



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ



Наташа Томе Малијанска Андреевска

**ПРИНЦИПИ И ОКОЛИНИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА BIM И GIS
ДОМЕНИТЕ КАКО ОСНОВА ЗА ЕФИКАСНА СЕРВИСНА
ПОЛИТИКА СО НЕДВИЖНОСТИТЕ**

Докторски труд

Скопје, 2026

Докторанд:
НАТАША ТОМЕ МАЛИЈАНСКА АНДРЕЕВСКА

Тема:
ПРИНЦИПИ И ОКОЛИНИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА ВІМ И GIS ДОМЕНІТЕ КАКО ОСНОВА ЗА
ЕФИКАСНА СЕРВИСНА ПОЛИТИКА СО НЕДВИЖНОСТИТЕ

Ментор:
Проф. д-р ВАНЧО ЃОРЃИЕВ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Градежен факултет – Скопје

Комисија за одбрана:

Проф. д-р ЃОРЃИ ЃОРЃИЕВ (претседател),
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р ВАНЧО ЃОРЃИЕВ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р ЗЛАТКО БОГДАНОВСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р ЗЛАТКО СРБИНОСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р БРАНИСЛАВ БАЈАТ,
Универзитет во Белград, Р. Србија
Градежен факултет

Научна област:
ГЕОДЕЗИЈА

Датум на одбрана:

ПРИНЦИПИ И ОКОЛИНИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА BIM И GIS ДОМЕНИТЕ КАКО ОСНОВА ЗА ЕФИКАСНА СЕРВИСНА ПОЛИТИКА СО НЕДВИЖНОСТИТЕ

- Апстракт -

Во изминатите неколку децении, интензивната урбанизација доведе до засилен притисок врз земјиштето како ограничен ресурс за проширување и трансформација на урбаните средини. Зградите и комплексните објекти, подземната и надземната инфраструктура, кои се градат со цел да ги задоволат потребите на сè понаселените урбани средини, често се преклопуваат на различни висински нивоа и генерираат сложени просторни односи. За одржлив развој на урбаните средини, од големо значење е да се воспостави интегриран систем во 3Д просторот кој ќе ги содржи сите потребни просторни и атрибутни податоци со цел донесување правилни одлуки при планирање, дизајнирање, градење, одржување и управување со недвижностите и со самите урбани средини. BIM (Building Information Modelling) и GIS (Geographic Information System) се технологии кои се користат во дигиталното 3Д моделирање на две различни нивоа. GIS се фокусира на макрониво, односно на моделирање на надворешниот свет и просторните односи, давајќи им на податоците просторен контекст, наспроти BIM, кој се фокусира на микрониво, овозможувајќи детално и прецизно моделирање на одделни објекти. Интеграцијата на BIM и GIS технологиите е моќен пристап кој ги комбинира прецизноста и деталноста на BIM со просторната интелигенција на GIS.

Поради сложените тридимензионални просторни односи кај комплексните објекти, повеќекатниците, подземната и надземната инфраструктура, традиционалните 2Д катастарски системи имаат ограничена способност да обезбедат јасна, еднозначна и сеопфатна репрезентација на преклопените стварни права врз недвижностите. Интеграцијата на BIM и GIS домените може да одговори на ограничувањата на традиционалните 2Д катастарски системи преку обезбедување прецизна просторна репрезентација на комплексни објекти, особено во урбани средини развиени на повеќе нивоа.

Овој докторски труд ја разгледува интеграцијата на BIM и GIS домените како методолошка и техничка рамка за развој на конзистентни тридимензионални просторни модели со широка применливост во управувањето со недвижностите и просторот, при што посебен акцент е ставен на предусловите и барањата за воспоставување 3Д катастарски систем. Предложената методологија ги комбинира аквизицијата на просторни податоци со LiDAR (Light Detection and Ranging) и SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) технологии за скенирање на објектите и просторот што ги опкружува, формирањето на параметарски и семантички богати 3Д модели во BIM околина и нивната трансформација и интеграција во GIS околина.

Верификацијата на предложената методологија е реализирана преку три студии на случај, во кои BIM-GIS интеграцијата е применета на реални објекти и ситуации со сложени просторни односи, при што се оценуваат точноста на резултатите, тополошката конзистентност на 3Д геометријата и степенот на постигната интероперабилност. Добиените резултати покажуваат дека методологијата поддржува креирање 3Д модели со висока геометриска валидност и семантичка доследност, со што се овозможува јасно разграничување и репрезентација на просторните единици и нивните правни релации, како и нивно структурирање во GIS-базирани просторни бази на податоци, како поддршка за 3Д катастар и донесување одлуки во управувањето со недвижностите и просторот.

Клучни зборови: BIM, GIS, LiDAR, SLAM, BIM-GIS интеграција, 3Д моделирање, 3Д катастар

PRINCIPLES AND ENVIRONMENTS FOR INTEGRATION OF BIM AND GIS DOMAINS AS FOUNDATION FOR EFFICIENT REAL ESTATE SERVICE ORIENTED POLICIES

- Abstract -

In recent decades, intensive urbanization has led to increased pressure on land as a limited resource for the expansion and transformation of urban areas. Buildings and complex structures, underground and aboveground infrastructure, which are built to meet the needs of increasingly populated urban areas, often overlap at different height levels and generate complex spatial relationships. For the sustainable development of urban areas, it is of great importance to establish an integrated system in 3D space that will contain all the necessary spatial and attribute data to make the right decisions during planning, design, construction, maintenance, and management of facilities and the urban environment. BIM (Building Information Modelling) and GIS (Geographic Information Systems) are technologies used in digital 3D modelling at two different scales. GIS focuses on the macro-level, i.e. on modelling the external world and spatial relationships, giving data a spatial context, as opposed to BIM, which focuses on the micro-level, enabling detailed and precise modelling of individual objects. The integration of BIM and GIS technologies is a powerful approach that combines the precision and detail of BIM with the spatial intelligence of GIS.

Due to the complicated three-dimensional spatial relationships in complex buildings, multi-storey buildings, underground and aboveground infrastructure, traditional 2D cadastral systems have a limited ability to provide a clear, unambiguous and comprehensive representation of overlapping property rights. The integration of the BIM and GIS domains can address the limitations of traditional 2D cadastral systems by providing a precise spatial representation of complex objects, particularly in multi-level urban areas.

This doctoral dissertation examines the integration of the BIM and GIS domains as a methodological and technical framework for developing consistent three-dimensional spatial models with broad applicability in real estate and spatial management, with particular emphasis on the prerequisites and requirements for establishing a 3D cadastral system. The proposed methodology combines spatial data acquisition using LiDAR (Light Detection and Ranging) and SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) technologies for scanning objects and their surrounding environment, with the creation of parametric and semantically rich 3D models within a BIM environment, and their transformation and integration into a GIS environment.

The proposed methodology was verified through three case studies, in which BIM-GIS integration was implemented on real objects and scenarios with complex spatial relationships. The analysis evaluated the accuracy of the results, the topological integrity of the 3D geometry, and the degree of interoperability achieved. The obtained results show that the methodology supports the creation of 3D models with high geometric validity and semantic consistency, enabling a clear demarcation and representation of spatial units and the legal relationships associated with them, as well as their structuring in GIS-based spatial databases to support 3D cadastre and decision-making in real estate and spatial management.

Keywords: BIM, GIS, LiDAR, SLAM, BIM-GIS integration, 3D modelling, 3D cadastre

Особена ѓочии и длабока благодарносии изразувам кон мојои мениор, проф. д-р Ванчо Ѓорѓиев, за неговата долгорочна посветеност и континуирано мениорство од самои ѓочииок на моеио академско образование. Неговиоо стиручно водство, тиреливост и искрена ѓоддршка тиреиставуваа основа за мојои професионален и личен развој, надминувајќи ја рамката на формалната академска улога и тирераснувајќи во виситинско живоино мениорство.

Посебна благодарносии уиатиувам до проф. д-р Ѓорѓи Ѓорѓиев за несебичната ѓоддршка, конструктивните совети и охрабрувањето во тиекои на изработката на докторскиот тируд. Неговиот анѓажман и безрезервна соработка значајно тиридонесоа за квалитетот и успешната реализација на истражувањето.

Најголема благодарносии изразувам до моите родители, Елена и Томе, мојата сестра Емилија, мојата внука Лана, а особено до мојот соитруг Андреј, за разбирањето, тиреиенето и ѓосиојаната ѓоддршка во тиридот на изработката на докторскиот тируд. Нивната доверба и охрабрување беа моја силна мотивација и значајна ѓоиткреја во секоја фаза од овој тироцес.

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно.

Своерачен потпис на докторандот,

м-р Наташа Малијанска Андреевска, дипл. геод. инж.

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

Потпис на авторот, с.р.

м-р Наташа Малијанска Андреевска, дипл. геод. инж.

СОДРЖИНА

Вовед	15
Предмет на истражување.....	16
Цели на истражувањето	16
Образложение на работните хипотези и тези	17
Краток опис на содржината	18
Научни методи кои се применети	21
Очекуван научен придонес	22
Примена на резултатите од истражувањето	23
1. Преглед на достигнувања во научно-истражувачката област.....	25
2. Теоретска основа на BIM и GIS технологиите.....	33
2.1. BIM (Building Information Modelling)	33
2.1.1. Основни принципи на BIM.....	34
2.1.2. Архитектура и структура на BIM.....	36
2.1.3. Типови на податоци во BIM	37
2.1.4. Ниво на развој во BIM (Level of Development - LOD).....	38
2.1.5. Ограничувања и предизвици на BIM.....	40
2.2. GIS (Geographic Information System).....	41
2.2.1. Основни принципи на GIS.....	42
2.2.2. Архитектура и структура на GIS.....	44
2.2.3. Типови на податоци во GIS	44
2.2.4. Ниво на деталност (Level of Detail) во GIS	46
2.2.5. Ограничувања и предизвици на GIS.....	47
2.3. Споредбена анализа на BIM и GIS.....	48
3. Стандарди и техники за интеграција на BIM и GIS.....	51
3.1. Интероперабилност во BIM-GIS интеграција.....	51
3.2. Улога на стандардите во BIM-GIS интеграцијата	54
3.3. IFC како основен BIM стандард за BIM-GIS интеграција.....	55
3.4. CityGML како основен GIS стандард за 3Д модели на урбани средини.....	57
3.5. Техники за BIM-GIS интеграција	59
3.5.1. Техники за трансформација и конверзија на податоци – податочно ниво (data-level)	63
3.5.2. Техники базирани на модели и правила за семантичко усогласување (semantic-level).....	64
3.5.3. Техники за системска или сервисна интеграција (system/service-level).....	65
4. Домени на примена на интегриран BIM-GIS систем.....	67
4.1. Просторно и урбанистичко планирање.....	68
4.2. Планирање и управување со инфраструктура.....	69
4.3. Симулации и анализа на перформанси.....	70
4.4. Дигитални близнаци (Digital Twins).....	70

4.4.1.	Дигитален близнак на објект	71
4.4.2.	Дигитален близнак на град	72
4.5.	3Д катастар	73
4.5.1.	Римскоправните начела и нивното влијание врз разграничувањето на сопственичките права 73	
4.5.2.	Последици од примената на superficies solo cedit.....	75
4.5.3.	Пристапи за регистрација на комплексни 3Д ситуации.....	79
5.	Аквизиција на просторни податоци за 3Д моделирање	83
5.1.	Концептуални основи на аквизиција на податоци за 3Д моделирање	83
5.2.	Ласерска технологија како основа за современа 3Д аквизиција.....	84
5.2.1.	Системи за ласерско скенирање	84
5.2.2.	Терестрички ласерски скенер (TLS).....	86
5.2.3.	Мобилни ласерски скенери (MMS).....	89
5.2.4.	Авионско ласерско скенирање (ALS)	91
5.2.5.	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).....	93
6.	Методологија за интегрирање на BIM и GIS.....	99
6.1.	Аквизиција на просторни податоци.....	101
6.1.1.	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).....	102
6.1.2.	TLS (Terrestrial Laser Scanning)	107
6.1.3.	UAV-LiDAR (Unmanned Aircraft System-Light Detection and Ranging)	110
6.2.	Процесирање и интеграција на облаците од точки	113
6.2.1.	Карактеристики на обработката за различни извори на податоци	113
6.2.2.	Претпроцесирање и филтрирање на шум.....	114
6.2.3.	Внатрешна регистрација на SLAM облаците (ентериер и габарит).....	115
6.2.4.	Геореференцирање на SLAM моделот кон глобален координатен систем	116
6.2.5.	Интеграција на SLAM и UAV-LiDAR облаците од точки и контрола на квалитет.....	117
6.3.	Креирање на BIM модели.....	117
6.3.1.	Параметарско моделирање и интелигентни објекти	117
6.3.2.	Инкорпорирање на интегриран облак од точки во BIM околина и подготовка за моделирање 118	
6.3.3.	Реконструкција на архитектонски и конструктивни елементи	120
6.3.4.	Геометриска валидација и тополошка конзистентност	122
6.3.5.	Подготовка на BIM моделот за GIS трансформација	125
6.4.	Интеграција на BIM и GIS	126
6.4.1.	Трансформација на BIM во GIS	126
6.4.2.	Раслојување, структурирање и семантичка трансформација	127
6.4.3.	Пристапи на конверзија од IFC во GIS.....	128
6.4.4.	Интеграција на BIM, GIS и LADM	136
7.	Студии на случај	139

