/QC	Lead BIM production for a discipline, ensure template adherence	Revit, ArchiCAD, Tekla	Concept models, technical data	Approved models, discipline outputs
Design Team Leader	Early Design, Planning	Client engagement, design coordination	Align design intent with client needs and BIM protocols	Design software, BIM tools	Client briefs, spatial program	Validated concept/design models
Project Manager	All phases	Scheduling, budgeting, stakeholder coordination	Integrate BIM with project delivery, manage cost/schedule, oversee digital milestones	Primavera, MS Project, BIM 360	BEP, program of works, contracts	Status reports, BIM-integrated schedules

VDC Manager	Construction, Planning	4D/5D modelling, planning integration, risk management	Link BIM to construction planning, simulate and optimize construction processes	Synchro, Navisworks, IoT dashboards	Time/cost data, federated models	4D/5D simulations, performance forecasts
Facility Manager (FM)	Operation, Refurbishment, Demolition	Asset management, lifecycle costing	Leverage BIM data for maintenance, ops, asset lifecycle decisions	FM tools, BIM viewer, CMMS	As-built BIM, asset registry	Maintenance schedules, manuals

CHAPTER 3. DIGITAL PLATFORMS IN BIM ENVIRONMENTS

3.1. BIM Tools overview

In digital construction, a broad spectrum of software solutions and services is collectively referred to as **BIM tools**. This umbrella term covers all applications, platforms, and systems that support the creation, coordination, exchange, and management of building information models. For clarity, BIM tools can be divided into three major categories, each addressing specific functions within the project lifecycle.

1. **BIM applications** – software environments directly engaged in design, coordination, and construction-related tasks.

- **Authoring environments** (e.g., *Revit, Archicad, Allplan, Tekla*) provide the means to develop architectural, structural, and engineering models.
- **Coordination tools** (e.g., *Navisworks, Solibri, BIMcollab*) enable interdisciplinary alignment, clash detection, and data quality control.
- **Construction and field solutions** (e.g., *Trimble Connect, Revizto, Dalux, Bentley Synchro*) extend BIM processes to the jobsite, supporting mobile collaboration, scheduling, and issue management.

2. **Collaboration platforms (Common Data Environments – CDEs)** – centralized systems that ensure controlled storage, version management, and distribution of project information. They allow all stakeholders to work with consistent and validated data. Typical high-level collaboration platforms include *Oracle Aconex, Thinkproject CDE*. At the same time, domain-specific environments such as *Autodesk Construction Cloud* or *Graphisoft BIMcloud* are widely used to support collaboration within particular disciplines or organizations.

3. **Data structure and management tools** – solutions and frameworks dedicated to the standardization, enrichment, and validation of BIM data. It should be emphasized that these categories are not always rigidly separated. Many modern solutions combine features from multiple groups. For instance, *Autodesk Construction Cloud* and *Trimble Connect* operate primarily as collaboration platforms but also integrate data validation and issue-tracking functionalities. Similarly, *Solibri Office* is both a coordination tool and a robust environment for data checking. This functional

overlap reflects the trend towards multifunctional ecosystems, in which BIM tools increasingly blend authoring, collaboration, and data management capabilities.

Together, these categories form an interconnected digital infrastructure that underpins BIM practice, enabling reliable workflows from early design through construction to long-term asset management.

Taken together, these categories form an integrated ecosystem of BIM tools, enabling efficient and reliable workflows throughout the entire project lifecycle, from conceptual design to construction and long-term asset management.

3.2. BIM applications

3.2.1. Authoring Tools

The rapid expansion of Building Information Modelling (BIM) has led to the development of a diverse ecosystem of digital platforms, each designed to support different phases of the construction project lifecycle while addressing the growing demand for interoperability and collaboration. Among the most widely adopted platforms are Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Bentley OpenBuildings, Trimble Tekla Structures, and Nemetschek Allplan, which collectively shape the technological backbone of BIM implementation worldwide [106].

Autodesk Revit continues to dominate the market due to its comprehensive parametric modelling environment, native integration with cloud services such as BIM 360, and strong support for open standards including Industry Foundation Classes (IFC) and Construction Operations Building Information Exchange (COBie) [107]. Graphisoft ArchiCAD, in contrast, has positioned itself as a pioneer in OpenBIM, offering robust interoperability features and early adoption of IFC protocols, which make it particularly attractive for cross-disciplinary collaboration.

Bentley Systems has leveraged its infrastructure-oriented solutions by integrating OpenBuildings Designer with ProjectWise and AssetWise platforms, enabling large-scale coordination and lifecycle asset management across civil and industrial domains. Meanwhile, Trimble’s Tekla Structures is recognized for its precision in structural detailing and steel fabrication workflows, offering high fidelity models directly connected to manufacturing pipelines. Nemetschek’s Allplan

emphasizes versatility in architecture and engineering, with strong integration to CDEs (Common Data Environments) and native support for ISO 19650-compliant workflows.

Comparative market analyses indicate that while Revit remains the dominant choice in North America and Asia, ArchiCAD and Allplan hold stronger positions in Europe, where adherence to OpenBIM principles and regulatory compliance drive platform selection. This regional differentiation underscores the strategic role of both proprietary ecosystems and open-standard solutions in shaping the global BIM landscape.

Autodesk Revit is widely recognized as one of the most influential BIM authoring platforms, establishing itself as a de facto standard in many markets where digital construction workflows are mandated. Unlike traditional CAD tools, Revit integrates architecture, structural design, and building services (MEP) into a single environment, making it particularly suited for multidisciplinary collaboration [108].

The distinguishing feature of Revit is its parametric modeling engine. Each element in the model is defined as an object with interrelated attributes, ensuring that any modification automatically propagates across views, schedules, and drawings. This consistency minimizes errors and prevents duplication of information, representing a fundamental shift from traditional drawing-based practices.

Revit supports a wide range of functionalities that extend its role beyond design authoring. These include automatic generation of construction documentation, cost schedules, and material take-offs; integration of analytical models for structural and energy simulations; and advanced automation through Dynamo, a visual programming interface that enables generative design, rule-based checking, and data management [109]. The platform also connects seamlessly with other Autodesk products such as Navisworks, InfraWorks, and BIM 360, forming a broader ecosystem for design coordination and project delivery.

Recent releases have emphasized interoperability and performance improvements. Revit 2025 introduced a simplified IFC mapping interface, improved gbXML support for building performance analysis, and enhanced workflows for site design and coordinate management. The 2026 release further extended GPU

acceleration for visualization, improved documentation automation, and enhanced performance on large-scale projects [110]. These developments demonstrate Autodesk's focus on aligning Revit with both OpenBIM requirements and emerging demands for computational efficiency.

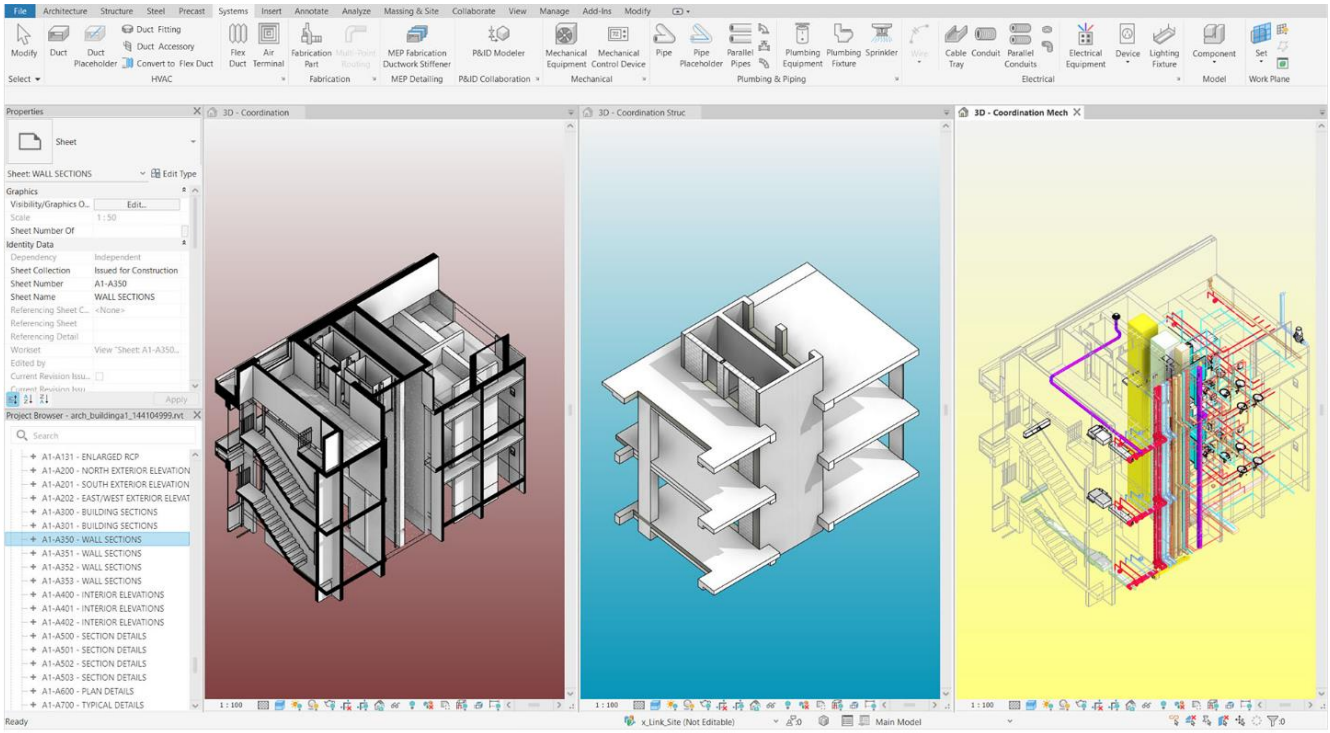


Figure 3.1. Autodesk Revit interface (by https:// autodesk.com).

Despite its strengths, Revit is not without limitations. The software is often criticized for its high licensing costs, steep learning curve for beginners, and significant hardware requirements. Interoperability with open standards such as IFC, although continuously improved, is not always flawless, sometimes creating challenges in environments where OpenBIM compliance is a priority [111].

Graphisoft ArchiCAD is recognized as one of the earliest and most consistent BIM authoring platforms, having introduced the concept of the "Virtual Building" as early as the late 1980s. Its development philosophy has always been rooted in architecture, providing design professionals with an intuitive environment that integrates modeling, visualization, and documentation into a single workflow. Unlike many competing tools, ArchiCAD places strong emphasis on accessibility and usability, enabling even small- and medium-sized practices to implement BIM effectively.

A key characteristic of ArchiCAD is its long-standing commitment to open standards and interoperability. The software natively supports IFC and BCF formats, ensuring compatibility with other BIM applications and facilitating collaborative work across disciplines. Graphisoft has also developed dedicated interoperability add-ins, such as the IFC Model Exchange plug-in for Revit, which enhances bidirectional data exchange between the two platforms [112]. This OpenBIM orientation makes ArchiCAD particularly relevant in European contexts, where regulatory frameworks often mandate standardized data formats.

In terms of functionality, ArchiCAD provides a wide range of authoring and coordination features. It integrates algorithmic design via the Grasshopper connection, supports renovation projects with dedicated toolsets, and includes BIMx for immersive visualization and communication with stakeholders [113]. The release of ArchiCAD 27 in 2024 introduced design option management, distance guides, AI-assisted visualization, and enhanced performance through native support for Apple Silicon, reflecting Graphisoft's focus on continuous usability improvements.

Despite these strengths, ArchiCAD also has limitations. Its parametric modeling capabilities are less comprehensive compared to Autodesk Revit, particularly when handling dynamically interrelated parameters across complex systems.

Nevertheless, ArchiCAD remains a leading solution in architectural BIM practice. Its intuitive interface, strong visualization tools, and deep commitment to OpenBIM principles position it as a widely adopted standard in many regions, especially within Europe. The platform's balance of usability and interoperability ensures its continued relevance as a central authoring environment in multidisciplinary construction projects.

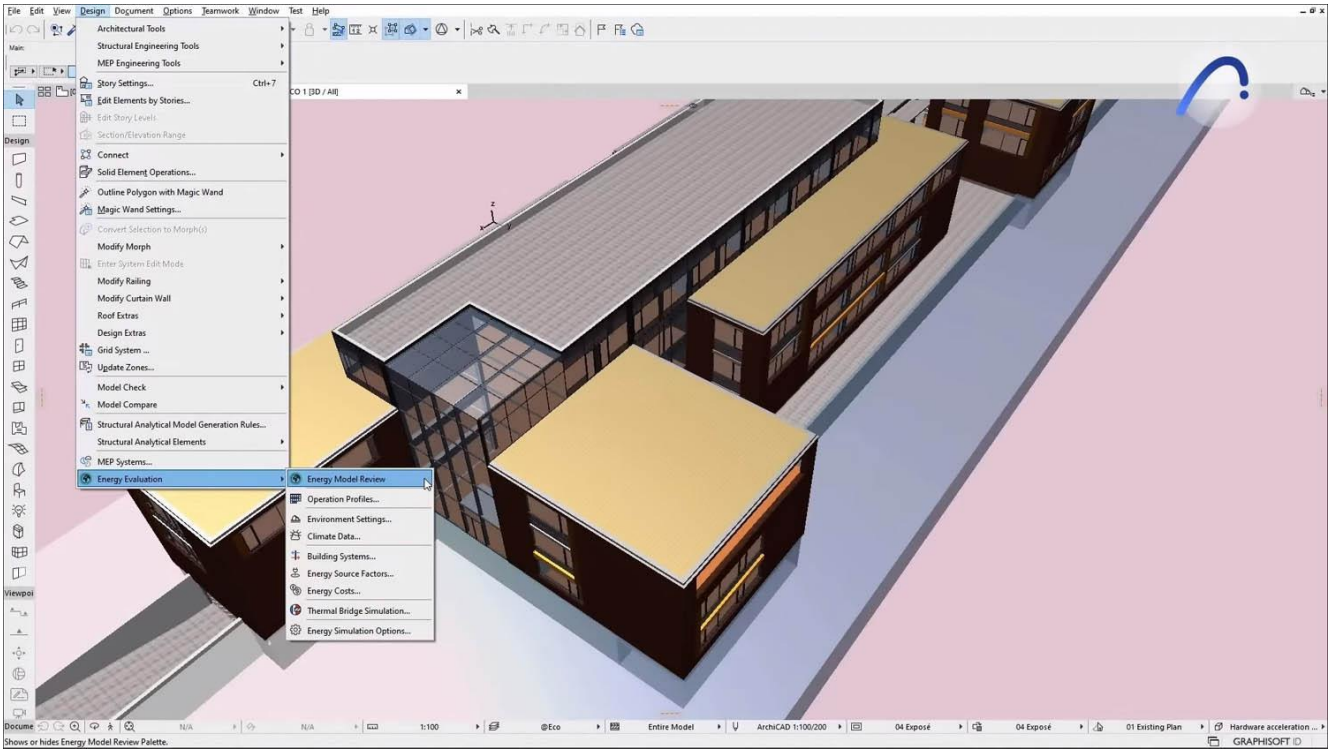


Figure 3.2. Autodesk Revit interface (by https://aecmag.com).

Allplan, developed by the Nemetschek Group, is a BIM authoring platform that has established a strong position in Europe, particularly in Germany, Austria, and Switzerland. The software is known for its dual emphasis on architectural design and structural engineering, offering detailed modeling capabilities that span from early-stage planning to construction documentation [113]. Its strength lies in bridging the workflows of architects and engineers within a single environment, thereby supporting more integrated project delivery [114].

A key differentiator of Allplan is its high level of geometric precision, especially in the representation of reinforced concrete and complex structural assemblies. The platform provides advanced reinforcement modeling and detailing functions, making it widely used in engineering-driven projects such as infrastructure, bridges, and high-rise buildings. Allplan also integrates smoothly with Nemetschek's broader ecosystem, including Vectorworks, Archicad, and Solibri, leveraging the OpenBIM approach promoted across the group [115].

Recent versions, such as Allplan 2024, introduced enhanced performance for large models, improved collaboration through BIM Collaboration Format (BCF), and optimized workflows for precast concrete design and bridge engineering. These

updates align the software with emerging requirements for infrastructure projects and industrialized construction. Additionally, Allplan supports both native file formats and industry standards such as IFC, making it compliant with ISO 19650 information management principles [115].

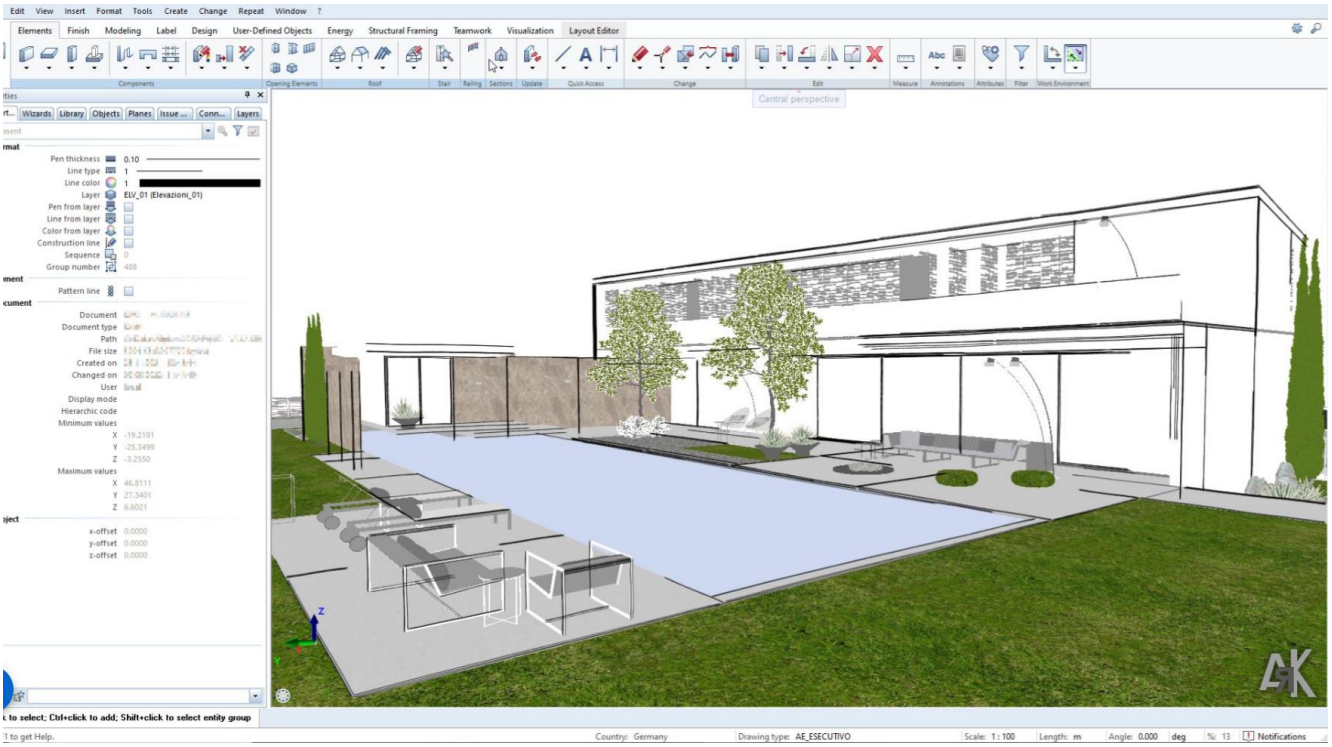


Figure 3.3. Allplan interface (by https:// allplan.com).

Despite its comprehensive functionality, Allplan is often considered less intuitive than ArchiCAD or Revit for purely architectural workflows. Users note a steeper learning curve, particularly in mastering its structural detailing features, and its adoption outside German-speaking countries has been more limited. Nevertheless, for organizations that require high-fidelity engineering integration, especially in reinforced concrete design, Allplan remains a preferred solution and a recognized standard in several European markets [114].

Tekla Structures, developed by Trimble, is a BIM authoring platform specifically renowned for its capacity to handle structural engineering and construction detailing. Unlike many general-purpose BIM tools, Tekla focuses on producing highly detailed and fabrication-ready models, making it a preferred solution for steel, concrete, and precast industries [116]. Its ability to support large, information-rich

models with millimeter-level accuracy distinguishes it as one of the most advanced platforms for constructability and lifecycle management.

A central advantage of Tekla Structures is its buildability-oriented modeling approach. The software supports the creation of constructible 3D models that include not only geometry but also embedded information about materials, fabrication, erection sequences, and maintenance. This allows the direct use of BIM models for manufacturing processes such as CNC steel cutting, rebar bending, and precast element production). As a result, Tekla is widely adopted by contractors, fabricators, and suppliers who require seamless transition from digital models to on-site or factory execution.

Tekla is also recognized for its open collaboration philosophy. The platform natively supports the Industry Foundation Classes (IFC) standard and integrates with Trimble Connect, enabling multidisciplinary coordination and cloud-based collaboration across geographically dispersed teams. Recent releases enhanced model sharing introduced AI-assisted clash detection, and expanded automation features for reinforcement and formwork modeling, reflecting the growing trend towards industrialized and data-driven construction [116].

However, Tekla Structures also presents challenges. The platform is highly specialized, which means that its workflows may be less suited for purely architectural design compared to Revit or Archicad. Its advanced functionalities also entail a steeper learning curve, particularly for users without prior experience in structural detailing. Furthermore, the licensing cost and need for powerful hardware may pose barriers for small firms.

Regardless of these limitations, Tekla Structures remains the industry benchmark for structural BIM, particularly in projects where precision, fabrication, and lifecycle integration are critical. From complex high-rise structures to bridges and industrial plants, Tekla provides the tools necessary to connect design with construction, ensuring a high degree of accuracy and efficiency.

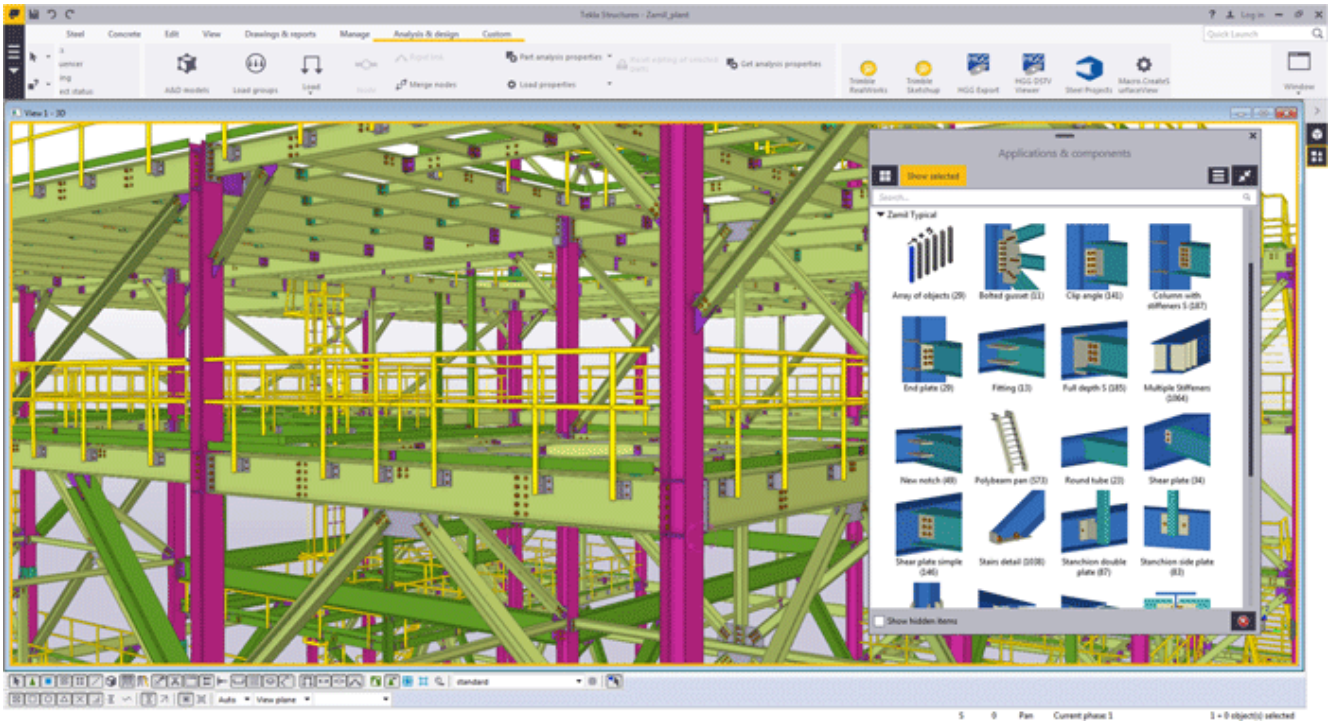


Figure 3.4. Tekla interface (by https://aecmag.com).

Bentley Systems has developed a family of BIM applications that extend beyond building design into infrastructure and asset management. At the core of this portfolio is OpenBuildings Designer, formerly known as AECOsim Building Designer, which integrates architectural, structural, mechanical, and electrical design into a single modeling environment [117]. Unlike many competing BIM platforms, Bentley's solutions are closely tied to large-scale infrastructure workflows, making them particularly relevant in transportation, utilities, and industrial projects.

A distinguishing feature of Bentley's ecosystem is its strong connection to ProjectWise and AssetWise, collaborative platforms that manage design coordination, information delivery, and lifecycle asset performance. This integration reflects Bentley's orientation toward infrastructure-scale BIM and digital twin strategies, enabling stakeholders to manage assets well beyond construction and into operation and maintenance.

OpenBuildings Designer offers a variety of advanced functionalities, including parametric modeling, multidisciplinary coordination, energy simulation, and support for geographic information systems (GIS). It also integrates seamlessly with MicroStation, Bentley's long-standing CAD platform, and leverages Bentley's

commitment to open standards, supporting IFC, COBie, and ISO 19650-compliant workflows.

Recent developments in the iTwin platform further extend Bentley's BIM capabilities into the realm of digital twins. The iTwin ecosystem enables real-time synchronization of design models, IoT data streams, and construction updates, thereby creating dynamic digital representations of physical assets. These innovations illustrate Bentley's broader strategy of shifting from design-focused BIM toward data-centric asset lifecycle management [118].

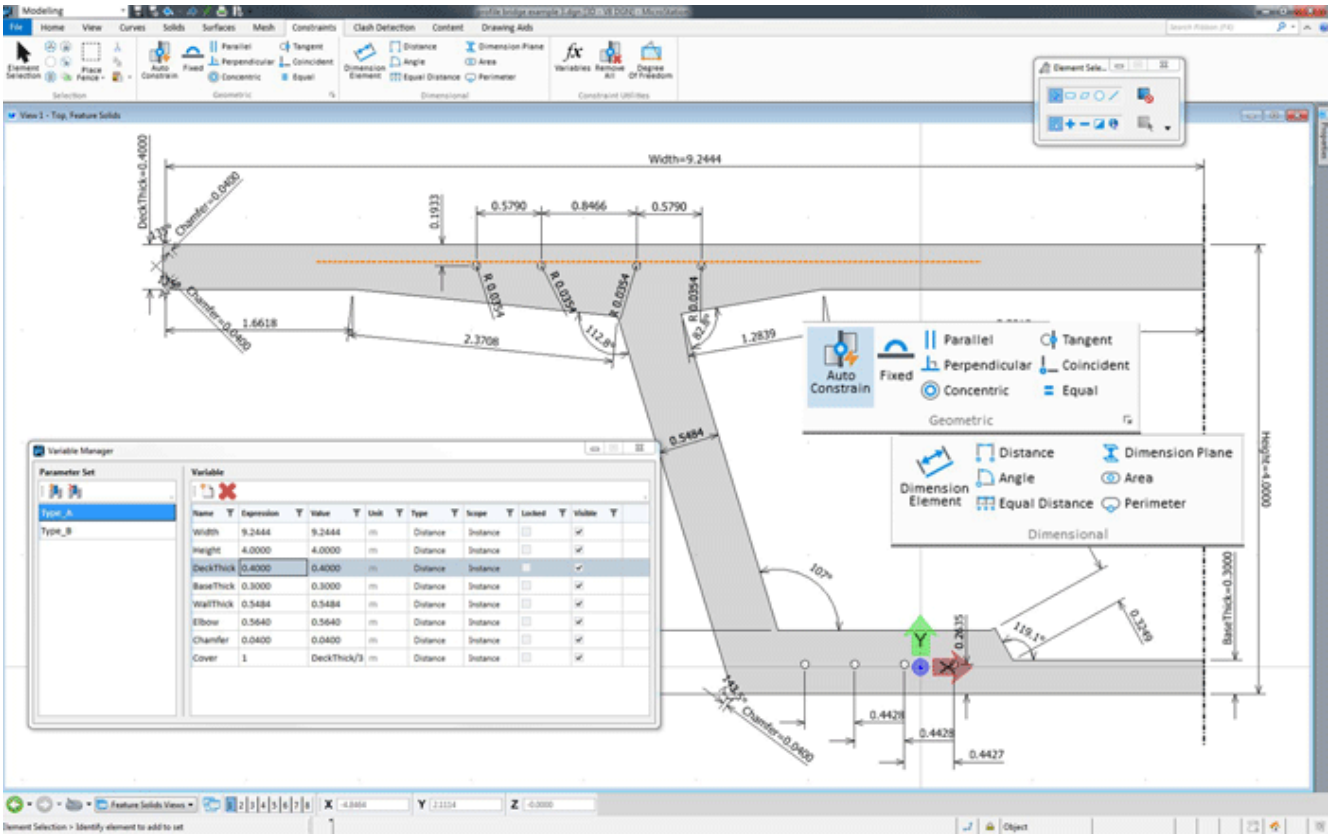


Figure 3.5. Bentley Systems interface (by https://aecmag.com).

Nevertheless, Bentley's solutions face certain limitations. OpenBuildings Designer is considered less intuitive than Revit or Archicad, particularly for small design practices. Its adoption is strongest in large infrastructure-focused organizations, while market penetration in conventional building design remains more limited. Moreover, training requirements and software costs can present barriers for firms without established digital workflows.

Even with these challenges, Bentley's BIM platforms play a critical role in advancing integrated infrastructure delivery. Their alignment with digital twin

technologies, strong lifecycle orientation, and interoperability with GIS and engineering applications position Bentley as a strategic actor in the digital transformation of the built environment.

3.2.2. Coordination (Checking) Tools

Alongside authoring environments, a distinct category of BIM applications has evolved to address the challenges of model coordination and quality assurance. These tools are not primarily intended for creating design content but rather for integrating discipline-specific models, detecting clashes, validating data consistency, and ensuring compliance with project standards and regulatory frameworks. Their emergence reflects the growing complexity of modern construction projects, where multidisciplinary teams must collaborate within shared digital environments. By providing mechanisms for model aggregation, rule-based checking, and structured issue management, coordination platforms play a pivotal role in transforming fragmented design outputs into reliable, clash-free, and construction-ready project information [119,120].

Autodesk Navisworks occupies a distinct position within the BIM software landscape as a platform dedicated to model aggregation, coordination, and project review. Unlike authoring tools that focus on design generation, Navisworks functions as a hub where architectural, structural, and engineering models are brought together for comprehensive evaluation [121]. Its primary contribution lies in enabling teams to examine a unified project representation and to identify potential inconsistencies before construction begins.

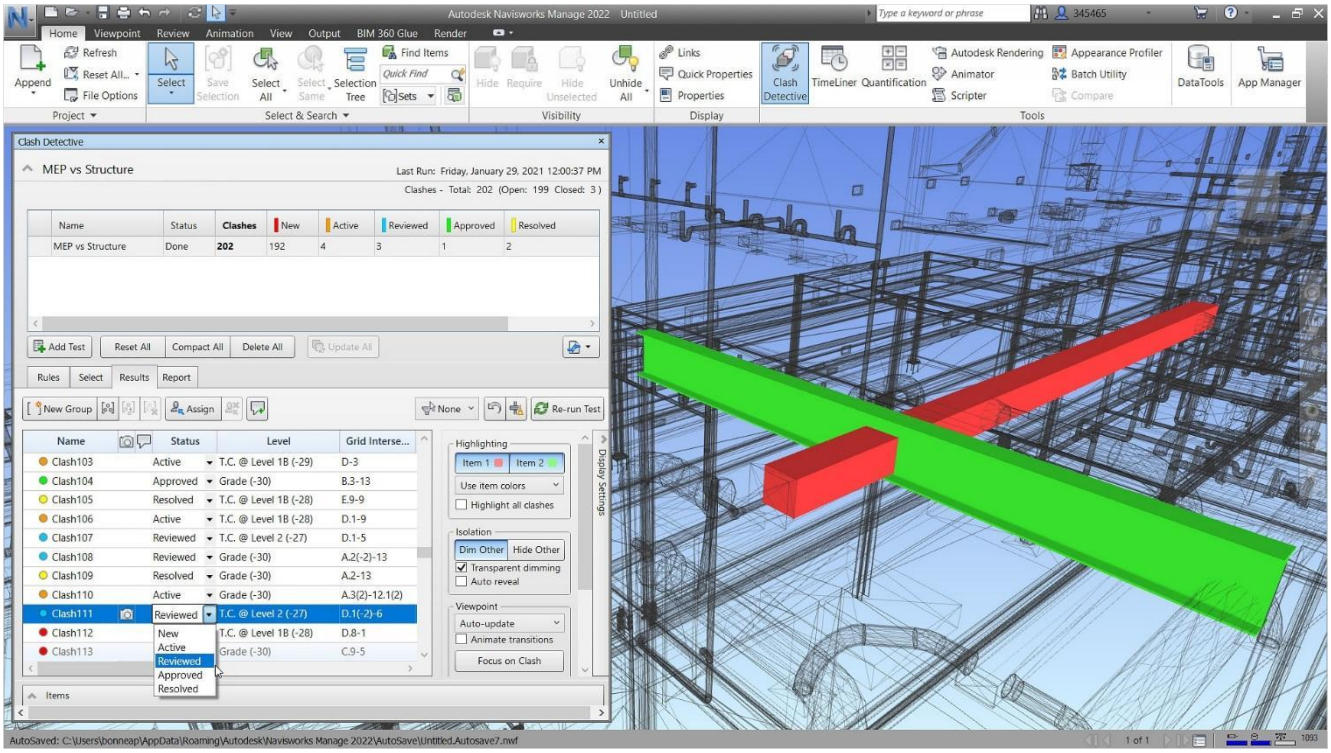


Figure 3.6. Autodesk Revit interface (by https://autodesk.com).

One of Navisworks' defining capabilities is its clash detection environment. By comparing discipline-specific models in an integrated workspace, it pinpoints spatial conflicts, overlapping components, and schedule misalignments. This systematic approach to detecting issues not only reduces design-related errors but also helps mitigate costly site modifications. Complementing this, the software provides 4D construction simulation, linking model elements to time schedules. This functionality allows planners and contractors to visualize construction sequences, anticipate bottlenecks, and test alternative phasing strategies.

The platform's interoperability further strengthens its role in multidisciplinary collaboration. Navisworks can read more than 60 native and neutral file formats—including RVT, DWG, DGN, and IFC—making it a versatile bridge across heterogeneous design environments. Combined with Autodesk Construction Cloud and BIM 360, it supports cloud-based workflows where stakeholders can exchange feedback, track issues, and ensure that model data remains consistent throughout the project lifecycle.

Nevertheless, Navisworks has certain constraints. Its functionality is limited to review and coordination; it lacks tools for native model editing or design authoring.

Moreover, as the industry increasingly adopts real-time cloud solutions, the desktop-oriented architecture of Navisworks is sometimes seen as less agile compared to newer, fully web-based platforms [120]. Even so, it remains an industry reference for coordination, particularly in large and complex construction projects where clash detection and schedule simulation are essential components of risk management.

Solibri Office has established itself as a benchmark tool for rule-based model validation and quality assurance within BIM workflows. Different to Navisworks, which is oriented toward clash detection and simulation, Solibri's primary function is to evaluate the integrity, compliance, and reliability of BIM models. It provides automated checking against design codes, client requirements, and information delivery standards, ensuring that digital models can serve as accurate contractual and regulatory documents [122].

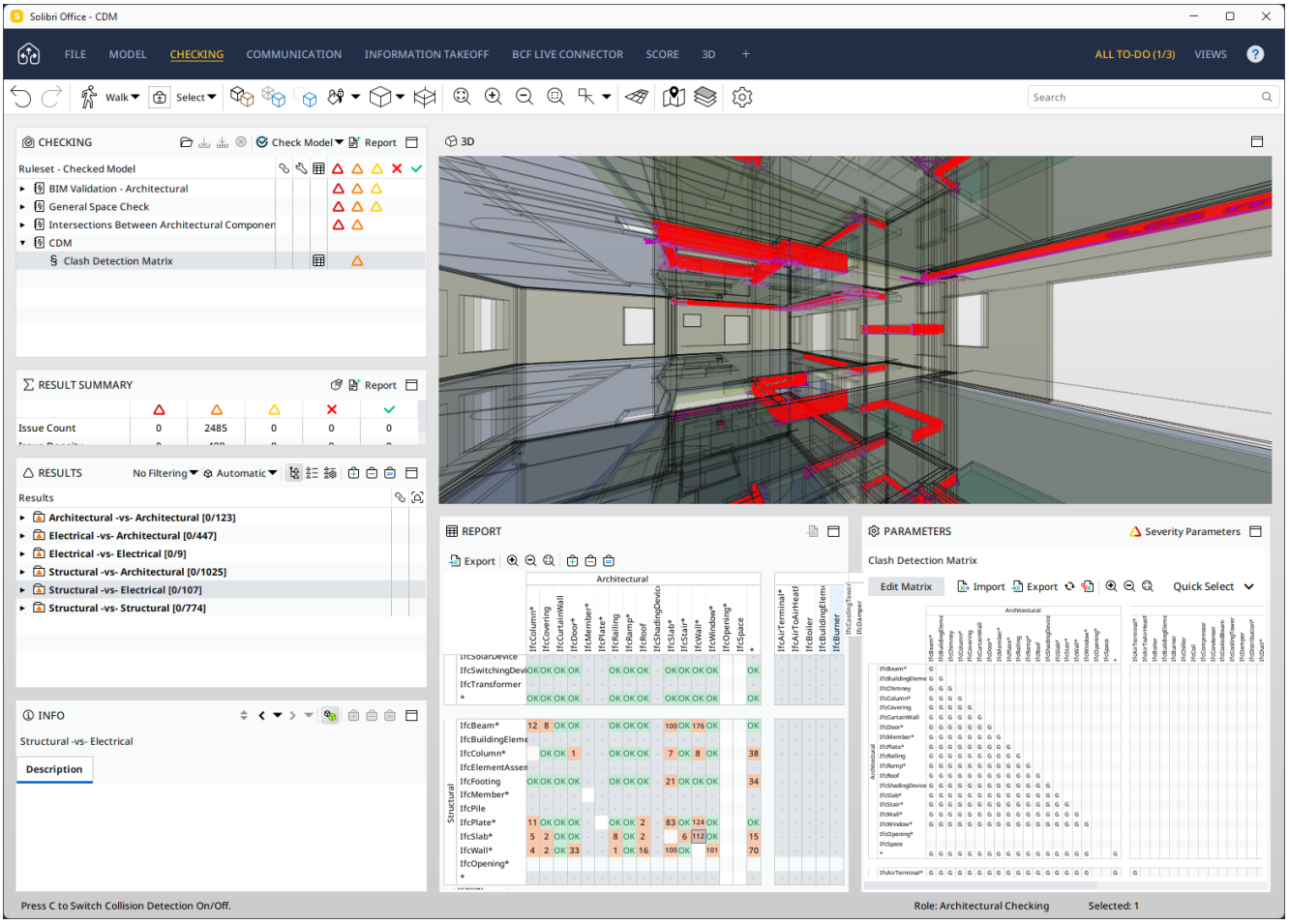


Figure 3.7. Solibri office interface (by https://solibri.com).