7.1.	Модел 1 - 3Д модел на стан во станбено-деловна зграда.....	139
7.1.1.	Аквизиција на просторни податоци.....	140
7.1.2.	Процесирање на облаци од точки	141
7.1.3.	Креирање на BIM модел.....	143
7.1.4.	Евалуација и валидација на моделот.....	148
7.2.	Модел 2 - 3Д модел на пешачки мост „Влајко“	153
7.2.1.	Аквизиција на просторни податоци.....	156
7.2.2.	Процесирање на облаци од точки	158
7.2.3.	Креирање на BIM модел.....	160
7.2.4.	Интеграција на BIM и GIS	162
7.2.5.	Евалуација и валидација на моделот.....	168
7.3.	Модел 3 - 3Д модел на хотелски комплекс	177
7.3.1.	Аквизиција на просторни податоци.....	179
7.3.2.	Процесирање на облаци од точки	182
7.3.3.	Креирање на BIM модел.....	185
7.3.4.	Интеграција на BIM и GIS	186
7.3.5.	Евалуација и валидација на моделот.....	191
8.	Анализа на резултатите од спроведеното истражување	193
8.1.	Дискусија на резултатите од Модел 1.....	193
8.1.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	193
8.1.2.	Квалитет и репрезентативност на влезните податоци.....	193
8.1.3.	Локален координатен систем како методолошка поставка.....	194
8.1.4.	Ефекти од процесирањето: прочистување и сегментација.....	194
8.1.5.	Геометриска валидност на BIM моделот и контрола на квалитет	194
8.1.6.	Релевантност за катастар и концептуално поврзување со LADM.....	195
8.1.7.	Ограничувања и заклучни согледувања	197
8.2.	Дискусија на резултатите од Модел 2.....	197
8.2.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	197
8.2.2.	Катастарска репрезентација и идентификувани ограничувања на 2Д моделот	198
8.2.3.	Квалитет на аквизицијата со SLAM-LiDAR во урбана средина	198
8.2.4.	Обработка и геореференцирање: стабилност на интегрираниот облак од точки	199
8.2.5.	Резултати од BIM моделирањето: геометрија, деталност и семантика	199
8.2.6.	Интеграција BIM-GIS: интероперабилност и просторен контекст	199
8.2.7.	Геометриска валидност и квалитет на интегрираниот BIM-GIS модел	200
8.2.8.	Импликации за 3Д катастар: просторни единици, правни односи и LADM.....	201
8.2.9.	Ограничувања и заклучни согледувања	202
8.3.	Дискусија на резултатите од Модел 3.....	202
8.3.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	202
8.3.2.	Ефектот од комбинираната аквизиција врз конзистентноста на моделот	202

8.3.3.	Класификацијата на облакот од точки како предуслов за формирање на сеопфатен 3Д модел	203
8.3.4.	Улогата на дигиталните висински модели.....	203
8.3.5.	Хибридно моделирање како практичен компромис со висока методолошка вредност.....	204
8.3.6.	BIM-GIS интеграција во функција на администрирање со недвижности.....	204
8.3.7.	Потенцијал за поврзување со LADM.....	204
8.3.8.	Надградба на моделот со дополнителни тематски слоеви (вегетација, енергетска инфраструктура, патеки, паркинг).....	205
8.3.9.	Ограничувања и заклучни согледувања	205
Заклучок		207
Литература.....		215

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1. Преклопување на објекти на различни висински нивоа во просторот	15
Слика 2.1. BIM во сите фази од животниот циклус на објектот	35
Слика 2.2. Типови на податоци во BIM.....	38
Слика 2.3. Нивоа на развој (LOD) во BIM.....	39
Слика 2.4. Просторни податоци во GIS организирани во тематски слоеви.....	42
Слика 2.5. Нивоа на деталност (LOD) во GIS (Извор: Biljecki et al., 2013)	47
Слика 2.6. Интеграција на BIM и GIS низ животниот циклус на објектот	50
Слика 3.1. Просторна хиерархија во IFC (IfcProject–IfcSite–IfcBuilding–IfcBuildingStorey–IfcSpace)	56
Слика 4.1. Интегрирано BIM–GIS решение за планирање и управување со сообраќајна инфраструктура	69
Слика 4.2. Интегриран BIM–GIS пристап за процена на соларен фотоволтаичен потенцијал на покриви на објекти.....	70
Слика 4.3. Дигитален близнак на град	72
Слика 4.4. <i>Ad inferos et usque ad sidera</i> , познато како „од пеколот до рајот“	74
Слика 4.5. Студентски дом „Гоце Делчев“, конекциите помеѓу зградите не се прикажани на катастарскиот план.....	77
Слика 4.6. Подземни гаражи во комплексот „Лептокарија“, влезната рампа и подземниот објект не се прикажани на катастарскиот план	78
Слика 5.1. TLS vs. MMS vs. ALS	85
Слика 5.2. Терестрички ласерски скенер (TLS)	86
Слика 5.3. Геометрија на видното поле (Field of View) на TLS.....	87
Слика 5.4. Шематски приказ на вертикалното отклонување на ласерскиот зрак.....	88
Слика 5.5. Концептуален приказ на регистрација на облаци од точки	89
Слика 5.6. Мобилен ласерски скенер поставен на возило.....	90
Слика 5.7. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало.....	92
Слика 6.1. Методологија за интегрирање на ласерско скенирање, BIM и GIS.....	99
Слика 6.2. Затворање на јазли (loop closure) кај SLAM скенирање	104
Слика 6.3. TLS vs. SLAM.....	109
Слика 6.4. Траектории на снимање со UAV–LiDAR (<i>grid pattern</i> , <i>cross-flight</i> и <i>double-grid</i>)	112
Слика 6.5. Моделирање со трасирање на облакот од точки	120
Слика 6.6. Архитектонски и конструктивни елементи во BIM.....	121
Слика 6.7. Мапирање на IFC елементи во CityGML класи (Извор: El-Mekawy et al., 2012)	129
Слика 7.1. Облак од точки добиен со SLAM скенирање, траекторија на движење, позиции на скенирање и фотографии од позицијата на скенирање	141
Слика 7.2. Необработен облак од точки визуелизиран според интензитет на рефлексија на ласерски импулс (Опсег на бои: од црна, низок интензитет до бела, висок интензитет).....	142
Слика 7.3. Обработен облак од точки добиен со ласерско скенирање на станот со рачен SLAM скенер.....	143
Слика 7.4. Хоризонтален пресек на облакот од точки во BIM околина.....	144
Слика 7.5. Вертикален пресек на облакот од точки добиен со ласерско скенирање на станот	144
Слика 7.6. Вертикален пресек на облак од точки и BIM модел на станот	145
Слика 7.7. 3Д поглед во моделот (лево – облак од точки преклопен со BIM модел, десно – BIM модел)	145
Слика 7.8. 2Д основа на BIM модел на станот	146
Слика 7.9. 3Д визуелизација на BIM модел на станот.....	147
Слика 7.10. Должини [m] извлечени од BIM модел	148
Слика 7.11. Фотографија од пешачки мост „Влајко“	154
Слика 7.12. Ортофото снимка и регистрирани катастарски парцели и објекти (жолти полигони – регистрирани објекти (столбови) на мост „Влајко“).....	155
Слика 7.13. Снимање на мост „Влајко“, лево – рачен скенер, десно – тотална станица.....	157
Слика 7.14. Интегриран облак од точки добиен со ласерско скенирање на мост „Влајко“	159
Слика 7.15. Обработен облак од точки од надворешноста на мост „Влајко“	160
Слика 7.16. Обработен облак од точки од внатрешноста на мост „Влајко“	160
Слика 7.17. 3Д поглед на BIM моделот на мост „Влајко“	162
Слика 7.18. Хоризонтален пресек на BIM модел на мост „Влајко“	162

Слика 7.19. 3Д поглед на интегриран BIM модел на мост „Влајко“ во GIS околина	163
Слика 7.20. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед од надвор)	164
Слика 7.21. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед кон внатре)	165
Слика 7.22. Формирани 3Д просторни единици во интегрираниот BIM-GIS модел на објект „Влајко“	166
Слика 7.23. Снимени точки за валидација на интегрираниот BIM-GIS модел на мост „Влајко“	169
Слика 7.24. Фотографија од хотелскиот комплекс направена од беспилотно летало.....	178
Слика 7.25. Скенирање на хотелски комплекс, лево – рачен скенер, десно – беспилотно летало со LiDAR скенер.....	181
Слика 7.26. Облак од точки од хотелскиот комплекс и неговата околина.....	182
Слика 7.27. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух од хотелскиот комплекс.....	182
Слика 7.28. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер од хотелскиот комплекс	183
Слика 7.29. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух за селектираниот објект.....	184
Слика 7.30. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер за селектираниот објект	184
Слика 7.31. BIM модел на селектираниот објект од хотелскиот комплекс.....	186
Слика 7.32. Дефинирани просторни сегменти во рамките на селектираниот објект	188
Слика 7.33. Интегриран BIM-GIS модел на хотелскиот комплекс	190
Слика 7.34. Интегриран BIM-GIS модел на хотелскиот комплекс во поширок опфат.....	191

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 2.1. Споредбена анализа на BIM и GIS	48
Табела 3.1. Споредба на IFC и CityGML во контекст на BIM-GIS интеграција	58
Табела 7.1. Формирани простори во моделот (IfcSpace)	147
Табела 7.2. Компаративна анализа на должини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните должини извлечени од BIM модел.....	149
Табела 7.3. Компаративна анализа на висини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните висини извлечени од BIM модел	150
Табела 7.4. Статистички параметри од компаративната анализа на растојанија мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните растојанија од BIM модел	153
Табела 7.5. Атрибутна табела на дефинираните просторни единици во објект „Влајко“ од интегрираниот BIM-GIS модел	167
Табела 7.6. Компаративна анализа на координати по оските Y, X и Z, за карактеристични точки определени со класичен геодетски премер и извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел	169
Табела 7.7. Статистички параметри од компаративна анализа на координати на контролни точки (класичен премер vs. BIM-GIS модел).....	174
Табела 7.8. Комбинирани индикатори за позициска точност (рамнина и 3Д простор).....	174
Табела 7.9. Регистрирани внатрешни простори на мост Влајко во ГКИС на АКН	175
Табела 7.10. Атрибутна табела на просторните единици во селектираниот објект.....	188

ЛИСТА НА КРАТЕЖКИ

AEC – Architecture, Engineering and Construction

AI – Artificial Intelligence

BIM – Building Information Modelling

CAD – Computer-Aided Design

CityGML – City Geography Markup Language

CRS – Coordinate Reference System

DSM – Digital Surface Model

DTM – Digital Terrain Model

GCP – Ground Control Point

GIS – Geographic Information System

GML – Geography Markup Language

IFC – Industry Foundation Classes

IMU – Inertial Measurement Unit

IoT – Internet of Things

ISO – International Organization for Standardization

LADM – Land Administration Domain Model

LiDAR – Light Detection and Ranging

LOD – Level of Detail (GIS)

LOD – Level of Development (BIM)

MEP – Mechanical, Electrical, Plumbing

nDSM – Normalized Digital Surface Model

OGC – Open Geospatial Consortium

PPK – Post-Processed Kinematic

RMSE – Root Mean Square Error

RTK – Real-Time Kinematic

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping

TLS – Terrestrial Laser Scanning

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

WFS – Web Feature Service

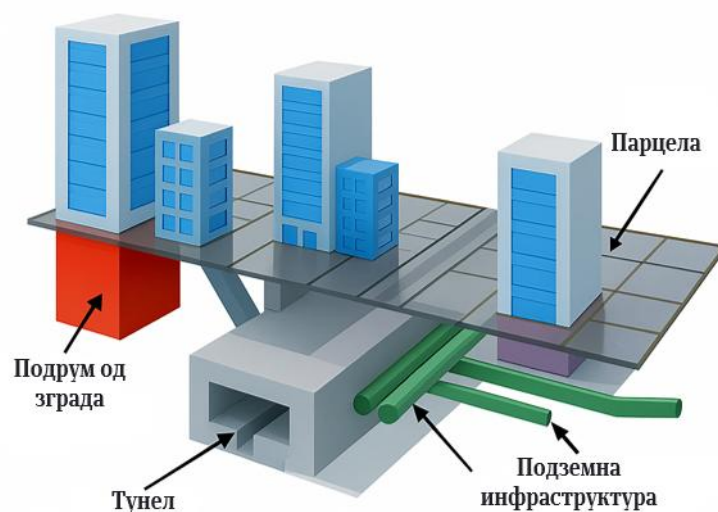
WMS – Web Map Service

АКН – Агенција за катастар на недвижности

ГКИС – Геодетско-катастарски информационален систем

ВОВЕД

Современите урбани средини се соочуваат со суштински и сè поголем проблем, просторот станува ограничен, а потребите од градби и инфраструктура се зголемуваат побрзо отколку што системите за планирање и управување можат да се приспособат. Интензивната урбанизација не создава само повеќе објекти, туку создава и ново ниво на сложеност: висококатници, подземни паркинзи, тунели, технички канали, комунални и енергетски мрежи, како и мултифункционални структури кои истовремено имаат јавна, приватна и сервисна улога (Слика 1). Овие елементи сè почесто коегзистираат во ист простор, се преклопуваат на различни висински нивоа и генерираат просторни односи што не можат јасно да се опишат, анализираат и контролираат со класични 2Д репрезентации. Критичноста на проблемот се манифестира во практични последици како неусогласени проектни решенија, конфликтни инфраструктурни коридори, ограничена можност за навремена детекција на конфликти во просторот, недоволна транспарентност на правата и ограничувањата врз користењето на недвижностите и просторот, како и зголемен ризик од грешки во фазите на изведба и одржување. Кога просторните односи не се моделираат прецизно во 3Д, одлуките за урбанистичко планирање, управување со инфраструктура и регулација на користењето на земјиштето се носат врз основа на поедноставени претстави, што може да резултира со скапи корекции, правни несогласувања и долгорочни функционални ограничувања на урбаната средина.



Слика 1. Преклопување на објекти на различни висински нивоа во просторот

Поради тоа, потребата од интегриран 3Д информациски систем повеќе не е технолошка опција, туку предуслов за одржливо и безбедно управување со урбаните средини. Таков систем треба да обедини геометрија, семантика и атрибути во единствен модел, да обезбеди тополошка конзистентност и да овозможи интероперабилност меѓу податоците што се користат во планирањето, проектирањето, градењето и управувањето. Само преку целосно тридимензионална и интегрирана репрезентација на урбаниот простор може да се намали ризикот од просторни конфликти и да се поддржат современите концепти за паметни градови, дигитални близнаци и 3Д катастар, каде точноста и конзистентноста на просторните податоци се одлучувачки.

Во оваа насока, **BIM (Building Information Modelling)** и **GIS (Geographic Information System)** се наметнуваат како суштинско решение затоа што обезбедуваат „целосна слика“ за урбаниот простор, од деталноста на еден конструктивен елемент, до неговата улога и влијание на поширокиот просторен контекст. BIM ја носи клучната вредност преку високо прецизна 3Д геометрија и богата семантика на објектите (компоненти, материјали, функции, фази на градба, податоци за одржување) што овозможува моделирање и контрола на градбите на ниво на инженерска реалност. GIS, од друга страна, обезбедува просторна рамка преку геореференцирање и тополошка конзистентност и аналитички механизми за поврзување на објектите со парцели, регулативи, инфраструктурни мрежи, ризици и сценарија за развој. Интеграцијата на BIM и GIS домените не претставува само техничка интероперабилност, туку создава основа за доверливо управување со недвижностите и урбаните средини, со можност за верификација на просторната точност, рана детекција на конфликти, поефикасна координација меѓу дисциплините и појасно дефинирање на права и ограничувања во тридимензионален простор.