At the core of Solibri's environment lies its rule-based checking engine. This system allows users to define sets of validation rules that assess models for geometry

accuracy, building code compliance, information completeness, and coordination between disciplines. Typical use cases include verifying fire safety requirements, accessibility standards, energy-efficiency provisions, and adherence to ISO 19650 information specifications [119]. By automating these processes, Solibri reduces the risk of human error in manual reviews and provides transparent, auditable results for stakeholders.

In addition, Solibri facilitates model communication and issue management through its support of the BIM Collaboration Format (BCF). Identified issues can be exported as standardized BCF files and shared directly with authoring tools such as Revit, Archicad, and Allplan. This ensures that model errors are not only detected but also efficiently communicated and resolved within the broader project team [122]. The software also integrates with platforms like BIMcollab and Trimble Connect, reinforcing its role as a neutral quality control environment in OpenBIM workflows.

Despite its recognized strengths, Solibri does face certain limitations. Its functionality is tightly focused on model validation, meaning that it does not provide native design authoring or advanced 4D/5D simulation. Furthermore, licensing costs and the learning curve for customizing rule sets can present challenges for smaller firms or projects with limited resources. Nevertheless, Solibri is widely regarded as an industry reference for model quality assurance, especially in contexts where regulatory compliance and standardized information delivery are mandatory.

BIMcollab represents a new generation of coordination platforms that specialize in issue management and communication across BIM workflows. Contrasting to Navisworks or Solibri, which focus on model aggregation or rule-based validation, BIMcollab is designed as a cloud-based environment where project stakeholders can identify, assign, and track issues arising during model coordination. Its foundation is the BIM Collaboration Format (BCF), a standardized method for exchanging issue-related information between different BIM tools [123].

The platform integrates seamlessly with leading authoring applications, including Revit, Archicad, Allplan, Tekla Structures, and Vectorworks, through plug-ins that allow issues to be created directly within the modeling environment. Each issue contains viewpoints, comments, and metadata that guide designers in resolving

conflicts. This approach reduces the risk of miscommunication and ensures that problems detected in coordination reviews are systematically addressed [124].

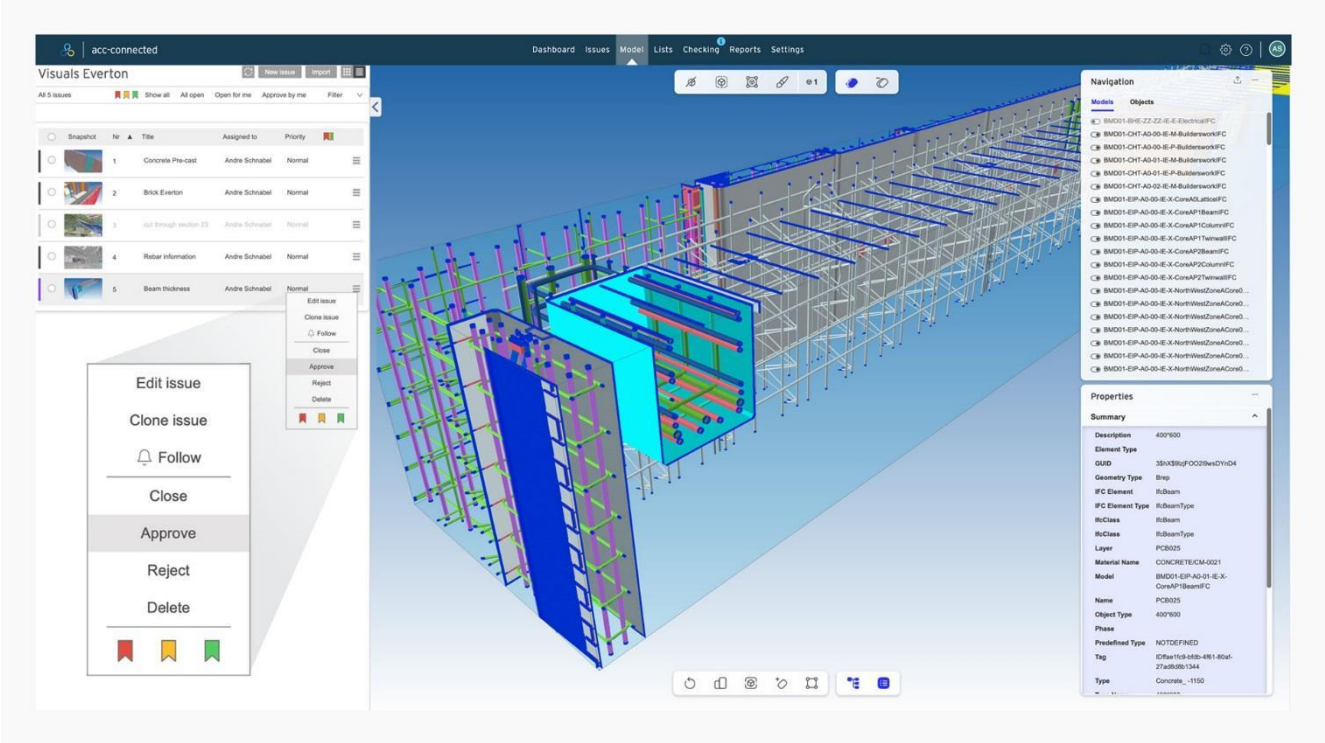


Figure 3.8. BIMcollab interface (by https://bimcollab.com).

A distinctive advantage of BIMcollab is its cloud-based accessibility. By hosting issue management on a centralized online platform, it allows distributed teams to collaborate in real time, ensuring transparency and accountability throughout the project lifecycle. Integration with common data environments (CDEs) such as Trimble Connect and Autodesk Construction Cloud extends its interoperability, while analytics dashboards provide insights into recurring issues, project health, and quality trends. Despite these strengths, BIMcollab does not provide native capabilities for clash detection or model validation, relying instead on integration with tools such as Navisworks and Solibri. Its value lies primarily in managing the coordination process rather than performing the checks themselves. For organizations seeking a full “all-in-one” solution, this specialization can be seen as a limitation. However, in OpenBIM workflows where interoperability and accountability are critical, BIMcollab has become a widely recognized standard for issue management.

3.2.3. Construction & Field Tools

While authoring and coordination platforms form the backbone of digital design and project review, the practical value of BIM increasingly unfolds during the construction and field phase. At this stage, digital models must support site-based workflows such as progress monitoring, clash resolution in real time, and mobile access to up-to-date project data. Field-oriented BIM solutions address these needs by bridging the gap between office-based design coordination and on-site execution, ensuring that the information created upstream translates into reliable guidance for construction teams.

Trimble Connect is a cloud-based Common Data Environment (CDE) designed to extend BIM workflows from design offices to the construction site. Dissimilar traditional authoring or review software, Trimble Connect functions as a centralized hub where stakeholders can access, share, and manage project data in real time, regardless of their location or discipline [125].

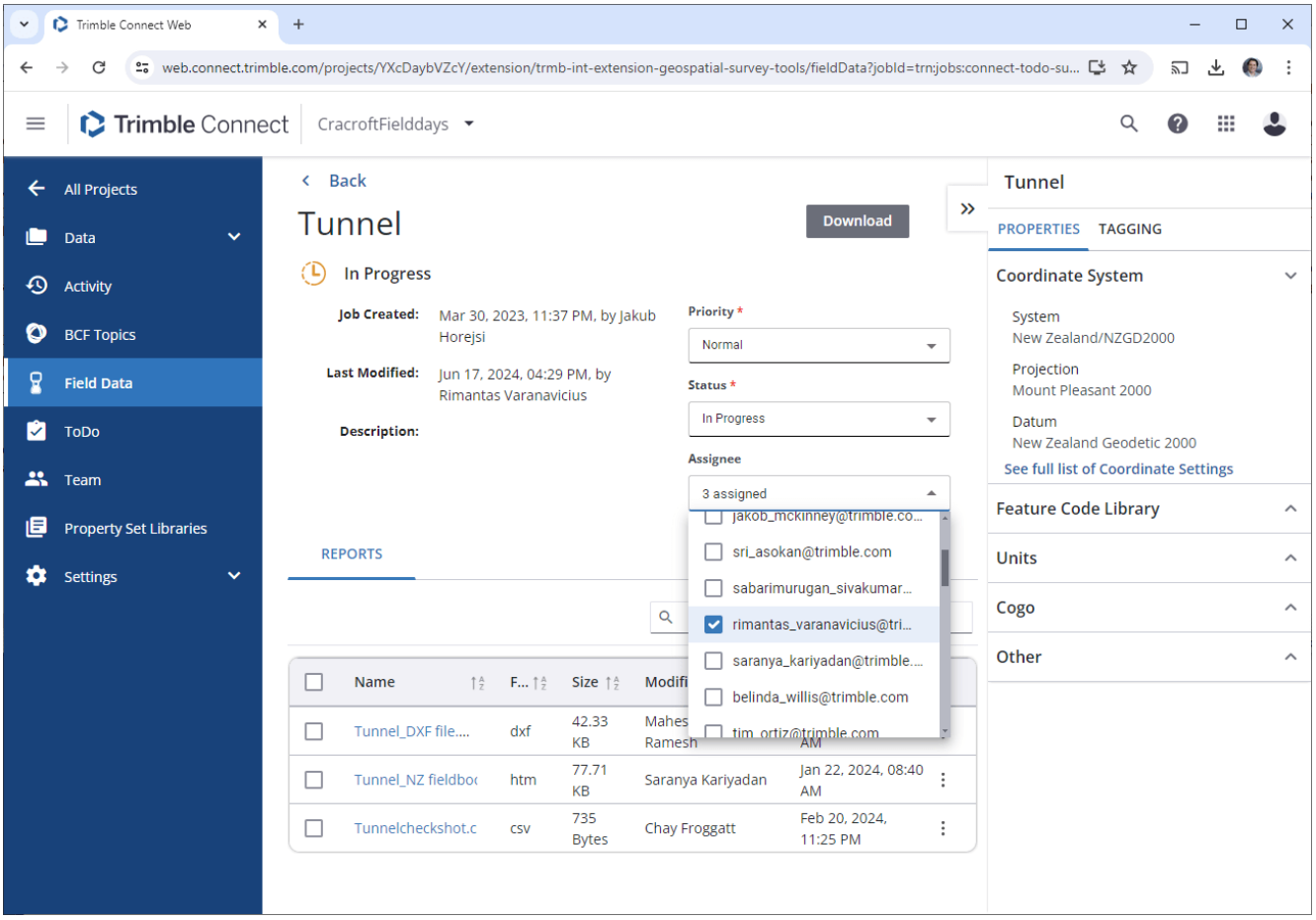


Figure 3.9. Tekla Connect interface (by https://geospatial.trimble.com).

A defining aspect of Trimble Connect is its strong orientation toward open standards. The platform supports Industry Foundation Classes (IFC) as a native format, along with the BIM Collaboration Format (BCF) for issue exchange. This allows project teams to federate models created in diverse authoring environments—such as Tekla Structures, Revit, or Archicad—into a single collaborative workspace. By reducing dependency on proprietary formats, Trimble Connect reinforces the principles of OpenBIM and supports ISO 19650–compliant workflows. Trimble Connect also emphasizes field usability. Through its mobile and web applications, construction teams can view 3D models, track tasks, access up-to-date drawings, and submit issues directly from the jobsite. Integration with Mixed Reality (MR) devices, such as Microsoft HoloLens, further enhances site-based visualization, enabling workers to compare virtual models with physical construction in real time. However, the platform is not intended to replace specialized design or coordination tools. It does not provide native clash detection or detailed model validation but rather focuses on information accessibility and collaboration. For organizations that already use Tekla Structures, the integration is seamless; for others, adoption depends on the maturity of OpenBIM workflows within the project team. Despite this, Trimble Connect is widely regarded as an effective enabler of site-based BIM collaboration, ensuring that models are not confined to design offices but actively support construction teams in executing projects more efficiently and transparently.

Revizto has become one of the most identifiable platforms for integrated issue tracking and model-based collaboration in construction projects. Developed as a cross-platform environment, it combines 2D drawing management, 3D model navigation, and real-time communication, positioning itself as a practical bridge between design teams and field personnel [126]. Unlike traditional coordination tools that primarily focus on clash detection or rule-based checking, Revizto emphasizes workflow integration. Its key strength lies in unifying different sources of project information—models, drawings, markups, and tasks—into a single interface accessible both in the office and on site. By doing so, Revizto reduces fragmentation of communication and enables project teams to respond to problems more quickly and transparently. The platform is particularly valued for its user-friendly issue management system, which

relies on the BIM Collaboration Format (BCF) but presents it in a simplified, visual manner. Users can create issues directly from model views, attach viewpoints and comments, assign responsibilities, and track resolution progress. Integration with authoring tools such as Revit, Archicad, Tekla Structures, and Civil 3D ensures that identified problems are fed back into the design workflow without information loss. In addition, Revizto has pioneered the use of immersive technologies in project coordination. With built-in support for Virtual Reality (VR), stakeholders can navigate models at full scale, identify design challenges intuitively, and enhance client communication. This feature has proven especially useful in complex projects, where spatial understanding and rapid feedback loops are critical.

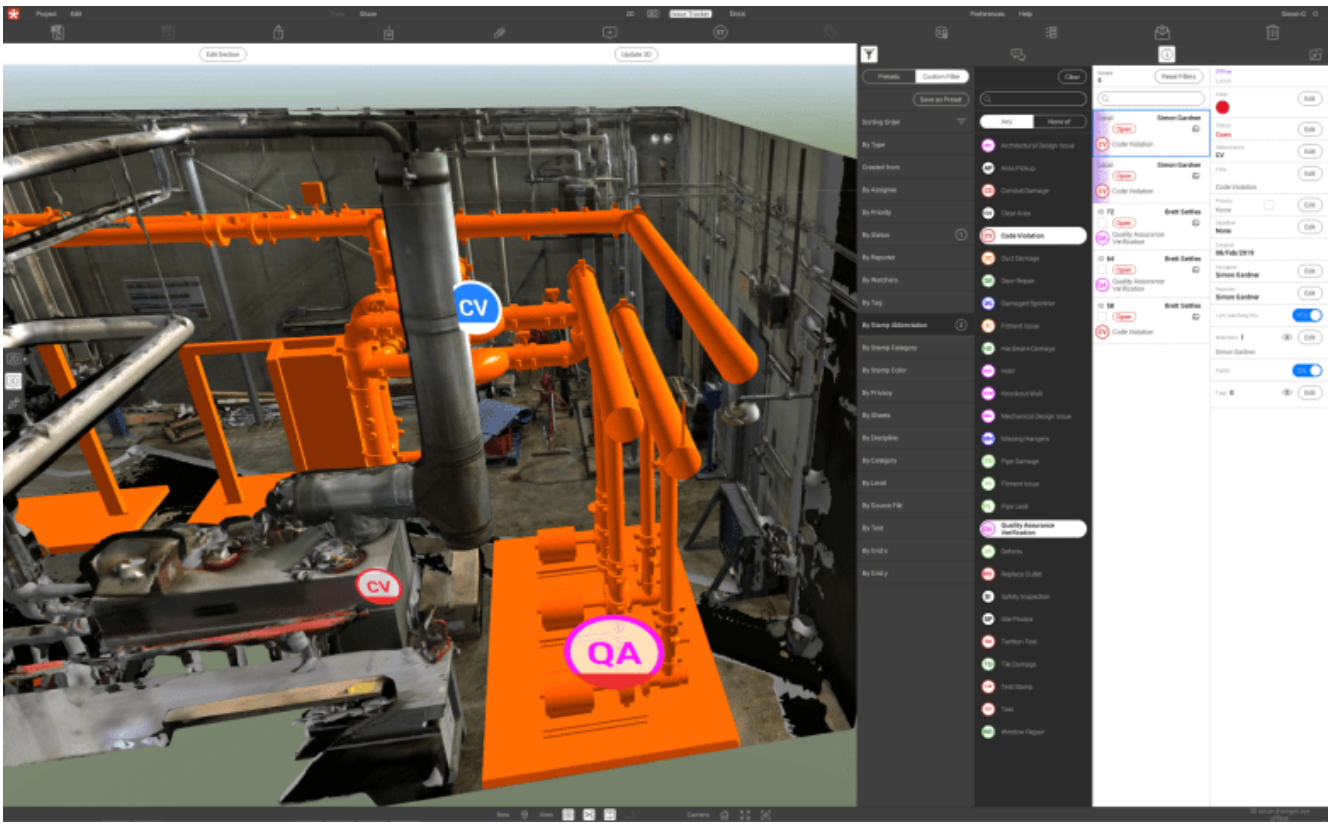


Figure 3.10. Revizto interface (by https://revizto.com).

On the downside, Revizto does not provide advanced simulation or detailed rule-based validation; it relies on external coordination tools for tasks such as clash detection. Furthermore, licensing costs may be challenging for smaller organizations. Even so, it is widely regarded as a collaboration-oriented environment that complements both authoring and coordination software by making project information more accessible and actionable in day-to-day workflows.

Dalux represents a new generation of mobile-first BIM applications, tailored specifically to extend digital workflows directly into the construction site. As opposed to platforms that evolved from desktop environments, Dalux was designed from the outset with field operatives in mind, prioritizing accessibility on smartphones and tablets [127]. Its main function is to ensure that up-to-date models, drawings, and tasks are available in the hands of site engineers, supervisors, and contractors.

Figure 3.11. Dalux interface (by https://dalux.com).

The platform provides a wide range of field-oriented capabilities, including model viewing in IFC format, drawing management, issue reporting, and task tracking. What distinguishes Dalux is its ability to overlay 3D models onto real environments through augmented reality (AR), allowing workers to compare design intent with actual construction progress directly on site. This has made Dalux particularly attractive for quality assurance, safety inspections, and real-time verification of installation works. Dalux also incorporates tools for project and facility management, enabling the same platform to be used across multiple stages of the asset lifecycle. By connecting construction-phase issue tracking with long-term building operation data, it creates

continuity between delivery and facility management—an aspect increasingly emphasized in ISO 19650–aligned workflows [128]. Nevertheless, Dalux remains strongest as a complementary tool rather than a standalone solution. While highly effective for site communication and visualization, it does not replace dedicated coordination or authoring platforms. Its success largely depends on the maturity of the project's CDE strategy and the extent to which stakeholders commit to mobile collaboration. Even so, Dalux has become a widely adopted choice in Europe and beyond, reflecting the growing demand for solutions that bring BIM out of the office and into the field.

Bentley SYNCHRO is a comprehensive platform for construction planning and management, widely recognized for its ability to link 3D models with time and resource data (4D/5D BIM). Unlike purely mobile-first solutions such as Dalux, SYNCHRO was initially developed as a desktop application (SYNCHRO Pro) focused on model-based scheduling and scenario planning. This makes it particularly suited to large and complex projects, where construction sequencing and logistics need to be simulated and optimized before execution [129].

A distinguishing feature of SYNCHRO is its modular ecosystem. While SYNCHRO Pro provides advanced 4D planning on the desktop, the companion applications SYNCHRO Control (web-based project management) and SYNCHRO Field (mobile application) extend its functionality directly to the construction site. Through these modules, project teams can access updated schedules, track daily progress, capture field data with photos and reports, and synchronize information back into the central model. This integration ensures that planning and field execution are connected within a single environment, enhancing transparency and accountability.

SYNCHRO also integrates with Bentley's iTwin platform, enabling real-time comparison of planned versus actual progress. This creates a feedback loop where construction updates from the field are continuously aligned with the project baseline. By combining planning, field reporting, and data analytics, SYNCHRO supports both high-level project control and practical on-site workflows.

Nevertheless, its comprehensive nature comes with trade-offs. The platform requires significant training and investment, and smaller organizations may find its

advanced feature set beyond immediate needs. However, for infrastructure and large-scale building projects, SYNCHRO remains a leading reference for digital construction management, particularly when both office-based planning and field execution must operate in sync.

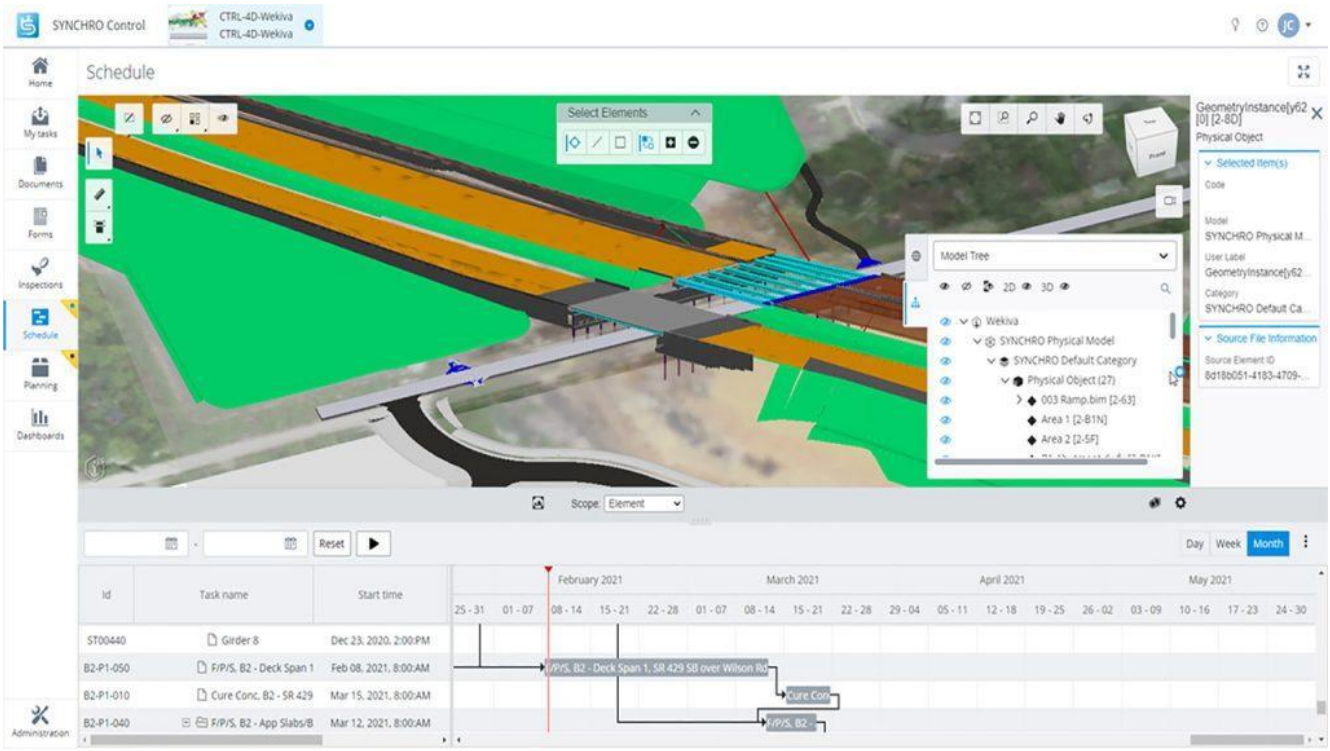


Figure 3.12. Bentley Synchro interface (by https://bentley.com).

While authoring, coordination, and construction-oriented platforms represent the most visible segments of the BIM software ecosystem, they are in fact part of a broader landscape of digital tools. The variety of applications employed in BIM practice extends well beyond modeling and clash detection. Collectively referred to as BIM tools, this landscape encompasses not only authoring and coordination environments but also specialized applications for simulation, analysis, cost estimation, and sustainability assessment. As illustrated in Figure 3.13, BIM applications can be grouped into several functional categories: authoring software, checking software, viewers, space evaluation tools, cost simulation, energy and sustainability simulators, and advanced analysis packages. Each of these serves a distinct role, but together they form an integrated digital infrastructure, enabling consistent, interoperable, and lifecycle-oriented information management across the construction industry.

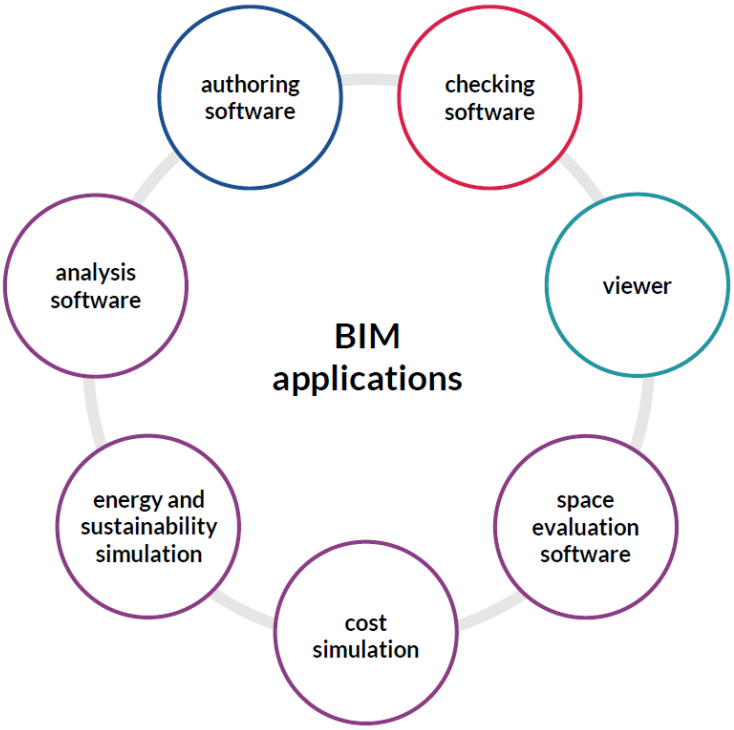


Figure 3.13 Functional groups of BIM applications (by BIMcertHandbook. (2024)).

3.3 Collaboration Platforms

A central element of modern BIM practice is the use of collaboration platforms, more formally referred to as Common Data Environments (CDEs). These platforms serve as shared digital workspaces, providing a single source of truth for models, documents, and communication across the project team. By integrating document management, version control, access rights, and audit trails, CDEs ensure that all stakeholders work with validated and up-to-date information.

CDE solutions can be broadly divided into two groups. On the one hand, enterprise-level platforms are designed for multi-organizational projects with complex workflows and contractual responsibilities. Typical examples include Oracle Aconex, CDE from Thinkproject, which are widely used on large infrastructure and international projects. On the other hand, domain-specific platforms provide tighter integration with design and engineering software. Autodesk Construction Cloud (formerly BIM 360) and Graphisoft BIMcloud exemplify this category, offering seamless connections to authoring environments and supporting discipline-oriented collaboration.

In addition to file exchange, many CDEs incorporate workflow automation (e.g., RFIs, submittals, change requests), integration with coordination tools, and increasingly also links to digital twin environments, bridging the gap between design, construction, and operations. This makes CDEs not only repositories for data but also active hubs of project governance and lifecycle information management.

Oracle Aconex [130] today is regarded as one of the most established enterprise-level CDE platforms, widely adopted on complex infrastructure and industrial projects around the world. Developed originally in Australia and now part of Oracle's construction cloud portfolio, it has built its reputation on large, multi-stakeholder projects where the neutrality of data governance is a critical issue. All documents, models, and correspondence are stored in a central environment with full versioning and traceable workflows, ensuring that information cannot be unilaterally controlled by a single party.

The platform is also known for its structured handling of RFIs, submittals, and approval chains, making it particularly attractive in public-sector and contract-driven contexts. At the same time, the scale and complexity of Aconex can pose challenges for smaller projects, where the overhead of configuration and training may outweigh its benefits.

Thinkproject [131] represents the European counterpart in this field, with its CDE solutions widely implemented in Germany, Scandinavia, and the UK. These platforms are designed with a strong focus on compliance with European BIM mandates and asset lifecycle management. Unlike many CDEs that concentrate primarily on design and construction, tpCDE is often positioned as a long-term environment that extends naturally into facility management, reflecting the growing importance of structured data handover. Users value the configurability of Conclude workflows, which can be tailored to local regulations or client-specific processes, while open standards such as IFC and BCF are supported to facilitate interoperability. Compared with Oracle Aconex, Thinkproject's solutions are perceived as more flexible and adaptable to regional practices, although their presence remains more concentrated in European markets.

Autodesk Construction Cloud [132] (formerly BIM 360) belongs to the group of integrated collaboration environments designed primarily for architects, engineers, and contractors already working within the Autodesk ecosystem. Its main strength lies in the close integration with Revit, Civil 3D, Navisworks, and other Autodesk products, allowing users to access and coordinate models directly in a cloud environment. The platform provides version control, change tracking, and cross-team coordination, while also offering modules for task management, quality assurance, and project analytics. For many organizations, this level of integration reduces compatibility issues and streamlines workflows. At the same time, critics point out that Autodesk's closed ecosystem may limit flexibility in projects where compliance with open standards is essential for full OpenBIM implementation.

Graphisoft BIMcloud [133] represents another example of a domain-specific collaboration platform, developed as an extension of Archicad. Unlike enterprise-level CDEs, BIMcloud is tailored to support real-time teamwork among architects and designers, offering instant model synchronization and controlled access across distributed teams. The solution combines on-premise server installations with cloud services, making it suitable both for small practices and large international firms. BIMcloud is often described as a "bridge" between traditional local teamwork and enterprise CDE solutions, providing essential collaboration features while maintaining simplicity and a strong focus on architectural practice. Its limitation lies in the relatively narrow integration, mostly within the Graphisoft ecosystem, yet this specialization also defines its value as a highly efficient environment for Archicad users.

3.4 Data Structure and Management Tools

A further category of BIM tools comprises data structure and management solutions, which ensure that models are not only geometrically correct but also carry the information required for reliable use across the entire lifecycle. Unlike authoring or coordination platforms, these tools are primarily concerned with the semantic layer of BIM—how properties, classifications, and information requirements are defined, validated, and exchanged.

Some solutions operate as software applications. For instance, SimpleBIM specializes in editing and normalizing IFC models, allowing project teams to trim irrelevant geometry, enrich missing attributes, and standardize naming conventions before models are shared. BIM-Q, developed by Symetri, provides a structured environment for defining and managing information requirements, enabling organizations to set clear expectations for property sets and data deliverables. Likewise, Solibri RuleSets and BIMcollab ZOOM can be used to check whether models meet agreed requirements, extending their role beyond mere coordination into information validation.

SimpleBIM [134] has established itself as one of the most widely recognized tools for editing and standardizing IFC models. Developed in Finland, it is particularly valued in OpenBIM workflows, where models from different authoring platforms must be harmonized before coordination or delivery. The application enables users to filter and simplify large IFC files, enrich elements with missing properties, and normalize attribute sets to meet project requirements. This makes it possible to transform raw exports into fit-for-purpose information models. Rather than detecting clashes or generating drawings, SimpleBIM is focused entirely on the semantic quality of data, ensuring that models are lean, consistent, and compliant with agreed information specifications.

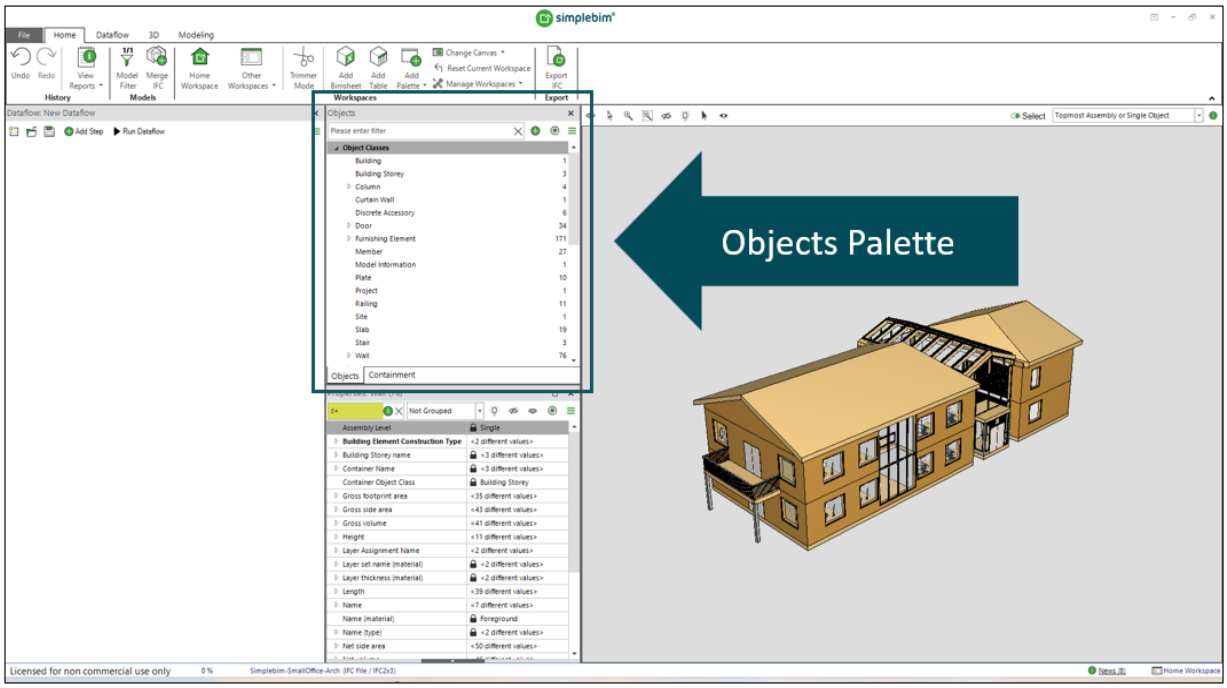


Figure 3.15. Simple BIM interface (by https:// simplebim.com).

BIM-Q, [135] created by Symetri, represents another dimension of data management: requirement definition and governance. The platform allows organizations to create and manage information requirements (EIRs, AIRs, or IDS-based templates) and link them to BIM deliverables. In practice, this means that stakeholders can specify exactly which properties each element must contain, how they should be named, and at what project stage they are expected. BIM-Q thus helps align expectations between clients, designers, and contractors, reducing the risk of incomplete or inconsistent data handover. Its strength lies in turning abstract information requirements into concrete, manageable templates that can be applied across projects.

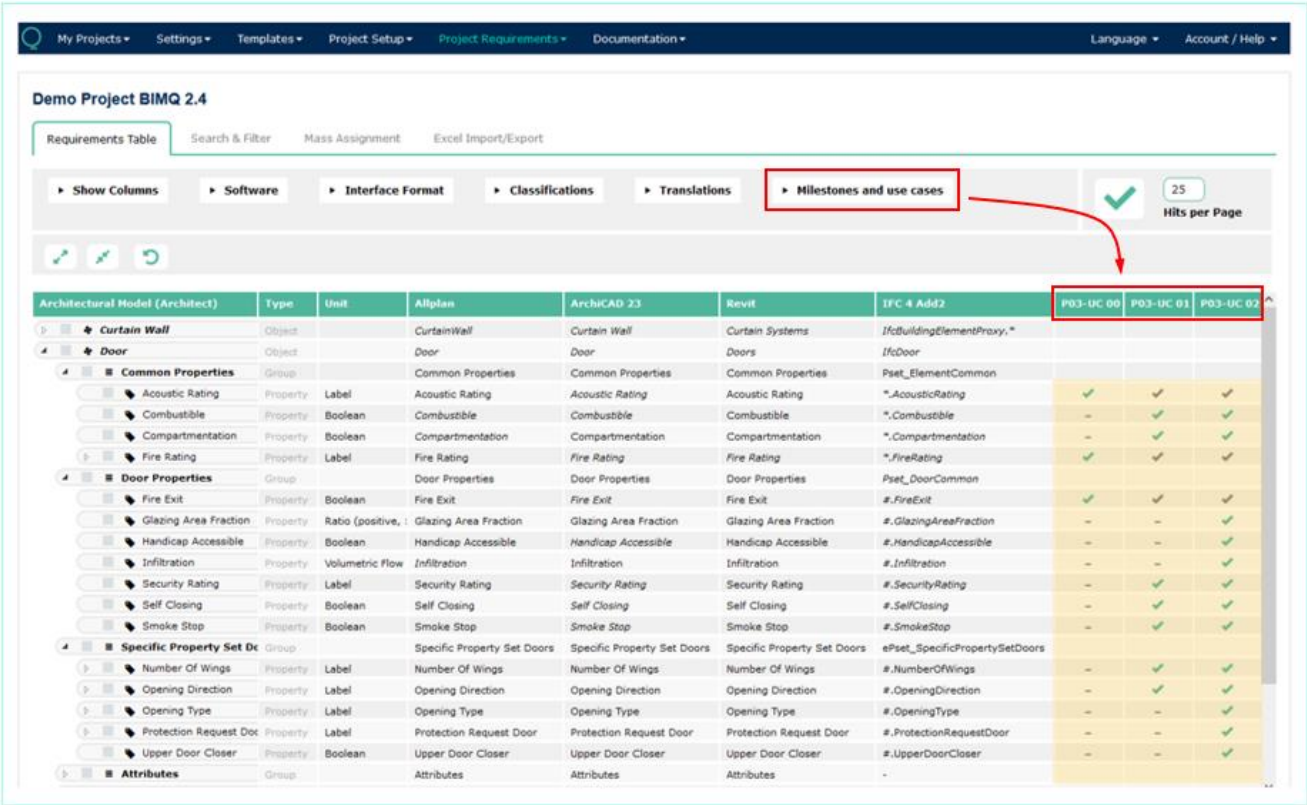


Figure 3.16. Simple BIM-Q interface (by https:// bimq.de).

It is important to underline that the boundaries between categories are often blurred. Some coordination or collaboration platforms integrate functions that belong to data management—Autodesk Construction Cloud and Trimble Connect, for example, combine CDE features with issue tracking and attribute validation. Similarly, Solibri serves both as a coordination tool and a data-checking environment. This reflects a broader industry trend toward multifunctional ecosystems, in which software

solutions increasingly merge authoring, collaboration, and information governance within a single digital workflow.

CHAPTER 4. DATA EXCHANGE AND INTEROPERABILITY

4.1. Exchange formats overview

With the growing adoption of BIM, the success of digital collaboration depends increasingly on the ability to exchange and interpret data consistently across diverse software ecosystems. Authoring, coordination, and construction tools originate from different vendors, which makes interoperability essential for ensuring reliable workflows and avoiding vendor lock-in.

In the context of openBIM, interoperability is supported by a structured set of components:

Data formats – These provide the backbone of information exchange. The most prominent are the Industry Foundation Classes (IFC), a vendor-neutral model schema standardized in ISO 16739, and the BIM Collaboration Format (BCF), which enables lightweight exchange of issues and comments linked to model elements. In addition, COBie defines a tabular format for structured handover of facility and asset data, while Data Sheets/Product Data Templates (PDTs) standardize product-level information provided by manufacturers.