Предмет на истражување

Предмет на истражување во овој докторски труд е систематска анализа на можностите за **интеграција на BIM и GIS домените** за тридимензионално моделирање на микро и макрониво, како базичен модел за развој на систем за сеопфатно администрирање со недвижностите. Интегрираниот BIM-GIS модел се разгледува како методолошка и техничка основа за развој на сеопфатен систем за управување со недвижностите и просторот, при што посебен акцент е ставен на потребите на 3Д катастарските системи и способноста на еден таков интегриран модел да ги репрезентира сложените просторни односи и правата врз недвижностите.

Во рамките на истражувањето се анализираат различни пристапи за аквизиција на просторни податоци, како **LiDAR (Light Detection and Ranging)** и **SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)** технологии, кои претставуваат современи решенија за брзо и детално снимање на објектите и изградената средина, со можност за добивање густе облаци од точки, кои обезбедуваат висока геометриска точност и доволна просторна покриеност за моделирање на објектите и просторот, применливи за 3Д моделирање и во BIM и во GIS околина.

Дополнително, истражувањето се насочува кон анализа на методите и техниките за ефективно интегрирање на BIM и GIS, при што трансформацијата на податоците се третира како критичен процес што не подразбира само конверзија на формати, туку и усогласување на концептуални модели. Истражувањето опфаќа прашања на геометриска и тополошка валидност, раслојување според GIS логика, генерализација и управување со нивоа на деталност, како и зачувување и пресликување на семантиката при преминот од објектно-ориентиран BIM модел кон просторна база на податоци во GIS.

Цели на истражувањето

Целта на истражувањето е да се разработи и систематизира методолошка рамка за ефективна интеграција на BIM и GIS домените, насочена кон изработка на конзистентни тридимензионални модели и нивна функционална примена во современи катастарски и просторни информациски системи. За постигнување на оваа цел, истражувањето е структурирано низ следните конкретни задачи:

- **Идентификација и анализа на основните концепции, принципи, можности и ограничувања** поврзани со 3Д моделирањето во BIM и GIS околина, со цел да се утврдат клучните точки на усогласување и разлики меѓу двата домена;
- **Креирање на тридимензионални BIM и GIS модели** за постојни објекти, врз основа на достапни просторни и технички податоци, прибрани преку LiDAR, SLAM и други релевантни методи за аквизиција, со цел да се обезбеди реалистична и метрички контролирана основа за интеграција;
- **Анализа и структурирање на работните процеси** за трансформација и конверзија на податоците од BIM кон GIS, при што се идентификуваат техничките, тополошките и семантичките предизвици што влијаат врз интероперабилноста и квалитетот на резултатните модели;
- **Евалуација на стандардите за интероперабилност** (IFC и CityGML) и дефинирање на потребите за нивно адаптирање, проширување или надградба со цел поефикасна поддршка на BIM-GIS интеграцијата;
- **Интегрирање на правните и административните аспекти** преку инкорпорирање на податоци за стварните права врз недвижностите во интегрираниот BIM-GIS модел, во согласност со концептите и структурата на LADM (Land Administration Domain Model);
- **Евалуација на квалитетот на интегрираното решение**, преку квантитативна и квалитативна анализа на геометриската точност, атрибутната конзистентност и семантичката целосност на добиените 3Д модели.

Овие цели ја отсликуваат мултидисциплинарната природа и комплексноста на темата и поставуваат јасна основа за развој на применлив интегриран модел, кој ќе биде тестиран и валидиран преку студии на случај во реални услови.

Образложение на работните хипотези и тези

Во рамките на ова истражување се анализира BIM-GIS интеграцијата како методолошка основа за развој на функционални и интероперабилни тридимензионални модели, наменети за поддршка на урбанистичкото планирање, управувањето со просторот и современите катастарски системи. Формулираните работни хипотези и главната теза се темелат на современите истражувачки насоки и на практично евидентираниот ограничувања во постојните решенија, при што како клучна потреба се издвојува систематското поврзување на техничките карактеристики на објектите со нивниот просторен контекст и со правните податоци во рамки на единствен, интегриран модел.

Главната теза на истражувањето е:

Интеграцијата на BIM и GIS технологиите овозможува развој на конзистентен, тридимензионален, дигитален модел кој може да се користи како основа за изградба на современ систем за ефикасно управување со недвижностите, со валидирана пропорционалност, атрибутивна целовитост и интероперабилност на податоците.

Оваа теза произлегува од претпоставката дека досегашните модели за управување со недвижности, засновани на дводимензионалните модели на недвижностите и

просторот, не се доволни за да ги прикажат комплексните просторни односи, сопственички структури и физички карактеристики на објектите во современи урбани средини.

Во функција на докажување на главната теза, се поставени следниве работни хипотези:

Хипотеза 1: Постојат конкретни технички и концептуални можности за поврзување на BIM и GIS околина преку усогласување на стандардите, геометриските репрезентации и атрибутните структури.

Хипотеза 2: Примената на ласерско скенирање (LiDAR и SLAM) и Scan-to-BIM методологии овозможува креирање на прецизни 3Д BIM модели кои можат да се интегрираат во GIS системи со минимални загуби на податоци и структури.

Хипотеза 3: Постои потреба за проширување или адаптација на постојните формати и стандарди (IFC, CityGML, LADM) за да се овозможи беспрекорна размена на податоци и изградба на интероперабилен 3Д катастарски систем.

Хипотеза 4: Интегрираниот BIM-GIS модел овозможува подетална визуелизација, анализа и управување со правните, техничките и геометриските аспекти на недвижностите во споредба со традиционалните катастарски решенија.

Хипотеза 5: Примената на таков систем е особено погодна за урбани средини со сложени сопственички односи и вертикална организација на просторот (на пример, згради на повеќе нивоа со повеќе сопственици, подземна и надземна инфраструктура и слично), при што се подобрува правната сигурност и транспарентноста.

Секоја од овие хипотези е тестирана преку развој на интегриран методолошки пристап кој вклучува: аквизиција на просторни податоци со современи технологии, креирање на BIM модели, нивна трансформација и имплементација во GIS околина и евалуација на моделите преку конкретни студии на случај. Истражувањето се осврнува и на идентификување на празнини во постојните стандарди за интероперабилност, со цел предлог за нивна адаптација или надградба, особено во согласност со LADM концептот за регистрација на правата врз недвижностите. Дополнително е анализирана практичната примена на интегрираниот модел како поддршка за воспоставување на 3Д катастарски системи, преку симулации и сценарија за управување со правата врз недвижностите во комплексни урбани структури.

Овие хипотези не само што се во согласност со досегашните научни достигнувања, туку претставуваат и основа за проширување на знаењето во насока на развој на нови решенија кои ќе одговорат на практичните потреби од воспоставување на дигитални тридимензионални системи за управување со недвижностите и просторот.

Крајнок опис на содржината

Докторскиот труд е организиран низ осум тематски поглавја, кои логички ги следат целите на истражувањето.

Вовед

Во воведното поглавје е истакнат проблемот и потребата од интеграција на BIM и GIS домените за современо управување со недвижностите и просторот. Исто така, прецизно се дефинирани целите, задачите и предметот на истражувањето. Претставени се поставените работни хипотези и аргументирана е нивната релевантност. На крај е дадена структурата на дисертацијата, применетиот методолошки пристап, како и научниот и практичниот придонес на трудот.

Поглавје 1: Преглед на доспиѓувања во научно-истражувачката област

Ова поглавје дава систематски преглед на релевантната научна и стручна литература поврзана со BIM и GIS, нивната еволуција и примена. Анализирани се досегашните обиди за нивна интеграција, како и предизвиците во интероперабилноста и стандардизацијата. Посебен фокус е ставен на истражувања кои се однесуваат на 3Д катастарски системи и моделирање на правата врз недвижностите. Прегледот има за цел да ја идентификува научната празнина што истражувањето ќе се обиде да ја надмине. Во ова поглавје се утврдува и теоретската рамка врз која се гради методологијата.

Поглавје 2: Теоретска основа на BIM и GIS технологиите

Ова поглавје ја разработува концептуалната основа на BIM и GIS технологиите. Презентирана е систематска анализа на нивните принципи на функционирање, структурни компоненти, типови на податоци и пристапи кон моделирањето. Дополнително е даден споредбен преглед на форматите, просторната резолуција и геометриските репрезентации што ги карактеризираат двата домена. Врз основа на добиените согледувања се издвојуваат клучните сличности и разлики, како и условите и можностите за нивна ефективна интеграција.

Поглавје 3: Стандарди и техники за интеграција на BIM и GIS

Во ова поглавје се разгледуваат клучните формати и стандарди што ја поддржуваат интероперабилноста помеѓу BIM и GIS домените, со посебен фокус на IFC и CityGML. Даден е преглед на техничките, геометриските и семантичките бариери при трансформација и поврзување на податоците. Дополнително, се разгледува примената на LADM стандардот за инкорпорирање на правната компонента. Врз основа на идентификуваните ограничувања, поглавјето предлага насоки за проширување и надградба на постојните стандарди за поддршка на 3Д катастарските решенија.

Поглавје 4: Домени на примена на интегриран BIM-GIS систем

Ова поглавје дава преглед и систематизација на најзначајните области во кои интеграцијата на BIM и GIS се покажува како особено корисна од практичен и научен аспект. Разгледани се сценарија на употреба во просторно и урбанистичко планирање, планирање и управување со инфраструктура, симулации и предвидувања, а посебен акцент е даден на значењето на интегриран BIM-GIS систем за администрирање со недвижности и 3Д катастар. Со тоа, поглавјето ја поставува основата за аргументиран избор на студиите на случај и за дефинирање на релевантни индикатори врз кои ќе се оцени ефикасноста на предложената методологија во докторскиот труд.

Поглавје 5: Аквизиција на просторни податоци за 3Д моделирање

Ова поглавје ги разгледува современите техники за аквизиција на просторни податоци со висока прецизност и нивната улога во креирањето веродостојни 3Д репрезентации на објектите и нивниот просторен контекст. Детално се анализирани LiDAR и SLAM технологиите, кои овозможуваат детално и ефикасно скенирање, особено во сложени и динамични средини. Во рамките на анализата се дискутираат клучните аспекти поврзани со квалитетот на податоците, геометриската точност, густината и ажурноста на облакот од точки, како и факторите што влијаат врз нивната доверливост и употребливост.

Поглавје 6: Методологија за интегрирање на BIM и GIS

Поглавјето ја презентира предложената методолошка рамка за систематска интеграција на ласерско скенирање, BIM и GIS со цел добивање проверливи и применливи 3Д дигитални репрезентации на објектите и нивниот просторен контекст. Притоа, се дефинира јасна низа од чекори што овозможуваат трансформација на оригиналните просторни податоци од реалниот феномен во геометриски конзистентни и семантички структурирани модели со техничка и правна релевантност. Ова поглавје детално ја разработува предложената методологија низ четирите главни фази: аквизиција на просторни податоци, нивно процесирање и интеграција, моделирање во BIM околина и интеграција на резултатните модели во GIS околина за понатамошна анализа. Во поглавјето се нагласуваат условите за квалитет на податоците, потребата од еднозначна податочна структура и важноста на интероперабилноста за да се обезбедат валидни резултати и практична применливост.

Поглавје 7: Студии на случај

Поглавјето ја презентира практичната примена на предложената методологија врз конкретни објекти и подрачја. Детално е прикажан процесот на аквизиција на просторни податоци, креирање на BIM модел, негово трансформирање и интеграција во GIS околина. Извршена е евалуација на точност, атрибутна конзистентност и семантичка целосност на формираните модели. Студиите на случај служат за тестирање на поставените хипотези и анализа на ефикасноста на интеграцијата.

Поглавје 8: Анализа на резултатите од спроведено истражување

Во ова поглавје се дискутираат резултатите добиени од студиите на случај во однос на целите на истражувањето. Направена е анализа на успешноста, но и ограничувањата на предложената методологија и потенцијалите за нејзино унапредување. Анализата дава критичка евалуација на интегрираниот BIM-GIS систем и неговата применливост во реални услови.

Заклучок

Заклучното поглавје ги сумира најважните резултати од истражувањето и ја потврдува валидноста на поставените хипотези. Во рамките на ова поглавје се нагласени научните и практичните придонеси на дисертацијата. Дополнително, истакнато е значењето на 3Д моделирањето за ефикасно управување со недвижностите и просторот и дадени се препораки за институции кои работат во сферата на администрирање со недвижности. На крај, предложени се насоки за идни истражувања и потенцијална примена на ваквите системи.

Научни методи кои се применети

Истражувањето се состои од два главни дела, теоретски дел и дел посветен на развој, тестирање и валидација на предложена методологија за интеграција, преку нејзина имплементација на конкретни студии на случај.

Првиот дел е насочен кон теоретска разработка на истражувачката проблематика, преку систематски преглед на релевантната литература и еволуцијата на BIM и GIS технологиите, како и анализа на постојните стандарди, нивната интероперабилност и капацитет за интеграција. Врз основа на критичко разгледување на досегашните пристапи, се прави оценка на развојот на BIM-GIS интеграцијата, со посебен осврт на методологиите на ниво на податоци, ниво на процеси и ниво на апликации, како и на актуелните технички и семантички предизвици.

Вториот дел го опфаќа развојот на методологија за интеграција, која е тестирана и валидирана преку три студии на случај. Студиите на случај се базираат на реални објекти, за кои е реализирана аквизиција на просторни податоци со примена на ласерско скенирање, формирани се BIM модели со соодветно ниво на деталност и истите се интегрирани во GIS околина. Изборот на студиите на случај е направен целно и аргументирано, со цел да се опфатат различни типови на просторна комплексност кај објектите и да се провери применливоста на методологијата во реални услови.

Во рамките на докторскиот труд се применети следните методи на истражување:

- **Метод на анализа** на потребите од интегриран систем за администрирање со недвижности, со идентификација на функционалните барања, ограничувањата на постојните пристапи и очекуваните придобивки од 3Д модели и интегриран BIM-GIS систем;
- **Метод на анализа и синтеза** на достапни просторни и технички податоци релевантни за тридимензионално моделирање во BIM и GIS околина, со цел утврдување на соодветни извори, нивоа на деталност и критериуми за квалитет на податоците;
- **Компаративна истражувачка метода** за споредба на концептите и стандардите за моделирање во BIM и GIS (вклучително и нивната отвореност и подготвеност за интеграција), со фокус на разликите во моделите на податоци, семантиката, геометриските репрезентации и тополошките правила;
- **Моделирање на процеси и работни текови** за конверзија и трансформација на модели и податоци од BIM кон GIS околина;
- **Метод на ситуација на случај** што опфаќа примена на дефинираните работни процеси врз конкретни реални ситуации, со цел да се оцени изводливоста и практичната применливост на предложената методологија;
- **Експериментална верификација и евалуација** на предложените решенија од технички, правен и организациски аспект, преку анализа на геометриска точност, атрибутна конзистентност, семантичка целосност и усогласеност со барањата на катастарските и просторните информациски системи.

Очекуван научен придонес

Со оглед на тоа што истражувањата во областа на интеграцијата на BIM и GIS технологиите стануваат актуелни во последната деценија евидентна е потребата од систематизирање на она што до сега е постигнато во областа на овие две технологии, нивните предности и недостатоци, пречките кои може да се јават при нивно интегрирање и можностите за надминување на истите, но и дополнителни истражувања во насока на нивно унапредување и примена во различни области од општественото живеење. Како резултат од ова истражување се очекува целосно да се обработат и разобличат процесите на моделирање и домените на дејствување на BIM и GIS, да се разработат принципите на нивна интеграција и да се афирмираат можностите и ограничувањата при тридимензионалното моделирање во BIM и GIS околина.

Истражувањето има за цел да обезбеди иновативен и интердисциплинарен придонес во полето на геоинформатиката, дигиталното управување со недвижности и катастарските системи преку развој и верификација на методологија за интеграција на BIM и GIS технологиите. Овој труд не само што се осврнува на техничките аспекти на трансформација и поврзување на моделите, туку и на нивната примена во реални сценарија со високо социоекономско и институционално влијание, особено во рамки на современи 3Д катастарски системи.

Главни очекувани научни придонеси се:

- Развој на унифицирана методолошка рамка за интеграција на BIM и GIS во функција на 3Д катастар, која ги поврзува геометриските, семантичките и правните аспекти на податоците од двата домена;
- Примена и евалуација на современи технологии за аквизиција на просторни податоци, вклучително LiDAR и SLAM, во процесот на креирање на високо-прецизни BIM модели и нивна трансформација во GIS околина.
- Анализа и унапредување на постојните стандарди (IFC, CityGML, LADM), при што предложени се конкретни насоки за адаптација или проширување со цел поддршка на интегрирани 3Д катастарски апликации;
- Изработка на практично применлив модел за регистрација на правата врз недвижностите дефинирани во 3Д просторот, преку комбинирање на физичките (BIM) и правните (LADM) репрезентации во GIS систем;
- Визуелизација и симулација на комплексни сопственички структури и просторни ограничувања, кои е невозможно прецизно да се прикажат со традиционални 2Д катастарски системи;
- Потенцијал за трансфер на резултатите во национални и регионални иницијативи за дигитална трансформација на администрацијата со недвижности, особено во земји кои планираат премин кон 3Д катастар;
- Дополнување на научната литература со студии на случај и експериментална имплементација, која ќе служи како референтен модел за идни истражувачи, институции и инженери;
- Придонес во дефинирање на информациска основа за дигитални близнаци во управувањето со урбаните средини, преку демонстрација на BIM-GIS-LADM поврзување како основа за податоци кои се ажурираат во реално време.

Со оглед на мултидисциплинарниот карактер на истражувањето, се очекува резултатите да бидат од интерес за повеќе истражувачки и практични области, вклучувајќи: просторно и урбанистичко планирање, катастар на недвижности, процена на вредност на недвижностите, управување со инфраструктура, управување со животна средина, управување со кризни состојби и многу други. Ова истражување ќе придонесе за афирмирање на овие технологии во нашата држава и ќе претставува поттик за нивна поголема примена, од која корист би имала целата АЕС (Architecture, Engineering and Construction) индустрија, но и институциите, локалните самоуправи и сите субјекти чија главна цел е овозможување на одржлив развој и квалитетен живот во општеството.

Примена на резултатите од истражувањето

Интеграцијата на BIM и GIS технологиите овозможува воспоставување на интелигентни, просторни информациски системи кои имаат широка примена во јавниот и приватниот сектор. Резултатите од ова истражување, кои се однесуваат на методологија за прибирање, моделирање, трансформација и интеграција на просторни и атрибутни податоци, може да се применат во различни дисциплини кои користат просторна анализа, управување со објекти или правна регистрација на недвижности. Таквите интегрирани системи нудат голем потенцијал за подобрување на точноста, транспарентноста и ефикасноста во процесите на планирање, одлучување и управување.

Најдиректна и значајна примена на резултатите се очекува во рамките на 3Д катастарските системи. Интегрираниот BIM-GIS пристап овозможува регистрирање на недвижности во три димензии, вклучително и вертикални и подземни сопственички структури (станови, подруми, гаражи). Со помош на LADM моделот се обезбедува можност за интеграција на правата врз недвижностите преку прецизно моделирање на објектите во 3Д просторот, што овозможува зголемена правна сигурност, подобра визуелизација и јавна достапност на податоците.

BIM-GIS интеграцијата овозможува создавање на детални 3Д модели на објекти и инфраструктура кои може да се вклучат во урбанистички сценарија за развој. Врз основа на ваков интегриран систем, во рамките на урбанистичкото планирање, можат да се анализираат влијанија на нови објекти (засенување, пристапност, видливост), како и просторно-правни ограничувања при пренамена на земјиште.

Во рамките на концептот на „паметни градови“, интегрираните BIM-GIS модели претставуваат клучна основа за развој на дигитални близнаци, преку кои станува возможно динамичко следење, симулација и оптимизација на урбаните ресурси во (речиси) реално време. Ваквите модели овозможуваат континуиран увид во животниот циклус на објектите, од фазата на проектирање и изградба, до експлоатација, одржување и реконструкција, со што се подобрува планирањето и носењето одлуки низ сите фази. Дополнително, GIS обезбедува просторна рамка и контекст за BIM содржината, што ја унапредува координацијата на објектите со нивната околина и со инфраструктурните и регулативните услови. Како резултат, овој пристап е особено релевантен за инвеститори и менаџери на недвижности, бидејќи обезбедува прецизни и структурирани податоци за сопственоста, инфраструктурата и функционалноста, позиционирани во јасно дефиниран просторен контекст.

Во доменот на инфраструктурата, интегрираните модели овозможуваат поврзување на технички детали (водовод, канализација, енергетски системи) со нивната реална просторна позиција и правен статус. Ова е особено корисно при реконструкции, управување со јавни добра и оптимизација на комунални услуги. GIS дава аналитички алатки, додека BIM обезбедува технички опис, додека нивната комбинација создава комплетна слика за управување со урбани системи.

Преку 3Д модели добиени со интеграција на BIM и GIS, можат да се анализираат ризици од поплави, свлечишта, пожари и други природни катастрофи врз изградените структури. Овие модели овозможуваат симулации и сценарија за реагирање, со точна локација на инфраструктурата и објектите. Дополнително, интеграцијата може да се користи за еколошки студии, следење на урбана експанзија и проценка на влијанија врз животната средина.

Развиениот методолошки пристап и интегрираните модели може да се користат во академската настава, особено во области како геодезија, градежништво, геотехника, архитектура, урбанизам и слично. Тие овозможуваат интердисциплинарна обука на студенти и млади истражувачи во работа со 3Д податоци, 3Д моделирање и просторни анализи. Дополнително, резултатите од истражувањето служат како основа за понатамошни докторски и магистерски трудови, како и за развој на научни публикации.

Преку примената на развиените методи и технички решенија, резултатите од ова истражување имаат потенцијал да го унапредат процесот на дигитална трансформација во повеќе сектори. Тие нудат основа за креирање на унифицирани, отворени и интероперабилни просторни системи кои се клучни за модерно управување со урбаниот и правниот простор. Примената на резултатите од истражувањето има потенцијал да предизвика суштински промени во начинот на кој се моделира, прикажува и администрира просторот.

1. ПРЕГЛЕД НА ДОСТИГНУВАЊА ВО НАУЧНО-ИСТРАЖУВАЧКАТА ОБЛАСТ

Интеграцијата на BIM и GIS, во последните години, стана истакната тема во научните истражувања, водена од растечката потреба за сеопфатни 3Д модели неопходни за паметно управување со недвижностите и просторот. Научните истражувања во областа на интеграцијата на BIM и GIS започнуваат во последната деценија, што е релативно краток период во споредба со развојот на GIS кој може да се следи од 1960-тите и развојот на BIM, започнувајќи од раните 1980-ти. Бидејќи BIM и GIS како системи, првично се развиени за различни цели, се јавуваат многу предизвици во процесот на нивната интеграција. Со цел подобро да се разберат овие два различни домени и нивната интеграција потребно е да се проучи напредокот во развојот на самите BIM и GIS домени, пред да се премине кон проучување на процесот на нивната интеграција.

Развојот на BIM како концепт произлегува од потребата градежниот објект да се претстави не како збир на цртежи, туку како информациски модел составен од компоненти со свои својства и логички врски. Ваквиот пристап се јавува како одговор на ограничувањата на класичниот CAD (Computer-Aided Design) пристап, кој во основа репродуцира цртежи и геометрија, но не ја задржува суштинската информација за тоа што претставуваат елементите и како се поврзани. Во таа насока Eastman (1975), со концептот Building Description System, ја поставува суштинската идеја што подоцна ќе стане **BIM: дигитален модел во кој објектот не е цртеж, туку информациска структура составена од елементи со својства, правила и односи**. Оваа перспектива подразбира дека сидот, плочата или прозорецот се „интелигентни“ објекти кои носат атрибути (материјал, дебелина, отпорност на пожар, производител), но и тополошки и функционални релации (на пример, отвори кои се вгнездени во сид, простории кои се ограничени со градежни елементи), што овозможува автоматизирана конзистентност и аналитичка употреба на моделот (Eastman et al., 2011).

Во текот на 1990-тите и раните 2000-ти, BIM постепено се етаблира како методологија што ги интегрира 3Д репрезентациите со негеометриски податоци, преминувајќи од „modelling“ кон „information management“ во целиот животен циклус на објектот. Во овој период се јавуваат и практичните проширувања кон 4Д (време, динамика на изведба) и 5Д (трошоци), кои ја демонстрираат клучната вредност на BIM, односно еднаш создадениот модел може да се користи за повеќе цели, преку различни фази и дисциплини, без повторно креирање на исти податоци (Eastman et al., 2011; Sacks et al., 2018). Така, BIM се позиционира како интеграциска платформа што ја поддржува координацијата меѓу архитектура, конструкција и инсталации, но и донесување одлуки базирани на податоци (оптимизација на материјали, планирање на логистика, анализа на одржливост).

Клучен пресврт во научната и практичната применливост на BIM е развојот на отворени стандарди за интероперабилност. Бидејќи BIM околината најчесто е софтверски зависна, прашањето „како податоците да се пренесуваат без загуба“ станува централно. Во таа насока, **IFC (Industry Foundation Classes)**, развиен во рамки на иницијативите на International Alliance for Interoperability (IAI), подоцна **buildingSMART International**, се афирмира како **доминантен отворен модел за размена на BIM податоци**. IFC обезбедува објектно-ориентирана шема која ги опфаќа геометријата, атрибутите, класификациите и релациите меѓу елементите, како и просторната хиерархија (site-building-storey-space), што е критично за понатамошни интеграции со просторни системи (Eastman et al., 2011).

Со интернационалната стандардизација на IFC преку ISO стандардот 16739, концептот на „отворен BIM“ добива формална рамка која го намалува ризикот од зависност од одреден производител на софтвер и ја поддржува долгорочната употребливост на податоците, особено во јавни и институционални системи. Покрај IFC, buildingSMART развива и дополнителни стандарди и спецификации кои ја комплетираат интероперабилноста на процесите, не само на датотеките: IDM (Information Delivery Manual) за дефинирање кои информации се разменуваат во одредена фаза или сценарио, MVD (Model View Definition) за специфицирање подмножества на IFC, релевантни за конкретна намена и BCF (BIM Collaboration Format) за управување со координациски прашања без да се разменува цел модел. Во литературата, овие механизми се препознаваат како услов за „процесна интероперабилност“, бидејќи реалната интеграција се случува преку работни текови, улоги и правила за размена, а не само преку размена на геометрија (Sacks et al., 2018).

Современите истражувања го прошируваат BIM кон повеќедимензионални концепти (6Д и 7Д), најчесто поврзани со енергетска ефикасност, одржливост и управување со недвижности. Иако означувањата 6Д и 7Д не се универзално стандардизирани, заедничката идеја е дека BIM станува носител на податоци за експлоатација и сервисна политика: одржување, следење, состојба на компоненти, реновирање и управување со недвижности (Volk et al., 2014). Токму овде се засилува поврзаноста со GIS доменот, за ефикасна сервисна политика со недвижностите, податоците за објектот мора да бидат вгнездени во просторен контекст (парцела, инфраструктура, ограничувања, ризици), што BIM сам по себе не го обезбедува на просторно ниво. Оттука, развојот на BIM и отворените стандарди логично води кон следната истражувачка насока, интеграција со GIS, каде што IFC и сродните спецификации претставуваат темел за интероперабилно поврзување на инженерските и просторните податоци.

Од друга страна, GIS како научно-технолошки домен се развива од втората половина на XX век, како резултат на растечката потреба за систематско управување со просторни податоци во јавната администрација, просторното планирање и природните ресурси. Истражувањата на Tomlinson (1968), поврзани со раните национални геоинформациски системи, често се сметаат за почетна точка на современиот GIS пристап, бидејќи го поставува принципот дека *просторните податоци треба да се организираат, анализираат и одржуваат во стандарден дигитален систем*, а не само во картографски производ. Подоцна, Goodchild (1992) го формулира поимот Geographic Information Science (GIScience), со што се нагласува дека GIS не е само софтверски систем, туку и научна дисциплина која ги проучува моделите на просторните феномени, методите за нивна репрезентација и аналитичките процедури што произлегуваат од нивната природа. Во таа насока, *GIS постепено прераснува во интегрирана средина за управување со комплексни просторни податоци, каде геометријата, координатниот референциен систем, тополошките односи и атрибуциите се поврзани во единствен модел кој ја поддржува нивната визуелизација и анализа* (Burrough & McDonnell, 1998; Longley et al., 2015).