Semantic services – To ensure that exchanged data carries the same meaning across platforms, services such as the buildingSMART Data Dictionary (bSDD) provide standardized properties, terms, and classifications that can be referenced directly in BIM workflows.

Methodologies and specifications – Processes such as the Information Delivery Manual (IDM) define who delivers what information, when, and why, while Model View Definitions (MVDs) constrain IFC for specific use cases. More recently, the Information Delivery Specification (IDS) has emerged as a machine-readable format to formalize project-specific information requirements.

Implementation and validation mechanisms – Interoperability is further supported by software certification programs and the buildingSMART validation

service, which ensure that applications implement open standards consistently and that exchanged data complies with agreed rules.

Together, these layers form the technical and procedural framework of openBIM. Interoperability is thus not only a technical challenge of file transfer but a comprehensive governance issue: balancing open standards that promote long-term data usability with proprietary ecosystems that may offer efficiency within their boundaries but complicate cross-platform collaboration.

4.2. Data formats

4.2.1 Industry Foundation Classes (IFC)

The challenge of connecting different BIM applications has long been one of the industry's critical bottlenecks. Proprietary formats often trap information within a single vendor's ecosystem, making collaboration across disciplines unnecessarily complex. The Industry Foundation Classes (IFC) standard emerged as a response to this problem, offering a neutral, internationally recognized schema for structuring and sharing building and infrastructure data. Formalized as ISO 16739-1:2018, it is today considered the backbone of OpenBIM practice [136].

In contrast to native formats, which prioritize software-specific features, IFC is built to describe both geometry and semantics of building elements in a consistent way. An IFC wall, for example, is not just a 3D extrusion but an object carrying attributes such as material, fire rating, cost parameters, and lifecycle data. This object-oriented logic allows information to flow across platforms—so that a wall designed in Archicad can be reviewed in Solibri or detailed in Tekla without losing its identity as a wall.

The adoption of IFC is broad: virtually all major platforms (Revit, Archicad, Allplan, Tekla, Bentley) provide import/export functions, and in many public-sector projects IFC delivery has become a contractual requirement. Yet, practical use is not without difficulties. Variations in software implementations mean that while the model can be exchanged, certain parameters—particularly advanced parametric behaviors or discipline-specific metadata—may be dropped or misinterpreted. In other words, IFC guarantees exchange, but not always perfect fidelity. Ongoing development is attempting to close these gaps. The release of IFC 4.3, which extends the schema to

infrastructure domains such as roads, rail, and bridges, illustrates the ambition to make IFC relevant beyond vertical buildings. Future iterations are expected to further tighten integration with digital twins and GIS systems, supporting the shift toward data-centric project delivery. Despite its imperfections, IFC continues to function as a strategic enabler of long-term information accessibility. By reducing vendor lock-in, aligning with ISO 19650 principles, and creating a common "language" for multidisciplinary collaboration, IFC helps ensure that BIM outputs are not isolated artifacts but transferable, auditable, and usable throughout the lifecycle of an asset.

The **Industry Foundation Classes (IFC) schema** represents the formalized data model that defines how information within a building or infrastructure project is structured, stored, and exchanged. Developed by buildingSMART International and standardized as ISO 16739-1:2018 [137], the schema provides a neutral, vendor-independent foundation for OpenBIM workflows. Its purpose is to ensure that data produced in one software application can be reliably interpreted and reused in another, thereby reducing fragmentation in digital construction.

The IFC schema is organized as an object-oriented hierarchy in which entities inherit common identification, ownership, and metadata attributes. At the highest level, *IfcProject* defines the overall context, followed by a spatial breakdown into *IfcSite*, *IfcBuilding*, *IfcBuildingStorey*, and *IfcSpace*. Within this structure, physical elements such as walls, beams, slabs, columns, doors, and windows are represented by dedicated classes (e.g., *IfcWall*, *IfcSlab*). In parallel, mechanical, electrical, and plumbing systems are defined through *IfcFlow* entities, which capture flow segments, terminals, and distribution networks.

In addition to geometry, the schema attaches property sets (Psets) and quantities (Qto) to each element, enabling the inclusion of material characteristics, performance parameters, classifications, and cost-related attributes. Relationships between objects are expressed explicitly through *IfcRel* entities (e.g., *IfcRelAggregates*, *IfcRelConnects*), transforming the model into a structured information network rather than a collection of independent shapes.

The schema supports multiple geometric representations: swept profiles, extrusions, boundary representation (B-rep), constructive solid geometry (CSG), and

tessellated meshes. This flexibility allows different authoring tools to select the most appropriate method while maintaining interoperability. Moreover, IFC offers several serializations, including STEP (*.ifc*), XML (*.ifcXML*), and JSON (*.ifcJSON*), which broaden its accessibility in both traditional CAD/BIM and modern web-based environments.

A key strength of the IFC schema is its extensibility. Each discipline—architecture, structures, MEP, or infrastructure—can extend the base schema with domain-specific entities. The latest release, IFC 4.3, expands coverage to transportation infrastructure, including bridges, railways, and roads, reflecting the industry's move toward integrated asset information models [138].

By formalizing both the semantics and geometry of building elements, the IFC schema enables multidisciplinary collaboration, standardized data delivery, and long-term archiving of BIM information. It functions not only as a technical specification but as a strategic enabler of transparent and sustainable information management across the asset lifecycle.

Table 4.1. Example of IFC data structure for IfcWall

IFC Component	**Description**	**Example Value/Entity**
Identification	Unique GlobalId, ownership, and metadata (from IfcRoot)	3kJfs9HSX4v9w12mZq (GUID), Owner: Architect
Context	Spatial location in project hierarchy	IfcBuildingStorey: Level 2
Geometry	Geometric representation (extrusion, B-rep, CSG)	Extrusion: profile 300 mm thick, height 3 m
Type definition	Associated reusable template (IfcWallType)	ExternalWall_Type_01
Property sets	Standard or project-specific attributes	Pset_WallCommon: FireRating=120 min; AcousticRating=45 dB
Quantities	Measured values for cost and analysis	Qto_WallBaseQuantities: Length=5.2 m; Area=15.6 m²; Volume=4.68 m³
Relationships	Connections to other elements	IfcRelConnects: Wall-Column junction
Materials	Assigned material layer set	Brickwork + insulation + plaster finish
Classification	External reference to a classification system	Uniclass 2015 code: Ss_25_10_20_35

The abstract structure of IFC data can be more clearly understood when viewed through a dedicated IFC viewer. Such applications allow users to inspect not only the geometry of elements but also their associated property sets, quantities, and

relationships, providing a practical illustration of how the schema is implemented in real project models.

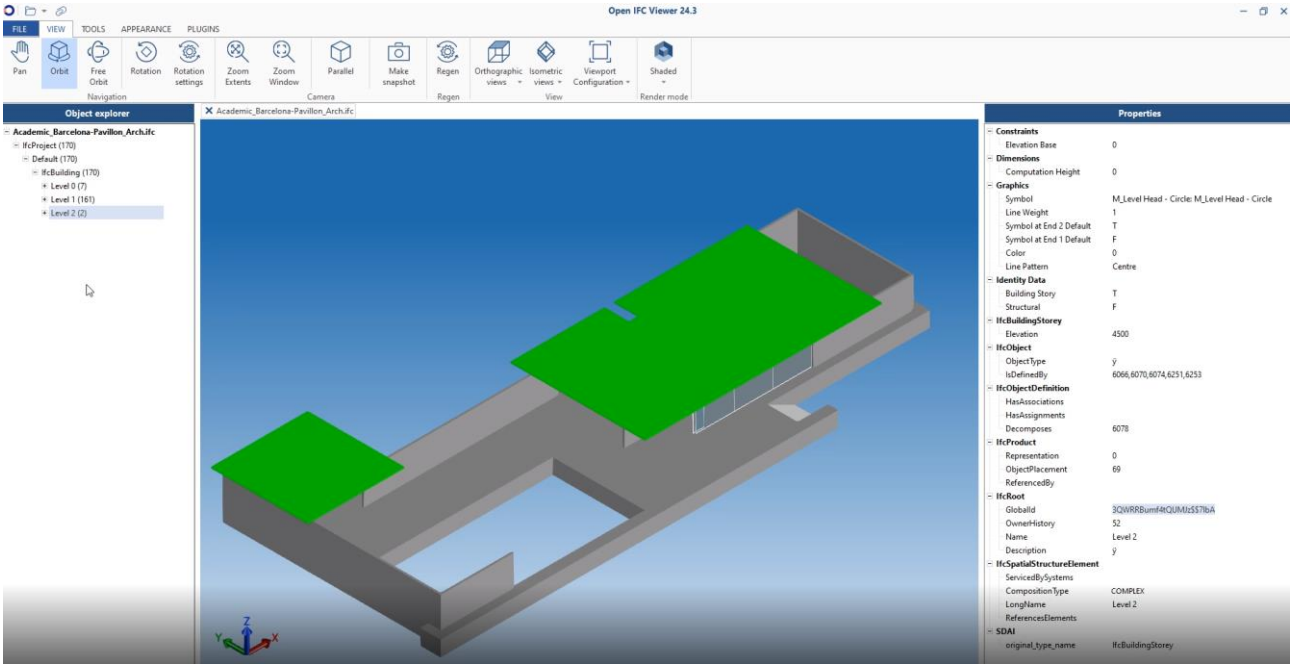


Figure 4.1. IFC structure tree in IFC viewer (https://openifcviewer.com)).

4.2.2 BIM Collaboration Format (BCF)

BIM Collaboration Format (BCF) emerged as a lightweight open standard developed by buildingSMART International (first introduced in 2009 by Solibri Inc. and Tekla Corporation) to support communication around BIM models without requiring the exchange of full model data. While IFC provides the complete schema for geometry and attributes, BCF is focused exclusively on issues, comments, and viewpoints, giving project teams a structured way to document and exchange "who, what, and where" of coordination problems. Through this mechanism, BCF allows teams to exchange targeted information about model problems—such as issue reports, status updates, component references, user details, timestamps, and even modifications related to the IFC data model—without sending the full model. This significantly improves coordination efficiency and ensures that communication remains transparent and verifiable.

BCF files typically contain references to model elements (via their IFC GUIDs), camera positions, snapshots, and textual descriptions of issues. For example, when a clash is identified in Solibri or Navisworks, the issue can be exported as a BCF file and

shared with an architect working in Revit or Archicad. Once imported, the viewpoint directs the user to the exact element in question, enabling direct resolution of the problem [139]. This avoids repeated transmission of large IFC models and ensures an efficient, traceable workflow.

An important strength of BCF lies in its interoperability across platforms. Today, most major BIM applications support the standard, including Revit, Archicad, Tekla, Solibri, BIMcollab, and Autodesk Construction Cloud. Beyond clash detection, BCF has become central to design review, model checking, and facility management processes, where issue tracking and resolution workflows are critical.

Within the framework of ISO 19650, BCF is often seen as a practical mechanism for fulfilling information management requirements, because it standardizes how issues are documented and communicated. By separating model data (IFC) from communication data (BCF), the AEC industry has gained a flexible and widely adopted method for interdisciplinary coordination that fits seamlessly into OpenBIM processes.

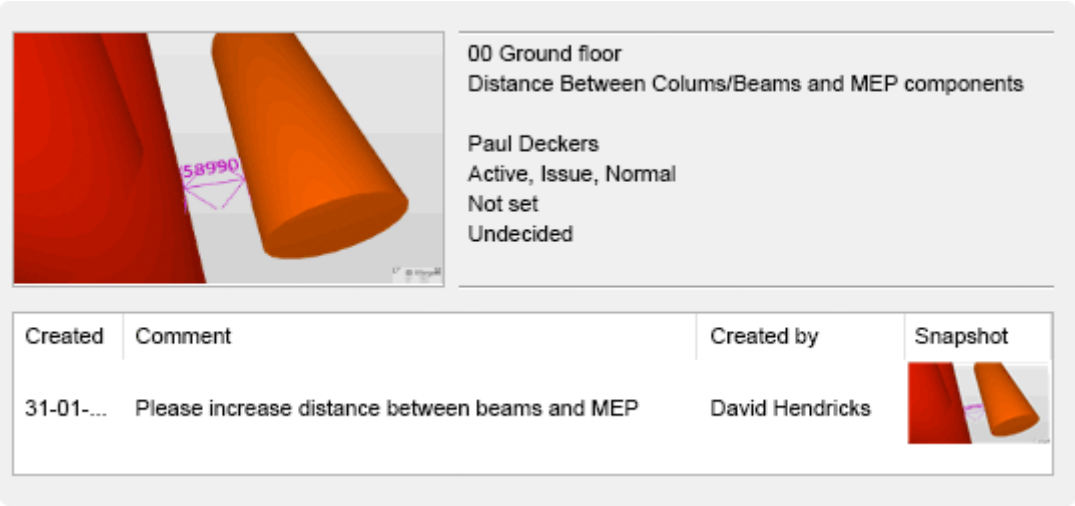


Figure 4.2. BCF format using (https:// bimcollab.com)).

4.2.3 Construction Operations Building Information Exchange (COBie)

Construction Operations Building Information Exchange (COBie) is a data exchange standard developed to support the handover of building asset information from design and construction into operation and facility management. Originating in the United States as part of a National Institute of Building Sciences initiative, COBie

was formalized in ISO 16739 (as part of IFC) and has since been adopted internationally as a key mechanism for lifecycle information delivery.

In contrast to IFC, which provides a comprehensive schema for geometry and semantics, COBie focuses specifically on structured, tabular data. It is typically implemented in a spreadsheet format (often Microsoft Excel), allowing project teams to capture essential information about equipment, spaces, systems, and maintenance requirements without needing to handle full 3D geometry. Typical COBie sheets include details on facility structure, floor and space breakdown, equipment inventories, contact information, spare parts, and scheduled maintenance tasks.

The strength of COBie lies in its simplicity and accessibility. Because it can be delivered as a standardized spreadsheet, facility managers can use the information directly in CAFM or CMMS systems without requiring specialized BIM software. At the same time, many authoring platforms (such as Revit, Archicad, or Tekla) and CDE environments can generate COBie deliverables directly, ensuring continuity of data from design through to operations.

However, COBie has also been criticized for its limitations in flexibility. The tabular format can be cumbersome on large, complex projects, and the quality of COBie deliverables often depends heavily on how well the original BIM models were structured. Nonetheless, as part of UK BIM Level 2 mandate and several national BIM standards, COBie remains one of the most widely recognized approaches for ensuring that asset information is transferred reliably at project handover.

Table 4.2. Example of COBie component sheet

Name	**TypeName**	**Space**	**System**	**Serial Number**	**Bar Code**	**External System**	**External Identifier**
AHU-01	AHU_TypeA	Level 2.101	Ventilation1	SN-000123	BC-102345	FMSystem	45821
PUMP-01	Pump_Type X	Base 0	Hydronic2	SN-000452	BC-109876	FMSystem	45822
FCU-02	FCU_TypeB	Level 3.205	HVACZone	SN-000789	BC-203145	FMSystem	45823

4.2.4 Data Sheets and Product Data Templates (PDTs)

It represents a complementary approach to data exchange in BIM, focusing not on the entire facility but on individual products and components. A Data Sheet is a structured table that captures the technical specifications of a product—for example, an air handling unit, a pump, or a door—typically including information such as dimensions, materials, performance values, energy consumption, or warranty conditions. Increasingly, these sheets are being standardized through EN ISO 23386 and EN ISO 23387, which define machine-readable templates known as Product Data Templates (PDTs). By applying PDTs, manufacturers can deliver information in a consistent digital format that can be directly integrated into BIM models, ensuring that all stakeholders work with verified and comparable data.

The key distinction between COBie and Data Sheets/PDTs lies in their scope and purpose. COBie is designed for asset information handover at the facility level, covering not only components but also spaces, systems, contacts, and maintenance schedules. It is project-wide and typically used at the transition from construction to operations. Data Sheets, on the other hand, are product-specific, focusing on the properties of individual items provided by manufacturers. While COBie answers the question of what information must be delivered about the whole asset, PDTs ensure that the information about each specific product is structured, accurate, and interoperable.

In practice, the two approaches are interlinked: PDTs can supply the detailed product data that populates COBie fields during handover. For example, a pump manufacturer's Data Sheet can provide standardized performance and warranty attributes, which are then inserted into the COBie "Component".

4.2.5 Semantic services

In the construction industry, managing technical information has always been a challenging task. The sector involves numerous stakeholders, extensive documentation, varying levels of detail, and frequent ambiguities in interpretation. Classification systems have emerged as a means of addressing three fundamental needs:

- Standardizing technical language across architects, engineers, contractors, and clients.
- Structuring and organizing information, including specifications, cost data, plans, and maintenance requirements.
- Enhancing communication and traceability within technical documentation and management systems.

The buildingSMART Data Dictionary (bSDD) offers standardized definitions and properties for building elements, ensuring that the same term or attribute has the same meaning across software platforms and national contexts. Similarly, classification systems such as Uniclass 2015, OmniClass, and CoClass, Uniformat, Masterformat provide taxonomies that structure building elements, products, and processes into consistent categories, supporting interoperability and lifecycle data management.

The **buildingSMART Data Dictionary** (bSDD) is not a stand-alone software product but a standardized online service that provides internationally recognized property sets and terminology. Integrated into many BIM platforms, it allows model elements to be linked with consistent definitions, ensuring that “fire resistance rating,” for example, is understood and stored in the same way regardless of authoring software or national standard. By providing a common semantic foundation, bSDD underpins OpenBIM interoperability and supports compliance with ISO 23386 on data dictionaries. Its role is particularly important for cross-border projects, where differences in language and local conventions can otherwise lead to misinterpretation.

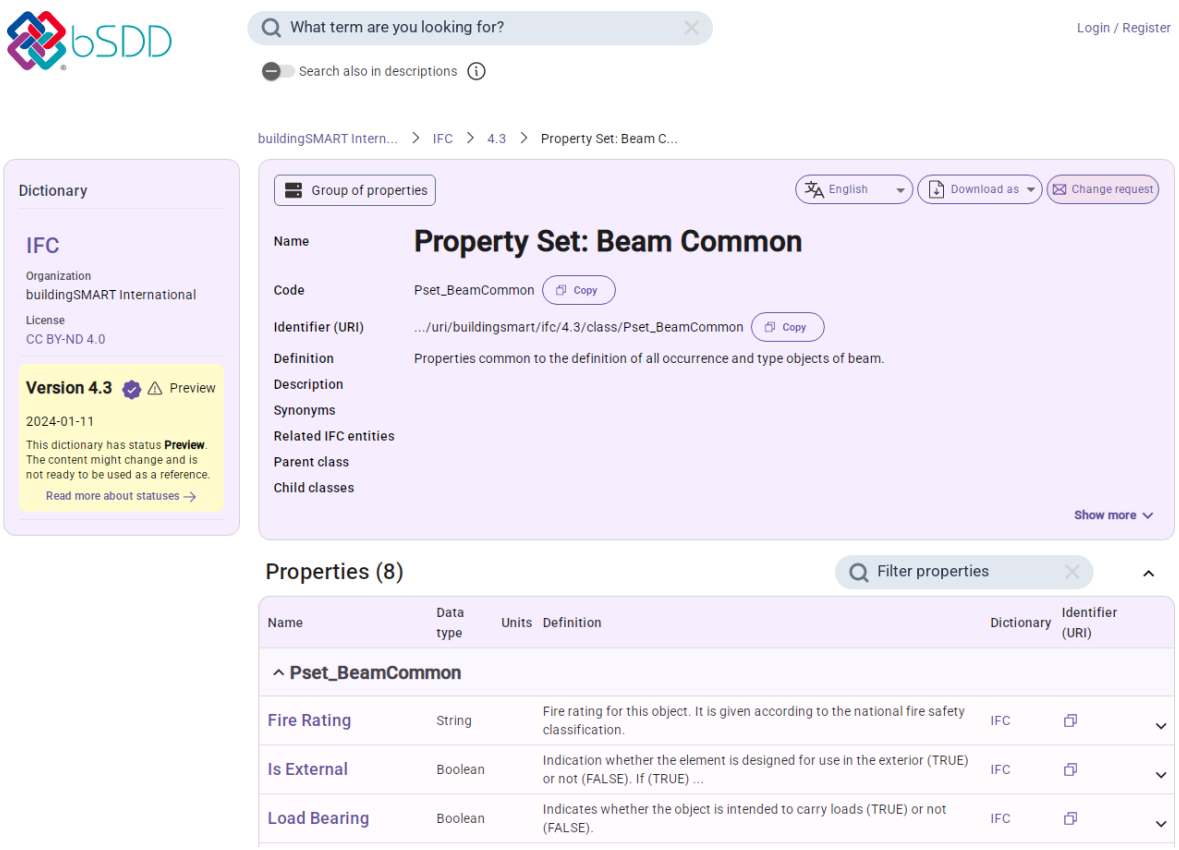


Figure 4.3. bsDD online dictionary (https://search.bsdd.buildingsmart.org/).