Клучен придонес на GIS е развојот на формални модели на просторни податоци и нивното поврзување со бази на податоци. Во практична смисла, тоа значи дека просторните објекти (парцели, згради, патишта, водови) не се третираат само како графички ентитети, туку како објекти со структуриран опис, дефинирани правила и ограничувања. Тополошките односи, како што се соседство, поврзаност и припадност,

како и прецизната дефиниција на координатните системи, овозможуваат контрола на квалитетот на податоците и изведување сложени просторни операции (Burrough & McDonnell, 1998). Во оваа еволуција, концептот на *geodatabase*, односно просторна база на податоци, претставува важен чекор кон моделско-ориентирано управување со податоци, бидејќи овозможува примена на доменски правила, поттипови на објекти, релации и механизми за интегритет на податоците во рамки на единствена структура (Zeiler, 1999; Longley et al., 2015).

Паралелно со методолошкиот развој, стандардизацијата станува суштински услов за интероперабилност, особено кога просторните податоци се користат во повеќе институции и платформи. Во тој контекст, OGC (Open Geospatial Consortium) развива семејство стандарди за сервисно ориентирана размена на просторни податоци: WMS (Web Map Service) за растерски прикази, WFS (Web Feature Service) за размена на векторски податоци и GML (Geography Markup Language) како јазик за опис на просторни геометрии и атрибути. Во научната и применетата литература, ваквите стандарди се разгледуваат како предуслов за современи просторни политики, затоа што овозможуваат конзистентна размена на податоци без губење на просторниот контекст и значењето (Longley et al., 2015).

Во контекст на моделирањето на објекти и простор во урбани средини, GIS поминува низ значајна трансформација: од доминантно 2Д модели, кон семантички организирани 3Д модели на урбани средини кои можат да поддржат висинска компонента и 3Д анализи (засенчување, видливост, енергетски потенцијал, урбани ризици). Токму овде *CityGML се еѝаблира како клучен OGC сѝандард за 3Д модели на урбани средини*, бидејќи овозможува објектите да се опишат и геометриски и семантички, со јасно дефинирани класи (зграда, терен, транспорт, вегетација) и со повеќе нивоа на деталност LOD (Level of Detail), што ја прави употребата на моделите флексибилна во зависност од размерот и намената (Kolbe, 2009; Gröger & Plümer, 2012). Овој пристап обезбедува „мост“ меѓу инженерските модели и просторните системи, бидејќи од едната страна се задржува урбанистичкиот и територијалниот контекст, а од другата страна се овозможува структурирана врска со деталните податоци за објектите.

Современиот GIS не се сведува само на складирање и визуализација на просторни податоци, туку функционира како просторна информациска инфраструктура што поддржува моделирање, анализа, управување и размена на податоци во различни домени. Во рамките на BIM-GIS интеграцијата, ова е особено важно затоа што GIS обезбедува: стабилна просторна референца (координатни референтни системи и геодетска конзистентност), инфраструктура на просторни бази на податоци и правила за интегритет и стандарден механизам за сервисна размена на податоци. Тие карактеристики го прават GIS природна платформа за надградување на инженерските 3Д модели во поширок систем за управување со недвижности, инфраструктура и услуги, каде објектите се поврзани со парцели, ограничувања, ризици и административни единици, што директно води кон современите истражувачки насоки за 3Д модели на урбани средини и 3Д катастар (Longley et al., 2015; Kolbe, 2009).

Актуелните истражувања во областа на интеграцијата на BIM и GIS и технолошкиот напредок доведоа до континуирано ажурирање и еволуција на овие технологии, поставувајќи нови решенија, но и нови предизвици. Светската литература секој ден е се побогата со истражувања и трудови во областа на поставување на стандарди, методологии, процеси и политики за интеграција на овие две технологии од една страна, како и примена на еден ваков интегриран систем во функција на специфични намени како

на пример, 3Д капацитет, просторно и урбанистичко планирање, планирање на системи за водоснабдување, ефикасно планирање на патишта и железничка инфраструктура, предвидувања и симулации како процена на соларен фотоволтаичен потенцијал, анализи на бучава, но и предвидување на евентуални илустрации предизвикани од појави, свлечувања, пожари.

Интеграцијата на BIM и GIS претставува **интердисциплинарен предизвик зашто се обидува да усогласи два различни „начини на размислување“ за просторот: BIM доменот го моделира објектот како инженерски сеп од елементите со богатата семантика и локална геометрија, додека GIS доменот го моделира просторот како просторен референциен систем со тополошки правила и просторни операции над објектите во база на податоци.** Токму оваа структурна разлика во моделите на податоци (IFC наспроти GML/Geodatabase) се препознава како една од основните бариери, бидејќи интеграцијата не е „пренос на форма“, туку трансформација на смислата, грануларноста и правилата на моделот (Isikdag & Zlatanova, 2009).

Методологиите за интеграција најчесто вклучуваат трансформација на податоци помеѓу различни формати, како и геореференцирање на BIM моделите за нивно правилно позиционирање во GIS околина. Истражувањата на El-Mekawy et al. (2012), Donkers et al. (2016) и поновите студии на Kang & Hong (2018) и Zhu & Wu (2022) предлагаат концептуални и технички модели за трансформација на податоци, со цел да се зачува геометриската точност, семантичката содржина и тополошките врски на објектите. Принципите на интеграција бараат усогласеност на геометријата, зачувување на атрибутните вредности, стандардизација на семантичките структури и поддршка на тополошките односи. Новиот ISO стандард 19166:2025 за BIM-GIS интеграција, како дел од серијата за просторни податоци, претставува значаен чекор кон уедначување на методологиите на глобално ниво.

Donkers et al. (2016) прикажуваат дека успешната конверзија не зависи само од семантичко мапирање, туку и од тоа дали резултатот е геометриски валиден и тополошки конзистентен модел (затворени тела, коректни фасадни или кровни површини, избегнување на преклопувања), бидејќи без тоа 3Д просторната анализа и понатамошната употреба во GIS често стануваат невозможни. Тие предлагаат алгоритамски чекори со 3Д геометриски операции за да се добие LOD3 модел со коректна семантика и геометрија, што индиректно покажува дека „директното префрлање“ на BIM геометрија (параметарска, често премногу детална) во GIS контекст мора да помине низ генерализација и структурирање.

Во поновите истражувачки и стручни насоки, интегрираните BIM-GIS модели сè почесто се препознаваат како клучна основа за развој на дигитални близинаци на урбани средини, при што деталната инженерска семантика се поврзува со поширокиот просторен контекст. Сепак, литературата укажува дека токму интеграцијата на податоците, особено обезбедувањето конзистентна семантика, прецизно геореференцирање, усогласено управување со нивоата на деталност и континуирано ажурирање, претставува најзначајната пречка меѓу концептуалната поставеност и реалната имплементација на ваквите системи (Jeddoub et al., 2023).

Во последните години, интероперабилноста се формализира и преку ISO/TS 19166 (BIM-to-GIS conceptual mapping), кој не пропишува една универзална шема, туку воведува механизми за мапирање според кориснички барања: дефинирање „перспектива“ на

мапирање, мапирање на елементи и мапирање на нивоа на деталност (LOD mapping). Овој пристап е особено релевантен затоа што го „легитимира“ принципот дека различни сценарија (урбанизам, инфраструктура, катастар) бараат различна селекција на елементи и атрибути и различна геометриска генерализација, наместо обид за целосна, унифицирана конверзија.

Концептот на LOD хармонизација станува практично неопходен, бидејќи BIM LOD (LOD100–LOD500) и CityGML LOD (LOD0–LOD4 концепт во 3.0) не се еквивалентни 1:1, односно тие се развиени за различни цели и различни правила на репрезентација. Поради тоа, истражувањата нагласуваат дека хармонизацијата не е механичко поврзување во парови, туку бара правила за генерализација, избор на релевантни семантички слоеви и контрола на геометриската валидност, особено кога целта е 3Д катастар (каде што волуменската конзистентност и недвосмисленоста на границите се критични). Во таа насока, трудовите за CityGML 3.0 посочуваат дека ревидираниот LOD концепт и унапредените можности за моделирање на простори или единици отвораат нови патеки за покохерентно усогласување меѓу BIM и GIS, но истовремено ја зголемуваат потребата од јасно дефинирани правила за мапирање (поврзување) според намената.

Од аспект на просторни податоци неопходни за формирање на валидни 3Д модели на објекти и простор, современите истражувања сè појасно ја нагласуваат улогата на сензорските технологии како „прв чекор“ во создавањето интегрирани BIM–GIS модели, особено кога целта е да се добијат *as-built* репрезентации со висока геометриска веродостојност и просторна референца. Во контекст на BIM–GIS интеграција, ова е значајно затоа што квалитетот на понатамошното моделирање (BIM) и анализата и управувањето (GIS) директно зависи од точноста, комплетноста и валидноста на влезните просторни податоци. Ласерското скенирање, во форми како TLS, UAV-LiDAR и мобилни SLAM системи, овозможува масовно и густо регистрирање на геометријата на објектите и околниот простор, при што облакот од точки станува примарен носител на „реалната состојба“ на терен (Vosselman & Maas, 2010). Во таа насока, Gjorgjiev et al. (2019) покажуваат дека преминот од облак од точки кон 3Д модел на објект најчесто се реализира преку комбинација од автоматски и полуавтоматски постапки, при што клучна улога има претходната класификација на точките и екстракцијата на карактеристични рамнински површини. Нивните резултати укажуваат дека автоматското моделирање може успешно да генерира модели на пониски нивоа на деталност (LOD1 и LOD2), додека за повисоки нивоа на деталност е потребна дополнителна полуавтоматска или рачна интервенција, особено кога треба да се реконструираат покомлексни кровни и фасадни елементи. Ова е важно за BIM–GIS контекстот, бидејќи јасно покажува дека употребливоста на облакот од точки не зависи само од неговата густина, туку и од квалитетот на обработката, степенот на автоматизација и целното ниво на семантичка и геометриска разработка на моделот.

Во литературата за Scan-to-BIM се потенцира дека облакот од точки не е „готов модел“, туку суров просторен запис кој мора да помине низ обработка за да стане употреблив за параметарско моделирање и за просторни бази на податоци. Tang et al. (2010) и Bosché (2012) истакнуваат дека точноста и употребливоста на BIM моделите генерирани од облаци од точки зависат од клучни технички чекори: филтрирање на шум, регистрација и усогласување на скенови, геореференцирање, како и сегментација и класификација на точки во структурни и архитектонски елементи. Регистрацијата и контролата на грешките се критични за да се избегне „локално точен, глобално

неконзистентен“ модел, додека сегментацијата е основа за полуавтоматско или автоматско препознавање на сидови, плочи, греди, отвори и инсталации. Токму тука се појавува и јазот меѓу геометријата и семантиката: облакот од точки е геометриски богат, но семантички „нем“, па трансформацијата во BIM бара методи за препознавање, правила и често рачна експертиза, особено за објекти со сложена конструкција или оштетувања и деформации (Tang et al., 2010; Bosché, 2012).

Во поновите истражувања се забележува тренд кон зголемена автоматизација преку машинско учење и робусни алгоритми за препознавање на елементи, но и кон појасно дефинирање на критериуми за квалитет во зависност од намената. За инженерско одржување може да се толерира одредено ниво на генерализација, додека за катастарски и правно-регистрациски сценарија се бара повисока геометриска точност, конзистентни волумени, недвосмислени граници и стабилна врска со координатен референтен систем. Во истражувањата за Scan-to-BIM се укажува дека практичната употребливост зависи и од тоа колку добро е управувана „врската“ меѓу деталниот модел и реалниот простор: метаподатоци за точност, контрола на систематски грешки и документирана процедура за геореференцирање, што е особено важно кога моделот се интегрира во GIS и се поврзува со парцели, инфраструктура и административни единици.

Конечната вредност за BIM-GIS интеграција се постигнува кога резултатите од Scan-to-BIM процесот не завршуваат како изолиран BIM, туку се „вградуваат“ во просторни бази на податоци и сервиси. Интегрирани рамки како оние дискутирани од Zhu & Wu (2022) комбинираат LiDAR податоци со BIM елементи за автоматизирана сегментација, извлекување објекти и нивно организирање во GIS слоеви, што овозможува создавање просторна база на податоци на недвижности со богата семантика. Во таков работен тек, облакот од точки служи како геометриска основа, BIM како носител на детални атрибути и структури (елементи, простори, нивоа), а GIS како платформа за геореференцирано складирање, анализа и поврзување со правно-административни податоци, особено релевантно за 3Д катастар, каде што просторната конзистентност и можноста за проверка на преклопувања и граници се клучни. Така, сензорските технологии не се само „метод на снимање“, туку функционален темел на целокупната трансформација: од реалност → дигитален модел → просторна база → управување и сервисна политика со недвижностите.

Една од најзначајните и најчесто дискутирани примени на интегрираните BIM-GIS системи е 3Д катастарот, бидејќи токму тука се среќаваат инженерската прецизност и правно-административната потреба од јасно дефинирање на просторните единици. За разлика од традиционалниот 2Д катастар, каде што границите се прикажуваат во рамнина, 3Д катастарот овозможува волуменско претставување на недвижностите, нивните меѓусебни односи, како и регистрирање на сложени ситуации како подземни гаражи, надземни конзоли над јавни површини или објекти со повеќе функционални целини во ист волумен. Во овој контекст, интегрираниот BIM-GIS пристап не се сведува само на 3Д визуелизација, туку создава основа за правно недвосмислено моделирање на границите на сопственост и на поврзаните права врз недвижностите.

Истражувањата на Stoter et al. (2011, 2017) и Shojaei et al. (2015) ја истакнуваат потребата 3Д катастарските единици да се моделираат како конзистентни просторни тела (затворени полиедри) кои можат да се валидираат тополошки и да се анализираат просторно во GIS. Во таа насока, CityGML се препознава како корисен стандард за репрезентација на физичката околина на урбано ниво, додека BIM (преку IFC) обезбедува

детална геометрија и семантика на објектот (градежни елементи, катови, простории). Истражувањата за 3Д модели на урбани средини и нивните апликации дополнително покажуваат дека семантички структуриран 3Д модел е клучен за урбани анализи и управување со недвижности, но дека за катастарски цели често е неопходно дополнително „приближување“ кон правната логика преку модели како LADM (Biljecki et al., 2018).

Во таа насока, LADM (ISO 19152) се наметнува како централна концептуална рамка за поврзување на физичкиот простор со правните односи. Важноста на LADM во BIM-GIS контекст е што овозможува формално раздвојување меѓу физичката репрезентација на објектот и правната дефиниција на единиците што се предмет на регистрација. На пример, простор „стан“ во BIM може геометриски да се добие од просториите и границите, но неговото правно значење и врска со сопственик, право на сопственост или ограничување на правото се моделира преку LADM, а не преку BIM логиката.

Во современите истражувања, тренд е комбинирање на LADM со CityGML и IFC како начин да се изгради целосен 3Д катастарски информациски систем. Истражувањата на Atazadeh et al. (2017) и Kalogianni et al. (2020) покажуваат дека ваквото поврзување најчесто се реализира преку мапирање на BIM објекти (на пр. катови, простории, граници) кон правни просторни единици во LADM и нивна репрезентација, контекстуализација во GIS. Овој пристап е особено релевантен затоа што овозможува 3Д катастарот да биде истовремено правно ориентиран (LADM) и просторно-аналитички употреблив (GIS), а BIM да остане извор на детална *as-built* геометрија кога тоа е потребно за валидација и одржување на моделот. Во таа насока, Petronijević et al. (2021), го разгледуваат BIM моделот во IFC формат, како директен извор на податоци за LADM базиран 3Д катастар. Авторите предлагаат проширување на IFC стандардот со цел поексплицитно да се вклучат правно релевантни просторни единици, односно *legal spaces*, што овозможува подобро усогласување меѓу физичката геометрија на објектот и правната геометрија потребна за регистрација. Ваквиот пристап е особено важен бидејќи го поместува фокусот од едноставна интероперабилност меѓу формати кон вистинска хармонизација меѓу BIM и 3Д катастарските системи, со поефикасен пренос на *as-built* податоци, појасна репрезентација на правните граници и попрактична врска меѓу IFC и LADM стандардите.

Во современата литература веќе е јасно видлива истражувачка линија што ја поврзува аквизицијата на просторни податоци со ласерското скенирање, формирање на BIM модели, нивната интеграција во GIS и понатамошната примена во 3Д катастар. Во таа насока, трудовите на Pere et al. (2021) ја обработуваат Scan-to-BIM во 3Д GIS логиката врз основа на терестричко ласерско скенирање и фотограметрија, Sun et al. (2019) предлагаат рамка за поврзување на BIM, GIS и LADM за репрезентација и визуелизација на 3Д катастарски граници, Hajji et al. (2021) развиваат интегриран BIM-GIS пристап за 3Д катастар, Alattas et al. (2021) покажуваат како просторите од BIM (IFC) може да се пресликаат во LADM за правно значајни единици, Rashidan et al. (2021) разработуваат конверзија од BIM кон CityGML за 3Д катастарски цели, а Grzelka et al. (2024) демонстрираат дека ласерското скенирање и техничката документација може да се спојат во BIM модел што служи како основа за регистрација на 3Д катастарски единици. Колективно, овие трудови покажуваат дека најперспективниот правец не е изолирана конверзија меѓу формати, туку воспоставување на работен тек во кој геометријата, семантиката, просторната референца и правните атрибути се поврзуваат во единствен дигитален систем.

Од првите концептуални трудови за BIM и GIS до денес, научноистражувачката заедница изгради солидна теоретска и технолошка основа за нивна интеграција во кохерентен информациски систем. Напредокот е овозможен преку стандардизацијата на доменските модели и шеми, како и преку развојот на сензорски технологии и методи за аквизиција на реалната состојба (TLS, UAV-LiDAR, SLAM), кои обезбедуваат прецизна геометриска основа за *as-built* моделирање и понатамошна просторна анализа. Паралелно, се развиени модели и методологии за интероперабилност (шематско мапирање, процеси и механизми за трансформација, ISO и OGC стандарди), кои покажуваат дека интеграцијата е остварлива, но бара систематски пристап и јасно дефинирани правила за мапирање и управување со нивото на деталност.

Сепак, и покрај значајниот број трудови и демонстративни прототипи, литературата укажува дека постои јаз меѓу научните решенија и нивната стабилна примена во институционални системи, особено кога целта е правно и катастарски релевантно моделирање. Во тој поглед, како едни од најголемите предизвици за истражување остануваат континуирано и проверливо геореференцирање на BIM моделите, тополошки валидни 3Д тела погодни за катастарска регистрација, доследно мапирање на семантиката од инженерски кон правно-административен контекст и воспоставување работен тек кој е репродуктивен од аквизиција до просторна база на податоци и катастарска примена. Во пракса, токму овие точки често се третираат фрагментарно: едни студии се фокусираат на скенирање и облаци од точки, други на Scan-to-BIM процесот, трети на конверзија на BIM во GIS, четврти на LADM моделирање, без целосно интегриран и валидиран „од почеток до крај“ процес.

Оттука, научниот придонес на оваа дисертација се препознава низ: **воспоставената и аргументираната соопштава методологија за интеграција на BIM и GIS како основа за ефикасна сервисна политика со недвижности.** Во оформената и предложената методолошка конструкција, просторните податоци како физичка интерпретација на реалните просторни настани се одредени со примена на LiDAR и SLAM, обработени до геометриски конзистентен *as-built* модел, структурирани во BIM, трансформирани и организирани во GIS, како и процесни ангажмани за поврзување со правниот слој на управување со недвижности преку LADM. По основ на овие ангажмани, методолошката конструкција прифаќа и укажува дека интеграцијата не се третира како еднократна конверзија, туку како репродуктивен работен тек со јасни правила за квалитет, интероперабилност и правна употребливост. Во контекст на *smart city* и *digital twin* иницијативите, ваквиот пристап претставува **неопходна основа за одржливо управување, транспарентна регистрација и дигитално сервисан систем на недвижности, што ја оправдува актуелноста и применливоста на само то истражување.**

2. ТЕОРЕТСКА ОСНОВА НА BIM И GIS ТЕХНОЛОГИИТЕ

BIM и GIS се моќни технологии кои нудат различни, но комплементарни способности, бидејќи го опишуваат истиот реален свет преку две различни податочни и концептуални призми. **BIM се еџаблира како џрисџај за креирање, уџравување, извлекување и сџоделување информации за џградбиџе џо меџу засеџнаџиџе сџирани низ целиџот живоџен циклус на објекџиџи**, при што 3Д геометријата е тесно поврзана со атрибутните и семантичките информации за конструктивните елементи, материјалите, фазите и техничките својства. Во таа смисла, BIM често се опишува како најсеопфатен и „интелигентен“ 3Д дигитален пристап за управување со комплексни објекти, кој обезбедува работа во заедничка податочна средина и создавање конзистентен модел што може да се користи за координација, верификација и одржување на изградената средина (Sacks et al., 2018; ISO 19650-1:2018). Од друга страна, **GIS е сисџем дизајниран за складирање, визуелизација, џроверка и џоџврднување, маниџулација, обрабоџка, инџеџрирање и анализирање на џросџорни и аџрибуџџни џодаџиџи, со цел извлекување заклучоџи и џоддршка на џросџорни одлуџи**. Неговата предност произлегува од коегзистенцијата на два типа податоци, просторни и атрибутни, што овозможува ефикасна просторна анализа: идентификација на проблеми, следење промени, прогнозирање, препознавање трендови и управување со настани во просторот, од локално до глобално ниво (Longley et al., 2015). На овој начин, додека BIM тежее кон детална, објектно-ориентирана репрезентација на поединечни градби и нивните компоненти, GIS обезбедува просторен контекст и аналитичка рамка за поврзување на објектите со нивната околина и со пошироки просторни процеси.

Токму комплементарноста, односно деталната „внатрешна“ логика на објектот во BIM и „надворешниот“ просторен контекст и аналитичкиот потенцијал на GIS, ја прави интеграцијата концептуално привлечна и практично значајна. Сепак, оваа интеграција останува методолошки и технички предизвик, бидејќи двата домена се развиени врз различни основи: различни модели на податоци (објектно-ориентирани наспроти просторни), различни геометриски репрезентации и нивоа на генерализација, различни координатни и референтни поставки, како и различни стандарди и формати за размена. Оттука, ефективното поврзување бара јасно дефинирани правила за поврзување на семантиката и геометријата, усогласување на резолуцијата и нивоата на деталност, како и воспоставување интероперабилни работни текови што ќе ја зачуваат податочната целовитост и значењето на двата домена.

2.1. BIM (Building Information Modelling)

Building Information Modelling (BIM) претставува современа дигитална методологија за креирање, структурирање и управување со информации за објектите низ целиот животен циклус, од концепт и проектирање, преку изведба, до одржување и адаптација. Во суштина, BIM се темели на објектно-ориентирано моделирање каде што 3Д геометријата е нераздвојно поврзана со семантички и атрибутни податоци (материјали, функции, класи, односи, параметри), при што моделот функционира како централизирана и конзистентна информациска основа за координација и донесување одлуки (Succar, 2009; Sacks et al., 2018; Azhar, 2011).

Во рамките на меѓународната стандардизација, BIM се поставува како системски пристап кон организациско и техничко управување со информации, при што серијата ISO 19650 ја нагласува потребата информациите да се разменуваат, управуваат преку верзии, евидентираат и организираат во контролирана рамка, со јасно дефинирани улоги и одговорности во процесот на информациско управување (ISO 19650-1:2018). Воедно, овој пристап се потпира и на примена на отворени стандарди за да се обезбеди интероперабилна размена и долгорочна достапност на податоците меѓу различни софтверски околии, при што особено значење има IFC како отворена податочна шема (ISO 16739-1:2024; buildingSMART International, n.d.).

Широко прифатена е дефиниција во рамки на National BIM Standard–United States (NBIMS-US), каде BIM се опишува како дигитална репрезентација на физички и функционални карактеристики која служи како заеднички извор на знаење и основа за одлуки низ животниот циклус (NIBS, 2015). Оваа поставеност директно ја потенцира улогата на BIM како *shared knowledge resource*, односно како средина што поддржува мултидисциплинарна соработка и континуитет на информации.

Во суштина, BIM функционира како интелигентен дигитален модел со висока информациска содржина, во кој градежните елементи се претставени како објекти со јасно дефинирана геометрија, својства, меѓусебни врски и параметри релевантни за нивната употреба и одржување. Токму објектно-ориентираната природа на BIM моделите овозможува промените да се управуваат внатре во самиот модел и да се рефлектираат конзистентно низ зависните извештаи, пресметки и документација за изведба, со што се намалуваат вообичаените неусогласености што се јавуваат кај традиционалните 2Д и CAD работни процеси (Azhar, 2011; Sacks et al., 2018).

2.1.1. Основни принципи на BIM

Основните принципи на BIM ја дефинираат неговата улога како интелигентен, објектно-ориентиран и податочно богат дигитален систем што обезбедува конзистентно моделирање, управување и размена на информации низ целиот животен циклус на објектот. Тие принципи го разликуваат BIM од традиционалните 2Д и CAD пристапи, овозможувајќи повисоко ниво на прецизност, координација и интероперабилност во АЕС индустријата. Основните принципи кои ја формираат теоретската и практичната рамка на BIM може да се дефинираат како:

- параметарско и интелигентно тридимензионално моделирање,
- интегрирана и централизирана база на податоци,
- мултидисциплинарна соработка и интегрирани работни текови,
- структурирани податоци и интероперабилност,
- поддршка на целиот животен циклус на објектот.

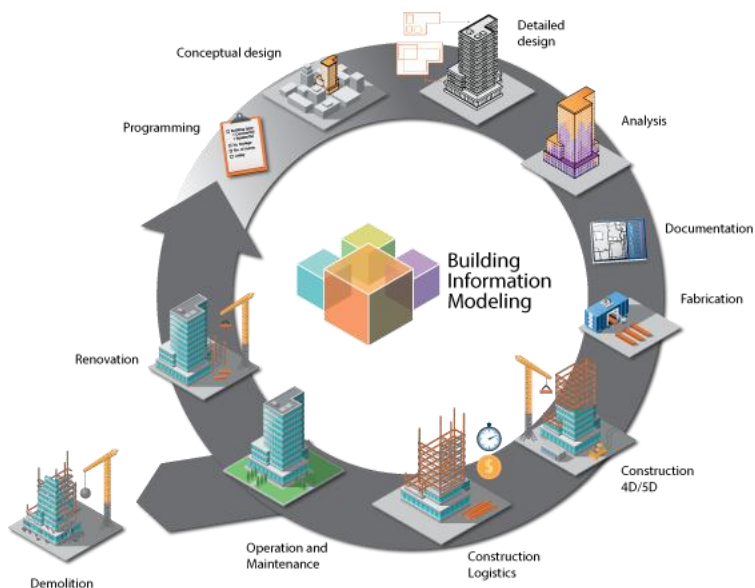
Параметарското и објектно-ориентираното моделирање ја претставува основата на BIM, а се однесува на тоа што секоја компонента на еден објект наместо со независни линии и површини е претставена како интелигентен објект со геометриски, материјални и функционални својства, како и релации со другите елементи. Параметрите и логичките правила овозможуваат автоматско ажурирање на моделите, што значи дека промените во еден елемент конзистентно се рефлектираат во поврзаните прикази, пресметки и документација, намалувајќи ја на тој начин веројатноста за недоследности и грешки

карактеристични за традиционалните CAD процеси. Ваквото параметарско моделирање го претвора BIM моделот во динамички ажурирана структура (Sacks et al., 2018).

Структурираноста на податоците и интероперабилноста се однесуваат на можноста BIM информациите да бидат јасно организирани, машински читливи и употребливи во различни дигитални околии. Во таа насока, BIM се потпира на стандарди и спецификации што овозможуваат податоците да се разменуваат и повторно да се користат без целосна зависност од една софтверска околина. Притоа, клучна улога има IFC како отворен меѓународен стандард за размена на BIM податоци меѓу различни платформи (ISO, 2024; buildingSMART International, n.d.). Стандардизацијата сама по себе не гарантира целосно непрекорна интеграција, но претставува суштинска основа за поширока и поконзистентна примена на BIM податоците.

Централизираното управување со податоците се заснова на принципот сите релевантни податоци за објектот да се одржуваат во единствен, валиден и контролирано управуван извор, познат како Single Source of Truth (SSOT). Со тоа се намалува фрагментираноста на податоците, карактеристична за традиционалните системи и се овозможува поконзистентно ажурирање, полесна координација меѓу учесниците и поголема сигурност во користењето на информациите.

Мултидисциплинарната соработка и интегрираните работни текови претставуваат еден од клучните принципи што ја опишува координираната работа на различните дисциплини врз заеднички модел и конзистентен сет на податоци, наместо врз раздвоени и често неконзистентни документи (ISO 19650-1:2018). Во таква поставеност, прегледот и измените на моделот се изведуваат усогласено и последователно, со што се подобрува квалитетот на проектната документација (Sacks et al., 2018).