Uniclass 2015 represents a modern classification system widely adopted in the United Kingdom and increasingly beyond. It structures the built environment into hierarchical tables covering elements, systems, products, and activities, enabling consistent categorization of BIM objects. By applying Uniclass codes within a model, project teams can ensure that elements are classified uniformly, which in turn facilitates quantity take-off, cost planning, and asset management. Unlike software that validates data, Uniclass functions as a framework into which information can be organized, thereby supporting standardization at scale. Its integration with CDEs and model-checking tools has made it a central component of many national BIM mandates.

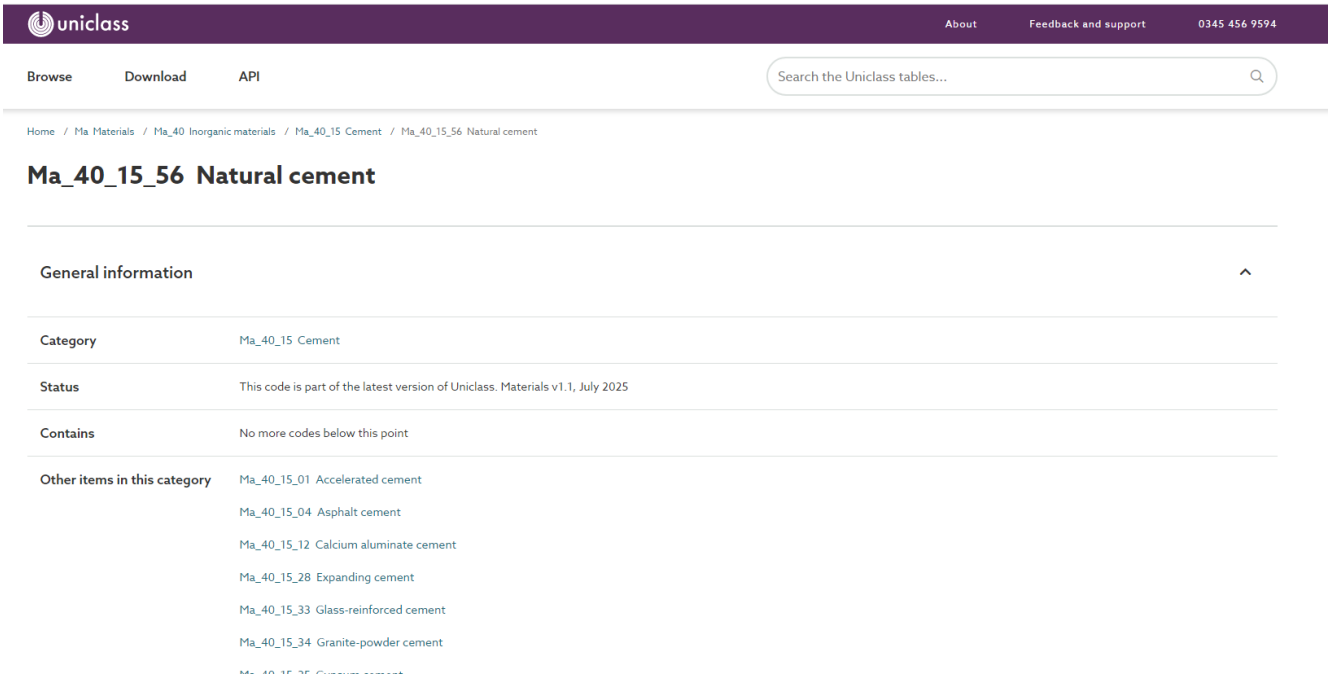


Figure 4.4. UniClass classification (https://uniclass.thenbs.com/).

OmniClass is a classification framework developed primarily for North America, designed to organize all aspects of the built environment, from construction elements and products to processes and phases. It consists of fifteen interrelated tables, each addressing a specific domain such as work results, materials, or spaces. Within BIM workflows, OmniClass codes are often applied to model elements to support cost estimation, facility management, and data exchange with external databases. Its strength lies in the breadth of coverage, making it suitable not only for design but also for procurement and lifecycle operations. However, the complexity of maintaining fifteen tables can pose challenges in implementation, and in practice it is often applied selectively depending on project requirements.

CoClass, developed in Sweden as part of the national digitalization strategy for construction, represents a new generation of classification systems fully aligned with international standards such as ISO 12006-3 and IFC. Unlike earlier systems, CoClass was designed from the outset to serve digital workflows, providing machine-readable codes and attributes that can be embedded directly into BIM models. Its scope extends beyond buildings to include infrastructure assets, ensuring consistent terminology across the entire built environment. CoClass also links classifications to property sets, which strengthens its role in asset information modeling and long-term facility

management. While adoption remains strongest in Scandinavia, CoClass is increasingly recognized internationally as a model for how classification can support OpenBIM and lifecycle interoperability.

4.3 Methodologies and specifications for information exchange

4.3.1. Information Delivery Manual (IDM)

The Information Delivery Manual (IDM) is a methodological framework developed under the buildingSMART initiative to define who delivers what information, when, and for what purpose within a BIM process.

Its origins can be traced to the need for structured descriptions of information exchanges across project phases, ensuring that data requirements are explicit, consistent, and aligned with the tasks of each stakeholder [140].

Unlike data formats such as IFC or COBie, which prescribe how information is represented, IDM addresses the process dimension of interoperability. It identifies the actors involved, their responsibilities, and the information they must exchange at specific milestones. This makes IDM a critical tool for bridging the gap between business processes and technical data schemas [141].

An IDM typically contains:

- process maps, describing the sequence of activities and responsibilities, often visualized in BPMN-like diagrams.
- exchange requirements, specifying what information is needed, by whom, and in which form.
- functional parts, which decompose information exchanges into reusable building blocks applicable across multiple projects or domains [142].

Through this structure, IDM contributes to the definition of Model View Definitions (MVDs)—filtered subsets of IFC tailored for specific use cases, such as energy simulation or cost estimation. In recent years, IDM principles have also informed the development of Information Delivery Specification (IDS), a machine-readable approach to formalizing information requirements [143].

The adoption of IDM brings several benefits: it enhances transparency in communication, reduces the risk of missing or ambiguous data, and aligns BIM

processes with contractual and regulatory frameworks. However, its implementation can be resource-intensive, as it requires careful modeling of processes and close collaboration between technical and managerial stakeholders [144].

IDMs are typically developed using Business Process Model and Notation (BPMN). buildingSMART offers templates to facilitate their creation, ensuring consistency across projects. Within the value chain, stakeholders rely on IDMs to clearly express their information needs, which are commonly articulated through questions such as [138]:

- Who are the involved stakeholders and what are their responsibilities?
- What information is required from the model?
- What complementary inputs are necessary?
- What must the provider deliver and what is expected by the recipient?

The outcome of this process is a document containing an interaction or transaction map, a process diagram, and a set of Exchange Information Requirements (EIRs). The interaction map defines the roles and the flow of transactions between them, while the process diagram illustrates the chronological order of activities. According to ISO 29481-1, each IDM component—whether an interaction map, a process diagram, or an EIR—must include administrative metadata (header information) along with a concise description of its content, scope, objectives, and intended use.

In this way, an IDM defines the scope and type of information that particular project roles must either provide or consume at specific points in the process. A well-formulated IDM is essential to guarantee that transmitted data is structured in such a way that the receiving software can interpret it correctly.

ISO 29481-2 [145] extends this framework by distinguishing IDM “zones,” which differentiate between user requirements and technical implementation. Within the ecosystem of ISO and buildingSMART standards, the IDM plays a pivotal role in translating defined processes into a basis for creating Model View Definitions (MVDs) or Information Delivery Specifications (IDSs), often making use of resources such as the buildingSMART Data Dictionary (bSDD) to ensure semantic consistency.

E.g. in Germany, the procedure for creating IDMs is formalized in VDI 2552 Part 4, which outlines the following steps:

- identification of roles and responsibilities,
- definition of recurring processes and tasks,
- determination of the information required,
- specification of the information to be exchanged,
- mapping of this information within the data model, and
- development of the corresponding Model View Definition (MVD).

4.3.2. Model View Definitions (MVDs)

While the Information Delivery Manual (IDM) describes who delivers what information and when, the practical implementation of these requirements in digital workflows relies on Model View Definitions (MVDs). An MVD can be understood as a filtered subset of the IFC schema, tailored to support a specific use case such as architectural design exchange, structural analysis, energy simulation, or facility handover.

The IFC standard is intentionally broad, covering a vast range of domains and information types. However, not every project or discipline requires the entire schema. An MVD therefore constrains IFC to a manageable scope, specifying which entities, properties, and relationships must be included to fulfill a defined exchange requirement (ISO 16739-1:2018 [146]). In this way, MVDs serve as the bridge between IDM process maps and the technical implementation of data exchange in software.

Examples of MVDs include the Coordination View, widely used to exchange multidisciplinary models for clash detection, and the Design Transfer View, aimed at preserving parametric design intent during model handover between authoring platforms. Specialized domains, such as energy performance or structural analysis, have also developed their own MVDs to ensure that only relevant geometry and property data are exchanged [147].

MVDs have played a pivotal role in enabling software certification. buildingSMART uses MVDs as the basis for verifying whether applications correctly import and export IFC for defined purposes. This guarantees that data can be

exchanged reliably between tools without semantic loss. At the same time, the industry has noted that the proliferation of different MVDs can lead to fragmentation and confusion, prompting new approaches such as the Information Delivery Specification (IDS), which offers a more flexible and machine-readable way of defining exchange requirements [148].

The processes and information defined in an Information Delivery Manual (IDM) are transformed into precise, machine-readable requirements through Model View Definitions (MVDs). An MVD represents a process-oriented subset of the broader IFC schema, tailored to a particular use case or workflow. While the IFC schema covers a vast range of objects and concepts relevant to the construction industry, only a fraction of these classes is required for specific tasks.

A typical example is design coordination between architecture, structural engineering, and building services (MEP) disciplines. For this purpose, classes such as walls, columns, and pipes are necessary, while classes describing actions or processes are not. Similarly, IFC supports different methods of geometric representation—objects can be stored as simple surfaces or as parametric extrusions. In coordination workflows, a surface representation is usually sufficient, and an MVD can define such constraints explicitly.

Thus, an MVD specifies the application-specific requirements for data exchange, determining which elements, attributes, and property sets are needed in a given scenario. The scope of an MVD can vary:

- it may encompass almost the entire IFC schema (e.g., for archiving a complete project), or
- it may be limited to a small number of object types with their associated data (e.g., cost estimation of a façade system).

MVDs provide structured guidance for interpreting IFC entities, relationships, attributes, and property sets. They define both what information must be exchanged and how it should be represented, ensuring that software interprets the data consistently. Similar to IFC expressed in XML, MVDs are also machine-readable, typically using the mvdXML format. Documenting an MVD allows the exchange to

be standardized and repeated, creating predictability across multiple projects and platforms.

Because MVDs require specific software implementations, project stakeholders are advised to rely on officially published MVDs rather than developing their own. Accordingly, Exchange Information Requirements (EIRs) and BIM Execution Plans (BEPs) typically specify which MVDs and transfer configurations must be applied.

Among the most widely used MVDs are:

- **IFC2x3 Coordination View CV2.0** – defines spatial and physical components for multidisciplinary design coordination (architecture, structural analysis, MEP, and FM handover).
- **IFC4 Reference View (RV)** – provides simplified geometric and relational representations to enable consistent referencing of models between disciplines.
- **IFC4 Design Transfer View (DTV)** – supports advanced geometry and relational detail to enable accurate transfer of models between authoring tools; designed as a one-way, responsibility-shifting exchange rather than iterative back-and-forth transfer.

In combination with other ISO and buildingSMART standards, MVDs allow IDM-defined processes to be implemented using targeted subsets of IFC, enriched by resources such as the buildingSMART Data Dictionary (bSDD) to guarantee semantic consistency.

In summary, MVDs operationalize IDM principles by translating process requirements into concrete subsets of IFC. They have been instrumental in scaling IFC adoption across disciplines, ensuring that BIM data can be exchanged in a targeted and purpose-driven manner.

4.3.3. Information Delivery Specification (IDS)

The Information Delivery Specification (IDS) is the most recent initiative by buildingSMART, designed to provide a machine-readable way of defining information requirements in BIM processes. Whereas the Information Delivery Manual (IDM) outlines *who delivers what information and when*, and Model View Definitions (MVDs) translate these requirements into subsets of the IFC schema, IDS offers a more

flexible, digital mechanism to ensure that models comply with project-specific needs [148].

An IDS document describes the properties, classifications, or geometry that must be present in BIM objects, together with rules on their completeness and validity. For instance, an IDS may state that every *door* object must include attributes such as *FireRating* or *AcousticRating*, or that all *HVAC units* must carry manufacturer references. These requirements can then be checked automatically, either during modeling or at defined project milestones, ensuring that data is fit for purpose before it is exchanged [149].

Compared with traditional IDM/MVD workflows, IDS is:

- machine-readable, making it possible to validate models automatically using software tools.
- more flexible, as it is not tied to predefined IFC "views" but allows requirements to be expressed directly.

Closer to practice, since it enables project teams or clients to formalize their Exchange Information Requirements (EIRs) in a structured and testable way.

The use of IDS is expected to significantly reduce misinterpretation of information requirements and to strengthen compliance with ISO 19650 principles, which emphasize "the right information, at the right time, to the right people." Its adoption is growing, particularly in contexts where clients and public authorities demand reliable asset information at handover.

An emerging alternative for the technical specification of information requirements in BIM processes is IDS. Introduced by buildingSMART, IDS provides a computer-interpretable format for defining exchange requirements with a particular emphasis on alphanumeric data. Unlike Model View Definitions (MVDs), which are primarily used in software development to ensure that classes, geometry, and spatial structures can be correctly processed, IDS focuses on specifying what non-graphical properties should be attached to which objects and with which values or units. In this way, IDS is particularly suited for formalizing the Level of Information (LOI) within a project.

Traditionally, LOI requirements have been communicated through spreadsheets or PDF documents, which limited their integration into automated workflows. IDS addresses this gap by offering a standardized, machine-readable XML format, allowing requirements to be applied directly within digital processes. It can be used in two primary contexts:

- as a configuration file for authoring tools, enabling the automatic creation of the required property structure within models;
- as a configuration file for checking tools, enabling automated compliance validation through predefined rules.

This approach effectively closes the loop between the definition of information requirements and their verification in model checking.

Another key advantage of IDS lies in its ability to formulate conditional rules. Instead of specifying requirements at the broad class level (e.g., “all IfcWall objects must have fire rating”), IDS enables more refined statements. For instance, a property such as *ConcreteGrade* is required only if the material of the element is concrete, or a wall’s fire rating must begin with “R” (e.g., REI90) if the wall is defined as load-bearing. This selective filtering supports greater precision and contextual relevance in defining requirements.

Technically, IDS is an XML-based standard with a schema developed by buildingSMART. Its open and straightforward structure allows both humans and software applications to interpret requirements unambiguously. Combined with complementary standards such as the buildingSMART Data Dictionary (bSDD) and Use Case Management (UCM), IDS helps to ensure that information requirements are clear, consistent, and enforceable throughout the BIM process.

Table 4.3. Key differences within methodologies

Aspect	IDM (Information Delivery Manual)	MVD (Model View Definition)	IDS (Information Delivery Specification)
Scope	Process-level framework across the project lifecycle	Subset of IFC schema tailored to a specific exchange requirement	Machine-readable specification of data requirements
Purpose	Define who delivers what information, when, and for what purpose	Translate IDM requirements into technical IFC subsets	Ensure models contain the right properties, classifications, and geometry
How it works	Creates process maps and exchange requirements; links business needs to technical data	Filter IFC entities, properties, and relationships to meet specific use cases	Formalizes rules (e.g., FireRating required for all doors) and enables automated validation
Typical use cases	High-level process mapping, defining Exchange Information Requirements (EIRs), aligning stakeholders	Coordination View, Design Transfer View, Structural or Energy simulation exchanges	Checking compliance with EIRs, automated model validation, client-side quality assurance

4.3.4. Software certification

The IFC standard is now supported across all major BIM software platforms. To ensure reliable data exchange, buildingSMART International provides a certification program that verifies whether applications correctly implement IFC. Until recently, this certification has been based on Model View Definitions (MVDs) — technical subsets of the IFC schema designed for specific use cases. Vendors can apply for this paid service, which guarantees that their software is capable of exporting and importing IFC data in line with officially defined MVDs [150].

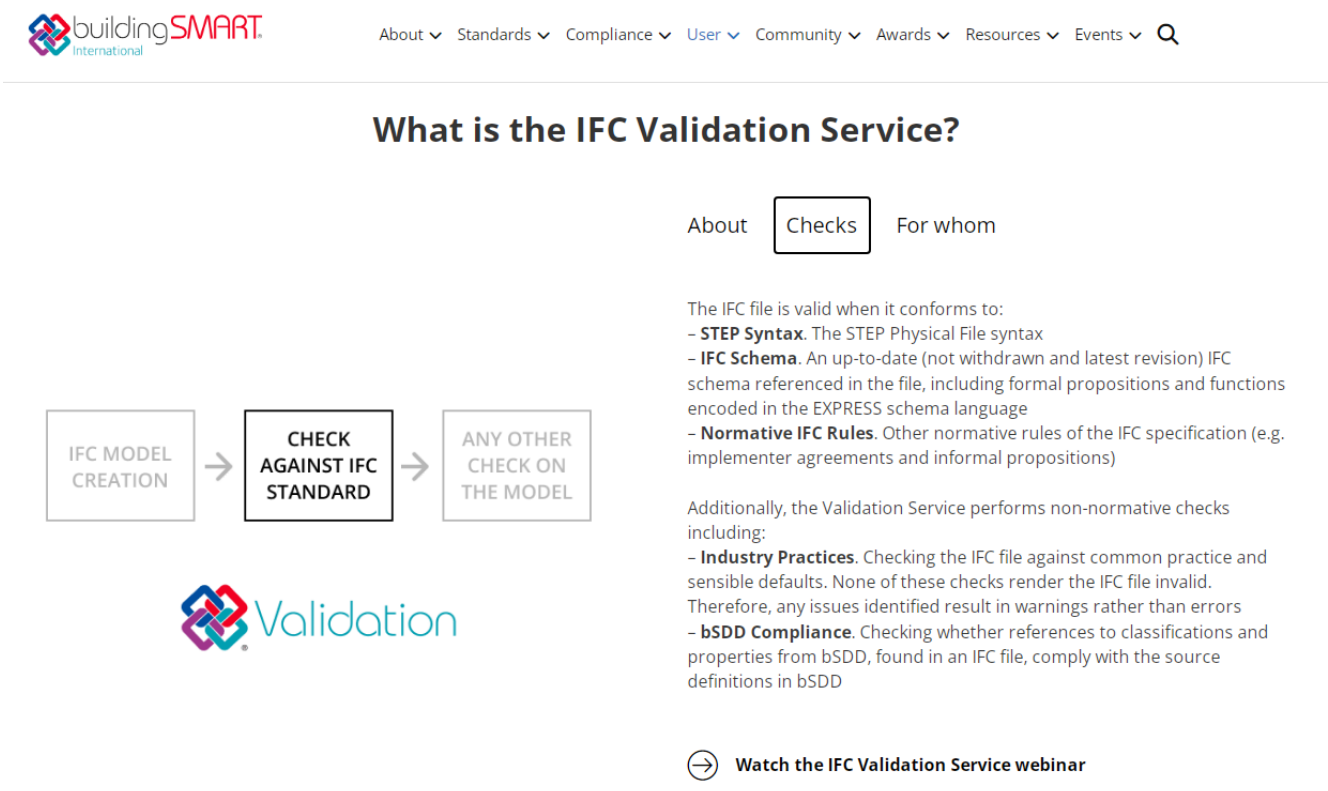


Figure 4.5. Web planform for validation service

https://www.buildingsmart.org/users/services/validation-service/).