Слика 2.1. BIM во сите фази од животниот циклус на објектот

Последниот принцип, поддршка на целиот животен циклус на објектот, укажува дека BIM не се ограничува само на фазата проектирање, туку има поширока улога, која се гледа преку обезбедување континуитет и доследност на информациите од раните концептуални фази, преку изведба, па сè до експлоатација и одржување на објектот (ISO

19650-1:2018; Sacks et al., 2018). Во пракса ова често се поврзува со т.н. димензионални проширувања, односно надградување на 3Д моделот со дополнителни информациски слоеви поврзани со време, трошоци и други функционални показатели. Ова го прави BIM релевантен и за пошироки современи концепти како дигитални близнаци, интеграција со GIS и подготовка на структурирани податоци погодни за 3Д катастарски сценарија.

2.1.2. Архитектура и структура на BIM

Архитектурата и структурата на BIM го определуваат начинот на кој дигиталниот модел е системски организиран како единствена и интегрирана целина. Во ова поглавје, архитектурата на BIM се разгледува низ повеќеслојна рамка што ги опфаќа просторната, информациската, податочната, моделската, семантичката и процесната архитектура.

Просторната архитектура ја дефинира хиерархиската организација на BIM моделот (Project-Site-Building-Storey-Space) со што се создава структуриран просторен контекст за поставување и поврзување на елементите. Оваа хиерархија обезбедува стабилна просторна логика, но е значајна и како предуслов за поврзување со надворешни просторни системи, особено при BIM-GIS интеграција и 3Д сценарија (buildingSMART International, n.d.; El-Mekawy et al., 2012; Noardo et al., 2020).

Информациската архитектура се однесува на тоа како се организира, управува и дистрибуира информацијата поврзана со моделот и соодветната документација, така што податоците да бидат конзистентни, да може да се проверуваат и да бидат достапни за сите учесници во проектот. Овде, клучен е концептот Single Source of Truth (SSOT), односно проектот се потпира на еден валиден и контролирано одржуван извор на информации. Практично, ова најчесто се реализира преку воспоставување на Common Data Environment (CDE), што во ISO 19650 се дефинира како основа за контролирано управување со информациите и следење на нивните промени и статус низ проектниот и оперативниот циклус (ISO 19650-1:2018). Ваквото управување со информациите директно влијае и на интероперабилноста во следните фази, вклучително и на BIM-GIS работните текови, бидејќи квалитетот на генерираните излезни податоци и конзистентноста на доставените податочни сетови во голема мера го одредуваат успехот на понатамошната интеграција (Floros et al., 2020).

Податочната архитектура на BIM се однесува на начинот на кој информациите во моделот се организираат, структурираат и меѓусебно поврзуваат, така што секој елемент е дефиниран не само преку геометријата, туку и преку атрибути, својства и релации. Во таа смисла, BIM не претставува само визуелен 3Д приказ, туку формализиран податочен систем во кој објектите се вклучени во јасна и конзистентна информациска структура. Ваквата структура се воспоставува преку формални стандарди за моделирање, при што особено значење има Industry Foundation Classes (IFC) како отворен и неутрален стандард што овозможува размена на BIM информации независно од конкретен софтвер и имплементација (ISO 16739-1:2024). Истовремено, податочната архитектура се надополнува со спецификации и класификациски системи што обезбедуваат стандардизирано именување и поефикасно управување со информациите. Квалитетно дефинираната податочна архитектура директно ја определува употребливоста на моделот надвор од авторската средина и неговиот потенцијал за интеграција со други податочни околин.

Моделската архитектура се однесува на внатрешната логика на BIM моделот, односно на правилата и зависностите според кои тој се формира, организира и ажурира.

За разлика од податочната архитектура, која е насочена кон структурата и управувањето со информациите, моделската архитектура ја објаснува организацијата на елементите, нивната меѓусебна поврзаност и логиката преку која промените се пренесуваат конзистентно низ целиот модел.

Семантичката архитектура се однесува на значењето на елементите во BIM моделот, односно на начинот на кој тие се дефинираат како објекти со свои класи, атрибути, својства и правила (Succar, 2009; Sacks et al., 2018). За разлика од моделската архитектура, која ја опишува внатрешната логика на моделот, семантичката архитектура објаснува што претставува објектот, која е неговата улога и како треба да се интерпретира во инженерски контекст. Во оваа рамка спаѓаат сетови на својства, материјали, функционални параметри и класификациски структури што овозможуваат конзистентно организирање на информациите. На тој начин, геометријата не останува само визуелна форма, туку станува носител на значење, што овозможува пребарување, филтрирање, автоматска проверка и посигурна размена на податоци меѓу различни платформи (Solihin & Eastman, 2015).

Процесната архитектура се однесува на организацијата на активностите и размената на информации околу BIM моделот, од негово создавање и координација, до ревизија, одобрување, предавање и одржување. Таа ја дефинира оперативната рамка на проектот, односно улогите, чекорите и правилата според кои информациите се создаваат, проверуваат и користат. Во оваа рамка спаѓаат управувањето со информации, координацијата меѓу дисциплините, ревизијата и валидацијата на податоците, управувањето со верзии, како и поврзувањето со пошироки процеси (ISO 19650-1:2018; Sacks et al., 2018). На тој начин, BIM станува контролирана средина во која секој чекор, од првичен концепт до *as-built*, е проследен, транспарентен и усогласен со дефинираните правила.

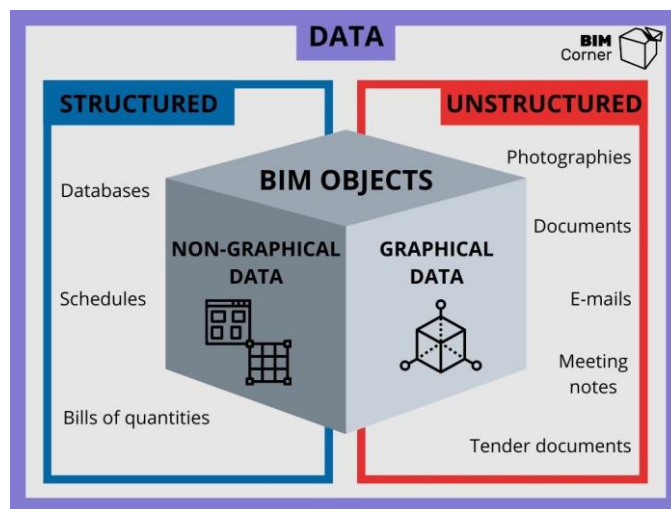
Со тоа, BIM архитектурата се потврдува како суштинска основа за структурирано, координирано и доверливо управување со податоците за објектот, при што различните елементи, процеси и учесници се поврзуваат во единствена и конзистентна рамка што го поддржува целиот негов животен циклус.

2.1.3. Типови на податоци во BIM

BIM претставува интегрирана дигитална репрезентација што комбинира различни типови на податоци за да ја опише геометријата, семантиката и употребливоста на објектот низ целиот животен циклус. Суштинска предност на BIM моделот е што не е само визуелен приказ, туку централен информациски ресурс што може да се надградува и користи од концепт, преку изведба, до експлоатација и одржување (Sacks et al., 2018; Azhar, 2011).

BIM податоците, најопшто може да се групираат како геометриски и негеометриски (атрибутни и семантички) податоци. Геометриските податоци ја претставуваат тридимензионалната форма на објектот и неговите елементи преку параметарска геометрија, координати и тополошки односи. Во интероперабилните работни текови тие често се пренесуваат и структурираат преку IFC како стандарден модел за размена (ISO 16739-1:2024). Тука спаѓаат параметарски модели на сидови, подови, столбови, кровни конструкции, отвори и инсталации. Негеометриските податоци, пак, ја збогатуваат информациската структура на BIM моделот, односно ја носат „смислата“ на

моделот, како што се материјали, технички параметри, класификации, податоци за функционалност, статуси и други својства што го прават моделот аналитички употреблив. Во пракса, овие негеометриски информации често се организираат како дополнителни информациски димензии (4Д–7Д).



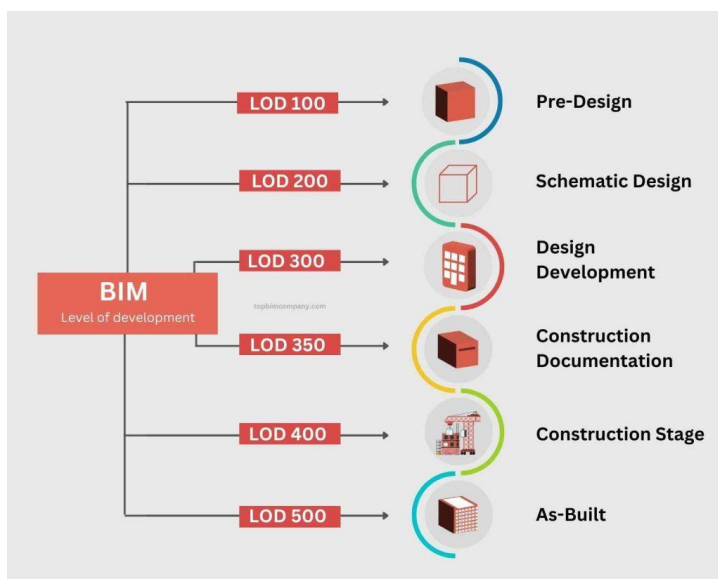
Слика 2.2. Типови на податоци во BIM

Сите овие типови на податоци уште се нарекуваат и структурирани податоци бидејќи имаат структура дефинирана преку стандарди што овозможува нивна конзистентност, интероперабилност и машинска читливост. За разлика од нив, BIM интегрира и податоци кои немаат строго дефинирана внатрешна структура, односно неструктурирани податоци. Во оваа група спаѓаат документи во PDF формат, спецификации, извештаи, фотографии, слики од терен, скенирани документи, текстуални белешки, кореспонденција и други придружни документи што го поддржуваат процесот на проектирање, координација и управување со проектот. Целата оваа документација и материјали најчесто се управуваат преку CDE и правила за верзии и статуси, како што е концептуално поставено во ISO 19650 (ISO 19650-1:2018).

Способноста за интегрирање на различни типови податоци претставува една од клучните предности на BIM моделот, кој истовремено функционира како геометриски опис, техничка документација и интелигентен информациски систем. Меѓутоа, квалитетот и употребливоста на моделот значително зависат од точноста и степенот на развиеност на неговите елементи во различните фази од проектниот циклус, поради што е потребно јасно да се дефинира нивното ниво на развиеност.

2.1.4. Ниво на развој во BIM (Level of Development - LOD)

Нивото на развој (Level of Development – LOD) претставува широко прифатена рамка со која се дефинира степенот на геометриска и информациска развиеност на BIM елементите низ различните фази од проектниот циклус. Преку оваа рамка се овозможува моделот да се структурира во јасно дефинирани нивоа на развиеност и да се воспостави заедничко, стандардизирано разбирање за тоа колку, во дадена фаза, елементите се геометриски прецизни, информациски комплетни и за кои задачи се применливи во процесот на проектирање, изградба и управување со објекти. LOD служи како референтна алатка за подобрување на комуникацијата меѓу учесниците, а со тоа и намалување на ризикот од меѓусебни недоразбирања.



Слика 2.3. Нивоа на развој (LOD) во BIM

Спецификацијата, постепениот развој на моделот од концептуална репрезентација до целосен *as-built* модел најчесто се организира преку нивоата LOD 100, 200, 300, 350, 400 и 500, при што со секое повисоко ниво се зголемува доверливоста на моделот и се проширува неговата примена.

LOD 100 – Ниво на прег-проект (Pre-Design)

LOD 100 е почетно ниво на кое елементите се прикажани со приближни параметри како површина, висина, волумен или симболички репрезентации без прецизна геометрија и димензии. Моделот служи за рани анализи на изводливоста, основни споредби и приближни процени. На ова ниво објектот е претставен како волумен што го дефинира габаритот и позицијата, без внатрешни компоненти.

LOD 200 – Ниво на идеен проект (Schematic Design)

На LOD 200 ниво елементите се моделирани со основни форми и приближни димензии, со толеранции и поедноставувања. Локацијата, ориентацијата и големината се приближно точни, а атрибутите се делумно пополнети (предложени материјали, типови, функционални класификации). На ова ниво ѕидовите и отворите се поставуваат приближно за да се провери организацијата на просторот и е соодветно за шематско планирање и рана координација.

LOD 300 – Ниво на основен проект (Design Development)

LOD 300 подразбира целосно дефинирана геометрија со точни димензии, позиција и ориентација, погодна за детални цртежи и инженерски пресметки. Атрибутните податоци се пополнети до степен што поддржува координација и проверки. На ова ниво архитектонските и MEP елементите се моделираат со реални димензии и точни материјали.

LOD 350 – Ниво на извезбен проект (Construction Documentation)

LOD 350 го надградува LOD 300 со информации што се клучни за практична интердисциплинарна координација. Покрај точната геометрија, елементите се

моделираат така што јасно се прикажуваат врските и местата на спојување со соседни системи и конструкции. На овој начин моделот станува погоден за идентификација на несогласувања (clash detection) и за проверка дали различните дисциплини се усогласени без преклопувања во реалните услови на изведба.

LOD 400 – Ниво на изведба (Construction Stage)

LOD 400 ги опишува елементите со детали потребни за изработка и монтажа, вклучувајќи производни спецификации, методи на вградување и информации за производители. Ова ниво типично се поврзува со изведбени работни текови и може да поддржи 4Д/5Д сценарија кога се користи за планирање и следење на изведбата (време/трошоци).

LOD 500 – Изведена состојба (As-Built Model)

LOD 500 претставува највисоко ниво на развиеност што ја рефлектира реално изградената состојба, проверена на терен преку мерења или ласерско скенирање. На ова ниво, моделот ги содржи сите релевантни атрибути, вклучувајќи податоци за гаранции, одржување и параметри за експлоатација. Геометријата и информациите во моделот се точни и финални, што го прави LOD 500 основа за одржување и долгорочно управување со објектот.

Во литературата и праксата, покрај терминот *as-built* често се среќава и терминот *as-is*. Иако двата поими се однесуваат на постојната состојба на објектот, *as-built* означува модел или документација што ја прикажува реално изведената состојба по завршување на градбата, со евидентирани отстапувања од проектот настанати во текот на изведбата. Наспроти тоа, *as-is* се однесува на состојбата во која објектот се наоѓа во моментот на снимање или анализа, без оглед дали таа состојба е изворно изведената или е резултат на подоцнежни измени, доградби, реконструкции или тековна употреба.