In addition to certification, buildingSMART has introduced the Validation Service, a publicly accessible online tool for testing IFC files. Through this platform, users can upload models and check whether they comply with the IFC specification. The service primarily verifies:

- conformance to the selected IFC schema (e.g., IFC4),
- syntactic correctness of the STEP physical file,
- compliance with schema rules (e.g., a polyline must not contain duplicate points).

Where available, the Validation Service can also test conformance against classifications referenced in the buildingSMART Data Dictionary (bSDD). However, it does not evaluate whether a file contains the full set of required properties, nor can it validate models against IDS requirements. Its scope is limited to technical validation rather than content validation.

For software vendors, the Validation Service offers a way to check the quality of their IFC implementations (currently limited to exported files). For end users, it

provides a straightforward method to assess the integrity of IFC files received from project partners. By improving the technical quality of IFC models, the service contributes to greater interoperability across different BIM applications.

Looking ahead, the Validation Service may also become part of the official certification process. At present, it is available in beta form and can be used by anyone with a free buildingSMART account.

GLOSSARY

Actuator. A device that physically controls a mechanism or system in response to a control signal from a BMS, e.g., opening a valve or adjusting a damper.

AI (Artificial Intelligence). Technologies that simulate human intelligence to process data, identify patterns, make decisions, and optimize operations in BIM environments, especially for design validation and predictive analytics.

Alphanumeric Information. Structured, non-graphical data attached to model elements (e.g., performance values, cost, warranty information) critical for automation and facility management.

Application Programming Interface (API). A set of tools and protocols enabling different software systems to communicate and exchange data, critical for integrating real-time sensor data with BIM platforms.

Asset Information Model (AIM). The validated data model derived from PIM, used for operation and maintenance throughout the asset's life.

Audit Trail. A digital record of all user actions within a system, enabling tracking of changes, accountability, and quality control in shared BIM models.

Augmented Reality (AR). A visualization technology that overlays live digital information (e.g., sensor data) onto the physical environment, enhancing real-time decision-making.

BACnet (Building Automation and Control Network). A standardized communication protocol used in BMS for interoperability between devices from different manufacturers.

BCF (BIM Collaboration Format). An open XML/JSON-based protocol for exchanging model-related issues, comments, and viewpoints without transferring geometry. BCF links problem reports directly to model elements through their IFC GUIDs, streamlining coordination and clash resolution workflows.

Big BIM Data. An approach that leverages vast datasets from SCADA and IoT systems for advanced analytics and performance optimization in BIM platforms.

Big Data. High-volume, high-velocity, and high-variety datasets that require advanced processing and analysis methods—used in BIM to derive insights across the lifecycle.

BIM (Building Information Modelling). A collaborative process that uses structured digital information to support the planning, design, construction, and operation of buildings and infrastructure throughout their lifecycle.

BIM Coordinator. A project-level facilitator who ensures consistent and collaborative BIM implementation. They coordinate integration of discipline-specific models, enforce BIM standards and workflows, perform clash detection and resolution, and manage model quality control throughout the project lifecycle.

BIM Data. Information embedded in or linked to digital models that represents physical, functional, temporal, and cost-related aspects of built assets across their lifecycle.

BIM Dimensions. Extensions of the traditional 3D BIM model that incorporate additional project information (from 3D to 10D).

BIM Execution Plan (BEP/BXP). A detailed project document outlining how BIM processes will be implemented, managed, and delivered. It aligns project teams with client expectations, defines roles, specifies software tools, collaboration methods, and quality control procedures, and evolves from Pre-Contract to Post-Contract phases.

BIM Manager. A strategic leader responsible for the overall BIM adoption and integration within an organization. They develop BIM strategies, maintain standards, oversee multi-disciplinary model integration, manage digital transformation, and ensure BIM delivers business value aligned with organizational goals and industry standards.

BIM Maturity Levels. A scale describing the degree of collaboration and standardisation in BIM processes, ranging from Level 0 (no collaboration) to Level 3 (fully integrated, interoperable BIM).

BIM Specialist (BIM Author, BIM Modeler). A technical expert who creates and maintains detailed, data-rich 3D BIM models representing design intent and technical specifications within a specific discipline. They ensure model accuracy,

perform clash detection, and collaborate with other BIM roles to support digital project delivery.

BIM Total Coordinator. A BIM Coordinator responsible for overseeing the integration of all discipline-specific models into a federated model, ensuring cross-disciplinary compatibility and managing the model release process within planning cycles.

BMS (Building Management System). A system that automates and monitors building services such as HVAC, lighting, fire safety, and energy usage. BIM-BMS integration enables real-time operational intelligence and enhanced energy management.

bSDD (buildingSMART Data Dictionary). A global, multilingual ontology maintained by buildingSMART, enabling consistent definition and mapping of construction terms, properties, and classifications. bSDD ensures semantic interoperability across BIM tools and facilitates alignment with external standards (ISO, EN, UNI, etc.).

CAFM (Computer-Aided Facility Management). Software used to manage buildings and facilities, often integrated with BIM for asset tracking and maintenance planning.

CDW (Construction and Demolition Waste). Waste generated during construction, renovation, or demolition of buildings and infrastructure.

City Information Model (CIM). A city-scale extension of BIM used for urban planning and infrastructure management by integrating spatial data and 3D models.

Cloud-Based BIM. A form of BIM hosted on cloud platforms that enables real-time collaboration, remote access, automated synchronization, and scalable data storage among project stakeholders.

Cloud-Based Platforms. Remote servers used to store, manage, and process BMS and BIM data, enabling scalability, analytics, and integration with AI or IoT services.

CMMS (Computerized Maintenance Management System). A software system that manages maintenance operations, scheduling, and documentation.

COBie (Construction Operations Building Information Exchange). A data schema (spreadsheet/XML-based) for structuring asset and maintenance information to support facility management (FM). COBie ensures that key data — such as components, systems, and documentation — are handed over from design and construction to operation.

Common Data Environment (CDE). A shared digital space for storing and managing all project-related data, documents, and models to ensure collaboration and version control.

Connected Workflows. Digitally linked processes across the project lifecycle that ensure continuity of data, reduced rework, and improved coordination between disciplines through integrated software tools and platforms.

Controller (DDC - Direct Digital Controller). Programmable control units within the BMS that process sensor inputs and issue outputs to actuators based on logic rules.

CPMS (Capital Planning and Management System). A tool used during planning for forecasting costs, risks, and resource allocation in long-term infrastructure investment.

Cyber-physical Integration. The blending of physical infrastructure with digital systems and IoT for real-time monitoring and adaptive control.

Cyber-Physical System. A system that tightly integrates computation, networking, and physical processes—exemplified by BIM environments enhanced with SCADA and IoT.

Cybersecurity in BIM. Practices and technologies that protect BIM data and systems from unauthorized access, breaches, and manipulation, especially important in cloud environments dealing with critical infrastructure.

Data Interoperability. The ability of systems and software to exchange, interpret, and use data seamlessly across tools, formats, and stages.

Data Synchronization. The automatic updating and alignment of data between different systems or users to ensure consistency in shared BIM environments.

Deconstruction Information Model (DIM). A model developed to support the End-of-Life (EOL) phase of an asset, containing information necessary for

deconstruction, material recovery, or disposal, thereby supporting circular economy goals.

Design for Disassembly (DfD). A design approach that allows easy dismantling of building components for reuse or recycling.

Digital Twin. A dynamic, real-time digital replica of a physical asset (e.g., building, bridge, or city), which evolves through data collected via sensors and integrated systems. Used for monitoring, simulation, and predictive maintenance.

Dynamic Digital Twin. An advanced form of a digital twin that continuously updates itself using real-time data, enabling adaptive infrastructure management.

Employer's Information Requirements (EIR). A foundational document created by the client to define data needs, formats, delivery expectations, and BIM objectives. It sets the stage for information management and guides the creation of the BEP.

Environmental Twin. A type of digital twin that models environmental impacts and helps guide sustainability strategies.

EoL (End-of-Life). The final phase in an asset's lifecycle, involving decisions around decommissioning, demolition, or reuse.

Exchange Information Requirements (EIR). A subset of the EIR focusing specifically on what information is needed, by whom, when, and in what format, to enable effective information exchange between stakeholders.

Facility Management (FM). The coordination of physical workspace with people and work of an organization, enabled by BIM to improve operation and maintenance.

Federated Model. An aggregate of multiple discipline-specific BIM models (architecture, structure, MEP), linked but not merged, allowing coordination while preserving authorship.

Field Level (BMS). The lowest tier in BMS architecture consisting of sensors and actuators that gather real-time environmental data and perform control actions.

GIS (Geographic Information Systems). Systems for capturing, analyzing, and managing spatial and geographic data. GIS integration with BIM enables multi-scale planning and infrastructure coordination, especially in urban environments.

Graphical Data. Visual elements in a BIM model (lines, shapes, colours, geometries) that help visualize and coordinate components but may lack embedded metadata.

Graphical Representation. The visual modelling of elements in a BIM environment, used for spatial coordination, clash detection, and visualization.

GUI (Graphical User Interface). The user-facing component of a BMS at the management level, providing visualization, alarms, and control dashboards.

Human-Machine Interface (HMI). A graphical interface that allows human operators to interact with SCADA systems and interpret data visually.

IDM (Information Delivery Manual). A standardized methodology (ISO 29481) defining who exchanges what information, when, and for what purpose during a project lifecycle. IDM structures exchange requirements between disciplines and provides the foundation for defining Model View Definitions (MVDs).

IDS (Information Delivery Specification). A machine-readable definition of the data that must be contained in a BIM model or exchanged through IFC. IDS allows automatic validation of models against project requirements, serving as the next generation of exchange rules beyond MVD, standardized by buildingSMART.

IFC (Industry Foundation Classes). An open, vendor-neutral data schema (ISO 16739) for describing building and infrastructure information throughout the asset lifecycle. IFC supports interoperability between different BIM platforms by providing a structured model of geometry, attributes, and relationships.

Interoperability. The ability of different software systems or tools to work together and exchange information effectively. In BIM, this often refers to support for open standards like IFC (Industry Foundation Classes).

IoT (Internet of Things). A network of physical devices (sensors, actuators, meters, etc.) embedded in infrastructure or buildings, capable of collecting and transmitting data for real-time monitoring, automation, and optimization.

IPD (Integrated Project Delivery). A collaborative project delivery approach that integrates people, systems, and practices to optimize project outcomes.

ISO 19650. An international standard governing information management in BIM using a structured approach across the asset lifecycle, with emphasis on LOIN and collaborative workflows.

JOC (Job Order Contracting). A procurement method that enables fast delivery of construction services via pre-priced tasks and long-term contracts.

LCA (Life Cycle Assessment). An analytical tool used to evaluate the environmental impacts of a product or system throughout its life cycle, including extraction, manufacturing, use, and disposal.

Level of Detail. Refers strictly to the visual complexity of the model elements—how realistic they look—without considering data quality or usability.

Level of Development (LOD). A framework that defines the reliability, detail, and usability of model elements at different project stages. It includes both graphical representation and attached data, ensuring the model is fit for specific purposes such as design, coordination, fabrication, or operation (from LOD 100 to LOD 500).

Level of Information Need (LOIN). A standardised concept from ISO 19650 defining the minimum required information for a BIM element based on purpose and context.

Level of Model Definition (LoMD). A combined measure of LOD and LOI, specifying how complete the model should be at a given time.

Management Level (BMS). The top tier in BMS architecture that includes data visualization, reporting, and high-level decision-making tools.

Master Information Delivery Plan (MIDP). A high-level schedule that identifies when project information will be developed and delivered, who is responsible, and in what format. It integrates multiple TIDPs.

Material Passport. A structured digital document containing data on the characteristics of building materials, promoting reuse and circularity.

Modbus. Communication protocol used in automation systems to ensure interoperability between devices, particularly in industrial and energy systems.

Model Governance. Policies and procedures for managing digital models, including control over access rights, versioning, approvals, and data security.

MVD (Model View Definition). A subset of the IFC schema that specifies which data and relationships must be exchanged for a specific use case, such as design coordination or quantity take-off. MVDs ensure consistent, purpose-oriented data sharing between software applications supporting IFC.

Non-Graphical Data. Descriptive attributes associated with model elements (e.g., materials, thermal performance, maintenance frequency) that support decision-making.

Ontology (in BIM context). A structured vocabulary and set of relationships between data elements used to ensure consistency and interoperability in BIM environments.

Open Storage. A semantically structured data repository developed to industry standards (e.g., ISO 16739), enabling efficient data retrieval and integration.

Operation and Maintenance (O&M) Phase. The longest phase in a building's lifecycle, during which the structure is operated and maintained. This phase can account for up to 85% of the total cost.

Operational Twin. A DT subtype focused on real-time operational insights to optimize resource use and response strategies.

Organizational Information Requirements (OIR). An organization's strategic-level information needs, often long-term and cross-project, that guide information management policies and align project-level BIM with wider business goals.

PDTs (Product Data Templates). Standardized digital templates that define the properties required to describe construction products consistently. PDTs ensure alignment between manufacturers, designers, and contractors, enabling structured data exchange via Product Data Sheets or linked digital product libraries.

PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture). A hierarchical SCADA architecture model spanning from field devices (Level 0) to enterprise systems (Level 5), providing structured data and control flows.

Performance Twin. A digital twin focused on continuous monitoring and predictive maintenance of assets.

Process Digital Twin. Represents workflows or processes (e.g., supply chains), allowing optimization through real-time simulation.

Product Digital Twin. Represents individual physical components, enabling testing and optimization under different conditions.

Programmable Logic Controller (PLC). Industrial digital computers used to control manufacturing processes, integrated at Level 1 in SCADA systems.

Project Information Model (PIM). A model developed during the design and construction stages, containing both graphical and non-graphical data relevant to project delivery.

Project Information Requirements (PIR). Project-specific data needs that guide the creation of the PIM, often derived from the OIR and tailored to the scope and complexity of a given project.

Real-Time Bi-Directional Data Exchange. A hallmark of digital twins, where data flows continuously and interactively between the physical asset and its digital counterpart.

Real-Time Collaboration. A feature of cloud BIM that allows multiple users in different locations to simultaneously view, edit, and comment on a shared model, improving coordination and decision-making.

Remote Terminal Unit (RTU). A microprocessor-controlled electronic device that interfaces objects in the physical world to SCADA systems by transmitting telemetry data.

Role-Based Access Control (RBAC). A security approach that restricts access to data or model editing based on a user's role or responsibility, commonly used to ensure safe collaboration in multi-user BIM platforms.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). A system used for remote monitoring and control of infrastructure (e.g., water, energy, manufacturing), often integrated with BIM for centralized visualization and command interfaces.

Schema-on-Read. An approach where data is stored in raw form and its structure is applied at the time of use or retrieval (common for unstructured data).

Schema-on-Write. A structured data approach requiring data to fit a defined format before storage (e.g., IFC objects with defined parameters).

Semantic Framework. A structured vocabulary and relationships between data elements that ensure consistency and meaningful interpretation across systems.

Sensor. A device that detects changes in environmental parameters (e.g., temperature, CO_2 levels) and feeds this information to the BMS.

Specialist Planning Level Coordinator. A BIM Coordinator focusing on a specific discipline (e.g., structural, architectural, or MEP), responsible for the punctual and quality-compliant delivery of discipline-specific BIM content and coordination with the BIM Total Coordinator.

Structured Data. Organized information that follows predefined schemas, easily queried and used in digital workflows (e.g., BIM elements with metadata).

System Digital Twin. Combines both product and process twins to model and manage complex interactions across an entire system or facility.

Task Information Delivery Plan (TIDP). A more detailed plan under the MIDP, specifying the individual responsibilities, content, and deadlines for specific deliverables produced by various project teams.

Unstructured Data. Information without a fixed structure, such as images, scanned notes, or emails, which requires interpretation or advanced processing.

VDC Manager (Virtual Design and Construction Manager). A role responsible for integrating BIM models with advanced construction planning tools, enabling 4D (time), 5D (cost), and IoT-enabled real-time data applications to optimize project delivery.

Version Control. A method of managing changes to documents or models, allowing teams to track revisions, compare updates, and revert to previous states when necessary.

Zigbee. A low-power, wireless communication protocol often used for sensor networks within BMS, especially in retrofit applications.

151. Patil R. (2024) The History of BIM: Tracing the Evolution of Building Information Modeling. The Techture. Retrieved from. https://surl.li/eooxiw (accessed 20.07.2025)

152. BuildingSMART. Retrieved from https://surli.cc/wjhsqk (accessed 20.07.2025)

153. USSC. (2025) Normative regulations. Retrieved from https://surl.li/alsjom (accessed 20.07.2025)

154. Nagy, J., Olah, J., Erdei, E., Mate, D. and Popp, J. (2018), "The role and impact of Industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary", Sustainability, Vol. 10 No. 10, p. 3491, https://doi.org/10.3390/su10103491.

155. Celoza, A., de Oliveira, D.P. and Leite, F. (2023), "Role of BIM contract practices in stakeholder BIM implementation on AEC projects", Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 15 No. 2, https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-9 .

156. Allied Market Research (2023). Building Information Modeling Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Component, by Deployment Mode, by Building Type, by Application, by End-User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023-2032. Retrieved from https://www.alliedmarketresearch.com/building-information-modeling-market (accessed 20.05.2025)

157. Autodesk (2025). What is BIM? https://www.autodesk.com/solutions/aec/bim (accessed 20.05.2025)

158. Arayici Y. and Aouad G., "Building Information Modeling (BIM) for Construction Lifecycle," no. October 2010, 2015.

159. ACCA software (2025): BIM Data: what are they, what are they used for and why are they so important? BibLus. Retrieved from https://surl.li/hfohmt (accessed 20.05.2025)

160. PAS 1192-2:2013. Incorporating Corrigendum No. 1. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling

161. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles.
162. ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets.
163. ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 3: Operational phase of the assets.
164. ISO 19650-4:2022. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 4: Information exchange
165. ISO 19650-5:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 5: Security-minded approach to information management
166. ISO 19650-6:2025. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 6: Health and safety information.
167. Awe, M.; Malhi, A.; Budka, M.; Mavengere, N.; Dave, B. Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM. Buildings 2025, 15, 1072. https://doi.org/10.3390/buildings15071072
168. Catenda. (2025). BIM Levels. Retrieved from https://catenda.com/glossary/bim-levels/ (accessed 20.05.2025)
169. ACCA Software. (2022). BIM maturity levels explained: BIM level 0, 1, 2, 3 and beyond. BibLus. https://surl.li/sagloz (accessed 20.05.2025)

170. RIB Software. (2024). Understanding the BIM Maturity Levels: From Level 0 to 3 and Beyond. Retrieved from https://surli.cc/cjvtml (accessed 20.05.2025)

171. Ershadi, M., Jefferies, M., Davis, P., & Mojtahedi, M. (2021). Implementation of Building Information Modelling in infrastructure construction projects: a study of dimensions and strategies. International Journal of Information Systems and Project Management, 9(4), 43-59. https://doi.org/10.12821/ijispm090403

172. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. John Wiley & Sons. http://dx.doi.org/10.1002/9781119287568

173. Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in construction, 18(3), 357-375. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003

174. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. Automation in Construction, 38, 109–127. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

175. ACCA Software. (2024). BIM Dimensions Explained: 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, and 10D BIM. Retrieved from https://biblus.accasoftware.com/en/bim-dimensions/ (accessed 20.06.2025)

176. Hartmann, T., Gao, J., & Fischer, M. (2008). Areas of application for 3D and 4D models on construction projects. Journal of Construction Engineering and management, 134(10), 776-785. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:10(776)

177. Ye, Z., Antwi-Afari, M. F., Tezel, A., Manu, P. (2025). Building information modeling (BIM) in project management: a bibliometric and science mapping review. Engineering, Construction and Architectural Management, 32(5), 3078-3103. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2023-0355

178. Khosrowshahi, F. and Arayici, Y. (2012), "Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry", Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 19 No. 6, pp. 610-635. https://doi.org/10.1108/09699981211277531

179. Zhou, W., Whyte, J., & Sacks, R. (2012). Construction safety and digital design: A review. Automation in construction, 22, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.005

180. Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. Leadership and Management in Engineering, 11(3), 241–252. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

181. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in Construction, 114, 103179. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

182. Catenda. Glossary: Level of Development (LOD) (2025). Retrieved from https://surl.lt/chzjac (accessed 20.06.2025)

183. Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., & Teferle, F. N. (2020). BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review. Sustainability, 12(7), 2670. https://doi.org/10.3390/su12072670

184. BIMForum. (2021). Level of Development (LOD) Specification. Retrieved from https://surl.lu/pjmwrr (accessed 20.06.2025)

185. AIA Document E202-2008. Building Information Modeling Protocol Exhibit

186. Autodesk (n.d.). What is Level of Development (LOD) in BIM? Retrieved from https://surl.li/uxhcct (accessed 20.06.2025)

187. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K. (2011) BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. John Wiley & Sons, Hoboken.

188. Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. Energy Build. 2017, 136, 110–120. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009

189. Kim, Y.-C.; Hong, W.-H.; Park, J.-W.; Cha, G.-W. An estimation framework for building information modeling (BIM)-based demolition waste by type. Waste Manag. Res. 2017, 35, 1285–1295. https://doi.org/10.1177/0734242X17736381

190. Catenda (2025) Level Of Information Need. Retrieved from https://catenda.com/glossary/level-of-information-need/ (accessed 20.06.2025)

191. PLAN.ONE (n.d.) From LOD to LOIN. Retrieved from https://en.plan.one/blog-en/from-lod-to-loin/ (accessed 20.06.2025)

192. Pentagon (n.d.). Demystifying Level of Information Need for Seamless BIM Project Delivery.- Retrieved from https://surl.li/nglczs (accessed 20.06.2025)

193. Zima, K., & Mitera-Kiełbasa, E. (2022). Level of information need for BIM models: Australia, New Zealand and ISO 19650. Civil and Environmental Engineering Reports, 32(4). - http://dx.doi.org/10.2478/ceer-2022-0041

194. ACCA. Biblus. BIM Data: what are they, what are they used for and why are they so important? (2025) Retrieved from https://surl.li/lzghdr (accessed 20.06.2025)

195. Fugas K. (2022) in BIM Corner. Retrieved from https://surl.li/fbvkzl (accessed 20.06.2025)

196. Montague R. (2016) in NBS. Building Information Modelling: What information is in the model? Retrieved from https://surl.li/vfsqax (accessed 20.06.2025)

197. CIMA (n.d.) Retrieved from https://surl.li/dztxnh (accessed 20.06.2025)

198. Catenda. BIM – Building Information Modeling (2025) Retrieved from https://surl.li/svfeak (accessed 20.06.2025)

199. Hossain, M.U.; Ng, S.T. Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. J. Clean. Prod. 2018, 205, 763–780. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.120

200. Röck, M.; Hollberg, A.; Habert, G.; Passer, A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. Build. Environ. 2018, 140, 153–161. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006

201. Densley Tingley, D.; Davison, B. Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. Build. Environ. 2012, 57, 387–395. http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005

202. Lu, W.; Webster, C.; Chen, K.; Zhang, X.; Chen, X. Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 68, 587–595. http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.029

203. Cheng, J.C.P.; Ma, L.Y.H. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. Waste Manag. 2013, 33, 1539–1551. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001

204. Catenda. (2022). BIM Facility Management: the importance of BIM in asset management. Retrieved from https://surl.lu/nvtxyy (accessed 20.06.2025)

205. Re Cecconi, F.; Maltese, S.; Dejaco, M.C. Leveraging BIM for digital built environment asset management. Innov. Infrastruct. Solut. 2017, 2, 14. http://doi.org/10.1007/s41062-017-0061-z

206. Marzouk, M.; Abdelkader, E.M.; Al-Gahtani, K. Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects. J. Clean. Prod. 2017, 152, 351–363. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.138

207. Idei.club (2025) Retrieved from https://en.idei.club/27951-bim-lifecycle.html (accessed 20.07.2025)

208. Yeheyis, M.; Hewage, K.; Alam, M.S.; Eskicioglu, C.; Sadiq, R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. Clean Technol. Environ. Policy 2013, 15, 81–91. http://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6

209. Rangasamy, V., & Yang, J. B. (2024). The convergence of BIM, AI and IoT: Reshaping the future of prefabricated construction. Journal of Building Engineering, 84, 108606. http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606

210. Onungwa, I., Olugu-Uduma, N., & Shelden, D. R. (2021). Cloud BIM technology as a means of collaboration and project integration in smart cities. Sage Open, 11(3), 21582440211033250. https://doi.org/10.1177/21582440211033250

211. Thaarrini J. in Desapex (2024). Smart Buildings: BIM and IoT integration.- Retrieved from https://surli.cc/iktavz (accessed 20.07.2025)

212. Altohami, A. B. A., Haron, N. A., Ales Alias, A. H., & Law, T. H. (2021). Investigating Approaches of Integrating BIM, IoT, and Facility Management for Renovating Existing Buildings: A Review. Sustainability, 13(7), 3930. https://doi.org/10.3390/su13073930

213. ACCA software (n.d.) Retrieved from https://surl.li/kpaqod (accessed 20.07.2025)

214. Huang, Z.; Ge, J.; Zhao, K.; Shen, J. Post-evaluation of energy consumption of the green retrofit building. Energy Procedia 2019, 158, 3608–3613. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.903

215. Bhoda S.K. (2024). BIM and IoT in construction management: Technical insights and benefits Retrieved from https://surl.li/iivhjz (accessed 20.07.2025)-

216. Sheenah A. (2024). On the convergence of BMS, IoT, and AV in BIM-enabled environments.-Retrieved from https://surl.lu/lpuxfp (accessed 20.07.2025)

217. ScadaInfo (n.d.) SCADA in Construction Retrieved from https://surl.lu/eqzsob (accessed 20.07.2025)

218. Inductive Automation. (2025). SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition Retrieved from https://surli.cc/ekmzes (accessed 20.07.2025)

219. Mathezer S. in SANS (2021) Introduction to ICS Security Part 2. Retrieved from https://surl.li/kwghzi (accessed 20.07.2025)

220. Awati R. and Loshin P. (2025) in TechTarget. What is SCADA (supervisory control and data acquisition)? Retrieved from https://surl.li/wqzedj (accessed 20.07.2025)

221. Loggia, R., & Flamini, A. (2023). Electrical safety enhanced with BIM, SCADA and digital twin integration: A case study of a MV-LV substation. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(2), 2725-2731. http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2023.3332311

222. Flamini, A., Loggia, R., Massaccesi, A., Moscatiello, C., & Martirano, L. (2022, May). BIM and SCADA integration: the Dynamic Digital Twin. In 2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS) (pp. 1-7). IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/ICPS54075.2022.9773903

223. Upadhyay, D., & Sampalli, S. (2020). SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems: Vulnerability assessment and security recommendations. Computers & Security, 89, 101666. https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101666

224. Quinn, C., Shabestari, A. Z., Litoiu, M., & McArthur, J. J. (2022). Building Automation System Data Integration with BIM: Data Structure and Supporting Case Study. arXiv preprint arXiv:2205.05518.

225. Reginald, A. I. (2015). Integrating BIM with BMS in Energy Performance Assessment: Case Study of a University Building in UK. International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM), 4(1), 19-44. http://dx.doi.org/10.4018/IJ3DIM.2015010102

226. Gabkotech (n.d.) Building Management System (BMS) for Smart and Efficient Operations Retrieved from https://surl.li/fhdtdq (accessed 20.07.2025)

227. Mujumdar, P., & Agarwal, S. (2024, June). Integrating Building Management Systems in High-Rise Structures using Building Information Modeling. In Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA, 7, 1, 277-276. https://doi.org/10.38027/ICCAUA2024IN0320

228. Holbert C. in CIN (2025) What is a Building Management System? Retrieved from https://surl.li/znbona (accessed 20.07.2025)

229. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj

230. Bothwell B., Kaczmarek S.(2023). Science & Tech Spotlight: Digital Twins—Virtual Models of People and Objects. GAO-23-106453

231. Biblus (2024) Digital Twin in Asset Management: complete guide and insights Retrieved from https://surl.li/ktujrh (accessed 20.07.2025)

232. Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J., & Ramos, N. M. M. (2022). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. Buildings, 12(12), 2155. https://doi.org/10.3390/buildings12122155

233. Silverskills (2024). Benefits of Cloud-Based BIM. Retrieved from https://surli.cc/czjeke (accessed 20.07.2025)

234. Afsari, K., Eastman, C. M., & Shelden, D. R. (2016). Cloud-based BIM data transmission: current status and challenges. In ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction (Vol. 33, p. 1). IAARC Publications.

235. Autodesk. (2024). Cloud-Based Construction Workflows. Retrieved from https://surl.li/ikpkee (accessed 20.07.2025)
236. PlanRadar. (2024). Benefits of Cloud-Based BIM. Retrieved from https://surl.lu/bsaras (accessed 20.07.2025)
237. Tejjy Inc. (2023). Cloud-Based BIM: A Complete Guide. Retrieved from https://surli.cc/binqbj (accessed 20.07.2025)
238. Techture (2024). Cloud-Based BIM and the Future of AEC Collaboration. Retrieved from https://surli.cc/mniqar (accessed 20.07.2025)
239. Autodesk Construction Cloud (2024). Connected Construction Workflows. Retrieved from https://surl.li/ueivie (accessed 20.07.2025)
240. Gadade T. in Novatr (2025). Smart Cities & BIM: How Technology is Reshaping Urban Planning. Retrieved from https://surl.li/fvttzf (accessed 20.07.2025)
241. Catenda. ISO 19650 (2025) Retrieved from https://surli.cc/kdstpg (accessed 20.07.2025)
242. Charef, R. (2022). The use of Building Information Modelling in the circular economy context: Several models and a new dimension of BIM (8D). Cleaner Engineering and Technology, 7, 100414. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100414
243. Autodesk (2025). AISO 19650, the Common Data Environment, and Autodesk Construction Cloud- Retrieved from https://surl.li/hxeiwq (accessed 20.07.2025)
244. Catenda (2025). CDE – Common Data Environment. Retrieved from https://surl.lu/kifkwx (accessed 20.07.2025)
245. Catenda (2025). BEP – BIM Execution Plan. Retrieved from https://surl.li/uzkjdj (accessed 20.07.2025)
246. Charef, R. (2022, b). Supporting construction stakeholders with the circular economy: A trans-scaler framework to understand the holistic approach. Cleaner Engineering and Technology, 8, 100454. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100454
247. Patel A. (2025) in United BIM. BIM Execution Plan (BXP) – What, Why, When and How. Retrieved from https://surl.li/wcwrjl (accessed 20.07.2025)
248. Biblus (2025) Exchange Information Requirements: What is an EIR in BIM? Retrieved from https://surl.lu/zfkedq (accessed 20.07.2025)

249. Biblus. BIM Manager, BIM Specialist and BIM Coordinator roles and responsibilities. (2025) Retrieved from https://surl.li/wwbsni (accessed 20.07.2025)
250. Verma S. (2022) in Novatr. What is BIM management? What does the career role involve? Retrieved from https://surl.lt/kmbyzo (accessed 20.07.2025)
251. Tulke, J., Schumann, R. (2018). BIM Manager. In: Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (eds) Building Information Modeling. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_16
252. BimCollab (2024) Retrieved from https://surl.li/jfxsft (accessed 20.07.2025)
253. Biblus. What's a BIM Coordinator: all you need to know about roles, what they do and how to qualify to become one. (2024) Retrieved from https://surl.li/ugygii (accessed 20.07.2025)
254. Petraus B. (2021) in Open Project. The BIM roles and organizational structure Retrieved from https://surl.lu/bocpsh (accessed 20.07.2025)
255. DDC (2024) BIM Roles: Who Does What in a BIM Process? Retrieved from https://surl.lt/mtkxzm (accessed 20.07.2025)
256. León, M. M., Orozco, J. A., Snatos, J. R., & Escobar, A. Y. (2025). Integrating bim and structural analysis to optimize construction . South Florida Journal of Development, 6(8), e5666. https://doi.org/10.46932/sfjdv6n8-016 (accessed 20.07.2025)
257. Miller, J., Schneiderbauer, L., Hauer, M., Jäger, A., Fröch, G., Pfluger, R., & Moser, S. (2025). Enhancing Interoperability Between Building Information Modeling and Building Energy Modeling: Alphanumerical Information Exchange for Energy Optimization in Early Design Stages. Applied Sciences, 15(10), 5789. https://doi.org/10.3390/app15105789 (accessed 20.07.2025)
258. Architecture Lab. (2024). Autodesk Revit Software Review. Retrieved from https://www.architecturelab.net/software/autodesk-revit (accessed 20.07.2025)
259. Autodesk. (2025). Revit 2025 Help Documentation. Retrieved from https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU (accessed 20.07.2025)
260. Interscale. (2025). Revit 2026 vs 2025: Feature Comparison. Retrieved from https://interscale.com.au/blog/revit-2026-vs-2025 (accessed 20.07.2025)

261. Biblus ACCA. (2023). IFC vs RVT: Key Differences in Interoperability. Retrieved from https://biblus.accasoftware.com/en/ifc-vs-rvt-key-differences-in-interoperability (accessed 20.07.2025)

262. Graphisoft. (2024). ArchiCAD – Plans and Products. Retrieved from https://www.graphisoft.com/plans-and-products/archicad (accessed 20.07.2025)

263. AEC Magazine. (2023). Graphisoft Archicad 25 Review. Retrieved from https://aecmag.com/bim/graphisoft-archicad-25 (accessed 20.07.2025)

264. Nemetschek Group. (2024). Allplan Product Information. Retrieved from https://www.allplan.com (accessed 20.07.2025)

265. BuildingSMART International. (2023). OpenBIM and the Nemetschek Group. Retrieved from https://www.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025)

266. Trimble. (2024). Tekla Structures Product Overview. Retrieved from https://www.tekla.com (accessed 20.07.2025)

267. Bentley Systems. (2024). OpenBuildings Designer. Retrieved from https://www.bentley.com/software/openbuildings-designer (accessed 20.07.2025)

268. Bentley Systems. (2024). Digital Twin Solutions for Infrastructure. Retrieved from https://www.bentley.com/digital-twins (accessed 20.07.2025)

269. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. Geneva: ISO.

270. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-2:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva: ISO.

271. Autodesk (2023). Navisworks Manage Overview. Retrieved from https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview (accessed 20.07.2025)

272. Solibri Office – Product Overview (2023). Retrieved from https://www.solibri.com/solutions/solibri-office (accessed 20.07.2025)

273. buildingSMART International. (2023). Retrieved from https://www.buildingsmart.org/bim-collaboration-format-bcf-3-0/ (accessed 20.07.2025)

274. BIMcollab (2024). Retrieved from https://www.bimcollab.com/en/about/about-bimcollab/ (accessed 20.07.2025)

275. Trimble (2024). Trimble Connect – Common Data Environment. Retrieved from https://connect.trimble.com (accessed 20.07.2025)

276. Revizto (2023). Revizto – Integrated Collaboration Platform. Retrieved from https://revizto.com (accessed 20.07.2025)

277. Dalux. (2024). Dalux BIM Viewer and Field Tools. Retrieved from https://www.dalux.com (accessed 20.07.2025)

278. International Organization for Standardization. (2020). ISO 19650-3:2020 – Information management using BIM – Part 3: Operational phase of assets. Geneva: ISO.

279. Bentley Synchro (2024). Retrieved from https://www.bentley.com/software/synchro/ (accessed 20.07.2025)

280. Oracle (2025). Retrieved from https://www.oracle.com/construction-engineering/aconex/ (accessed 20.07.2025)

281. Thinkproject (2025). Retrieved from https://www.thinkproject.com/ (accessed 20.07.2025)

282. Autodesk Construction Cloud (2025). https://construction.autodesk.com/ (accessed 20.07.2025)

283. Graphisoft BIMcloud (2025). Retrieved from https://workfromhome.graphisoft.com/#/ (accessed 20.07.2025).

284. Simple BIM (2025). Retrieved from https://simplebim.com/ (accessed 20.07.2025).

285. BIM-Q (2025). Retrieved from https://www.bimq.de/en/ (accessed 20.07.2025).

286. buildingSMART International. IFC Standards & Documentation. Retrieved from technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ (accessed 20.07.2025).

287. International Organization for Standardization (2018). ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization. Geneva: ISO.
288. buildingSMART International. IFC Standards & Documentation —Retrieved from technical.buildingsmart.org/standards/ifc (accessed 20.07.2025).
289. Solibri. (2021). BCF Workflows in Solibri. Retrieved from https://solibri.com (accessed 20.07.2025).
290. ISO 29481-1:2016. Building information models – Information delivery manual – Part 1: Methodology and format. International Organization for Standardization.
291. Wix, J., & Karlshøj, J. (2010). Information delivery manual: Guide to components and development methods. BuildingSMART International, 5(12), 10.
292. Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., Van Ackere, T., & De Meyer, R. (2017). A method to formally specify information exchanges between actors in the building industry. Advanced Engineering Informatics, 31, 358–369.
293. buildingSMART International. (2022). Information Delivery Specification (IDS) – Candidate Standard. Retrieved from https://technical.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025).
294. Singh, V., Gu, N., & Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. Automation in construction, 20(2), 134-144.
295. International Organization for Standardization. (2012). ISO 29481-2:2012: Building information models — Information delivery manual. Part 2: Interaction framewor. Geneva: ISO.
296. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization.
297. Chipman, T., Weise, M., Bazjanac, V., Maile, T., & See, R. (2016). Implementing IFC-based exchange requirements using Model View Definitions. Building and Environment, 102, 183–194. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.001

298. buildingSMART International. (2024). Model View Definition (MVD) – Technical Documentation. Retrieved from https://technical.buildingsmart.org (accessed 20.07.2025).

299. Pauwels, P., Törmä, S., & Beetz, J. (2022). Information Delivery Specification: Towards a flexible and machine-readable method for defining exchange requirements in BIM. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 27, 690–705.

300. buildingSMART International. (2024). Retrieved from https://www.buildingsmart.org/users/services/validation-service/ (accessed 20.07.2025).