Од друга страна, покрај терминот ниво на развој (Level of Development – LOD), често се среќава и терминот ниво на деталност (Level of Detail – LOD). Тој се однесува на степенот на визуелна и графичка разработеност на моделот, односно на количината на графички детали како димензии, текстури, бои и други елементи на приказот.

Ваквото дефинирање на нивоата на развој е важно при интеграцијата на BIM и GIS домените, бидејќи во пракса токму моделите со повисоко ниво на развиеност, најчесто LOD 300 и повисоко, обезбедуваат доволно стабилна геометрија и семантичка структура за трансформација и употреба во просторни анализи. На тој начин, LOD функционира како техничка врска меѓу инженерскиот BIM модел и просторните модели, а во одредени сценарија и правно-административните системи (BIMForum, 2024; Noardo et al., 2020).

2.1.5. Ограничувања и предизвици на BIM

Иако BIM се препознава како пристап што овозможува подобра координација, поконзистентни проектни информации и поефикасно управување со податоците за објектите, неговата примена и понатаму е проследена со одредени ограничувања и предизвици. Еден од најчестите предизвици е интероперабилноста, односно можноста моделите и информациите да се разменуваат меѓу различни софтверски платформи без губење на геометрија, атрибути и релации. Во реални услови, токму при преносот на податоци често се појавуваат несогласувања, дуплирање на податоци или потреба од

дополнителни рачни корекции, што може да ја намали доверливоста на моделот и неговата употребливост во следните фази од животниот циклус на објектот. Затоа, иако BIM концептуално се заснова на интегрирана информациска околина, неговата практична ефикасност и понатаму зависи од квалитетот на стандардите, софтверската компатибилност и дисциплината во управувањето со податоците (Gallagher et al., 2004).

Покрај техничките ограничувања, значаен предизвик претставуваат и организациските аспекти на BIM имплементацијата. Во многу компании неговото воведување подразбира промена на веќе воспоставените работни процеси, дополнителна обука на кадарот, воведување нови улоги во тимовите и инвестиции во софтверска и хардверска инфраструктура. Притоа, отпорот кон промени, недостигот од обучен BIM кадар, ограничената свест за придобивките и високите почетни трошоци остануваат меѓу клучните причини поради кои BIM не се применува подеднакво успешно во сите средини.

Предизвици постојат и во доменот на правните и договорните прашања. Бидејќи BIM моделот најчесто се создава, надополнува и ажурира од повеќе учесници, неопходно е јасно да се утврди кој е одговорен за точноста и веродостојноста на податоците, кој има право да врши измени и каков е статусот на моделот во договорна и правна смисла. Оттука, успешната примена на BIM не зависи само од технолошката поддршка, туку и од постоењето на јасно дефинирани протоколи, процедури за контрола на верзии и соодветно уредена рамка на одговорности. Во спротивно, наместо да биде средство за подобра координација и управување, моделот може да стане извор на дополнителна неизвесност и потенцијални спорови (Alotaibi et al., 2024).

2.2. GIS (Geographic Information System)

Пронаоѓањето решенија и донесувањето одлуки поврзани со објектите и просторот претставува сериозен предизвик. Во секој момент на одредено подрачје се случуваат голем број активности и промени, при што најголем дел од нив можат да се лоцираат просторно. Ова го прави просторниот податок важен елемент во процесот на нивно опишување и анализа. Тоа подразбира обезбедување точни податоци за локацијата, големината и геометријата, но и за други непросторни (атрибутни) податоци, кои целосно ги опишуваат појавите и настаните. Колку сознанијата за просторните феномени се поголеми и поквалитетни, толку посигурни ќе бидат и одлуките кои ќе се донесуваат врз основа на податоците за нив (Burrough & McDonnell, 1998).

Денес, како никогаш претходно, потребата за информации е многу голема и континуирано расте, а паралелно со тоа се зголемува и обемот на податоци, а нивните извори стануваат сè поразновидни, од теренски мерења, сателитски и аерофотограметриски снимки, до LiDAR облаци од точки и други дигитални записи. Во вакви услови потребно е да се обезбеди тие да бидат конзистентни, споредливи, навремени и интерпретабилни, со јасно дефиниран квалитет, точност, прецизност, резолуција и со соодветни метаподатоци за нив. Практично, учесниците во процесите на планирање, проектирање, управување и надзор имаат потреба од околина што ќе овозможи интеграција на сите тие податоци и нивна брза трансформација во релевантни информации за да се поддржи донесувањето брзи и релевантни одлуки.

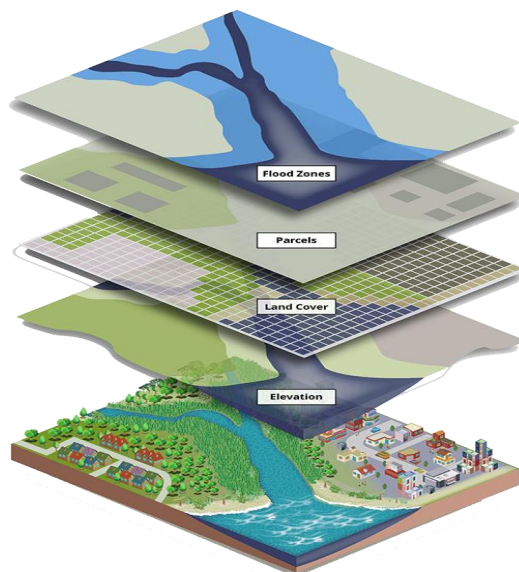
Во овие процеси, каде што просторниот податок е примарна рамка за разбирање и анализа, се позиционираат геоинформациските системи (GIS). Тие претставуваат

организиран систем кој овозможува прибирање, складирање, управување, обработка, анализа и визуелизација на геореференцирани податоци, при што просторната комјоненција е поврзана со атрибутивни описни податоци за целосно и функционално моделирање на реалните појави и процеси. Со тоа, GIS не се сведува само на графички приказ, туку претставува аналитичка платформа која овозможува систематско интерпретирање на просторот и идентификација на просторни структури, релации и зависности меѓу појавите.

2.2.1. Основни принципи на GIS

Основната идеја на GIS е дека реалните појави и објекти можат да се претстават како просторно референцирани податоци, поврзани со атрибутивни податоци што ги опишуваат нивните карактеристики. Оттука, примарен принцип во GIS е просторната димензија да се користи како основа за организирање и интерпретација на податоците, при што објектите се разгледуваат преку својата локација дефинирана со координати и преку просторни релации како близина, пресекување, содржаност и слично. Ваквиот пристап овозможува не само опишување на појавите, туку и нивно споредување и поврзување во контекст на околината во која се појавуваат (Longley et al., 2005).

Друг важен принцип е слоевитоста или тематска организација на просторните податоци. Во GIS, *реалноста се претставува преку повеќе тематски слоеви (парцели, објекти, нивниот, хидрографија)*, при што секој слој има сопствена геометрија и атрибутивни записи. Ваквиот начин на претставување ја олеснува интеграцијата на податоци од различни извори и нивното комбинирање за разни анализи.



Слика 2.4. Просторни податоци во GIS организирани во тематски слоеви

Начинот на претставување на реалноста е едно од суштинските прашања во GIS. Просторните појави не се внесуваат во системот во нивната непосредна реална сложеност, туку се моделираат преку формални податочни модели што овозможуваат нивно складирање, обработка и анализа. Најчесто тоа се растерски и векторски модели, а во 3Д контекст и специјализирани тридимензионални структури. Изборот на податочниот модел не е само техничко прашање, туку директно влијае врз начинот на кој појавите ќе

бидат опишани, кои просторни операции ќе можат да се изведуваат и колку добиените резултати ќе бидат соодветни за интерпретација на реалниот феномен.

За да можат податоците од различни просторни податочни модели коректно да се преклопуваат и споредуваат, тие мора недвосмислено да бидат позиционирани и поврзани со соодветен координатен референтен систем. Ова се обезбедува преку дефинирање на просторната референца и преку геореференцирање на податоците. Просторната референца означува дека на слојот му е експлицитно доделен координатен референтен систем со што координатите се интерпретираат конзистентно и се овозможува сигурна просторна усогласеност при комбинирање и анализа на различни извори на податоци. Усогласувањето на податоците во избраниот координатен референтен систем се постигнува преку процес на геореференцирање, односно преку доделување на соодветниот координатен систем, трансформации меѓу датуми и проекции, или преку употреба на контролни точки кога се работи со податоци без стабилна просторна референца. Во 3Д сценарија ова е уште поважно, бидејќи покрај хоризонталната компонента мора да се земе предвид и вертикалната референца, па несоодветно дефиниран координатен систем или висинска основа може да доведе до грешки, како што се поместување на објекти, искривување на површини или грешки во пресметувањата што директно ја нарушуваат просторната конзистентност и доверливоста на анализите (Longley et al., 2005; Huisman & de By, 2009).

Важен принцип на GIS е и зависноста од размерот и нивото на деталност. Во зависност од целта на анализата, просторниот опфат и расположливите податоци, истата појава може да биде прикажана и моделирана на различен начин па затоа деталноста секогаш треба да биде соодветна за намената. За таа цел, во GIS се применуваат пристапи на генерализација, поедноставување и усогласување на деталноста, со цел моделот да остане јасен и употреблив, а анализите да бидат реалистични и интерпретабилни во однос на избраното ниво на претставување.

Вредноста на GIS најдобро се гледа во можностите за просторна анализа, преку која геореференцираните податоци се трансформираат во информации што овозможуваат аргументирано заклучување и поддршка при донесување одлуки. Ова се реализира преку поставување просторни прашања и нивно формално решавање преку операции како просторни пребарувања, анализи за близина и преклопувања на слоеви. Доверливоста на ваквите резултати директно е условена од квалитетот на влезните податоци, нивната точност, ажурност, комплетност и просторна резолуција, кои мора да се земат предвид при толкувањето на добиените резултати. Затоа, метаподатоците, односно податоците за потекло, методи на прибирање и обработка, точност, временски опфат и ограничувања, се неопходни за правилно вреднување на податоците и за одговорна интерпретација на резултатите од просторната анализа. Покрај ова, важна е и тополошката конзистентност на податоците, односно зачувувањето на логичките односи меѓу објектите (поврзаност, коректна содржаност и избегнување невалидни преклопувања). Затоа, просторната анализа во GIS подразбира не само примена на аналитички операции, туку и проверка на структурната исправност на просторната репрезентација, како предуслов резултатите да бидат валидни и употребливи (Longley et al., 2005; Burrough & McDonnell, 1998).

Сите овие принципи заедно го издвојуваат GIS како систем кој ја организира реалноста преку просторната димензија, ја поврзува геометријата со атрибутите и овозможува резултати што може да се проверат и применат во голем број дисциплини од областа на планирање, управување и донесување одлуки. Ова го прави GIS интелигентна

алатка, која покрај тоа што овозможува прикажување на податоците, исто така помага тие да се разберат и да се користат во поширокиот просторен контекст.

2.2.2. Архитектура и структура на GIS

GIS претставува интегриран систем во кој просторните податоци, софтверските алатки, хардверската инфраструктура и човечките ресурси се организирани во единствена функционална целина со цел да овозможат ефикасно складирање, обработка, анализа и визуелизација на просторни податоци. Оттука, GIS не треба да се гледа само како збир на податоци и технички алатки, туку како системски уредена архитектура во која секоја компонента има јасно дефинирана улога и придонес во целокупното функционирање. Во анализата на неговата архитектура и структура особено е важно да се направи разграничување меѓу основните функционални слоеви, односно меѓу управувањето со податоците, нивната обработка и корисничката интеракција. Таквата организациска поставеност овозможува поголема прегледност на системот, полесно одржување, повисока функционална стабилност и подобри можности за интеграција со други информациски и аналитички околин.

Во рамки на оваа функционална организација, *податочниот слој* ја претставува основата на GIS, бидејќи во него се складираат, структурираат и управуваат просторните и атрибутните податоци што претставуваат основа за сите понатамошни анализи и визуелизации. Овој слој може да биде реализиран преку просторни бази на податоци, како geodatabase, PostGIS, Oracle Spatial, или преку стандардизирани формати на датотеки, како Shapefile и GeoPackage, при што обезбедува механизми за зачувување на интегритетот на податоците, оптимизирано пребарување и контрола на пристапот. *Апликациониот слој* ја има посредничката и извршната улога во системот, бидејќи во него се спроведуваат просторни анализи, операции за процесирање и проверки на валидноста и конзистентноста на податоците, а истовремено се обезбедуваат услуги преку кои различни корисници и апликации пристапуваат до податоците и резултатите од нивната обработка. *Презентациониот слој*, пак, овозможува непосредна интеракција со корисникот преку десктоп и веб апликации, како и преку алатки за 3Д визуелизација, со што сложените просторни податоци и аналитички резултати стануваат разбирливи, прегледни и практично применливи. Трите слоја заедно ја формираат функционалната основа на GIS, а нивната меѓусебна поврзаност овозможува системот да не се задржи само на складирање и приказ на просторни податоци, туку да поддржи и нивна аналитичка интерпретација и примена во процесите на планирање и донесување одлуки.

2.2.3. Типови на податоци во GIS

Податоците ја претставуваат основата на секој GIS систем, бидејќи токму преку нив се опишуваат просторните појави и односи што се предмет на анализа. Една од суштинските карактеристики на GIS е можноста за комбинирање и интегрирање на различни типови просторни податоци во единствена средина, при што различни извори и податочни модели можат заеднички да се користат за визуелизација и анализа. Разбирањето на типовите податоци во GIS е важно, бидејќи од нивната природа зависи како просторот ќе биде моделиран и на кој начин ќе се изведуваат просторните анализи.

Во таа смисла, GIS работи со различни типови податоци, при што најчесто се издвојуваат векторскиот и растерскиот податочен модел како две основни форми на претставување на просторната реалност. Покрај нив, современите GIS вклучуваат и други

форми на просторни податоци како што се облаците од точки, како и произведени просторни продукти што се добиваат преку обработка и трансформација на изворните информации (DEM, DTM, DSM, TIN, 3D објекти и воксели). Зависно од потребите на анализата и начинот на користење, се применуваат и податочни структури и формати за специјализирани задачи и визуелизација на големи тридимензионални сетови на податоци како што се 3D Tiles.

Векторскиот модел ги претставува појавите како дискретни објекти со јасно дефинирана геометрија, преку користење на точки, линии и полигони. Неговата предност е што овозможува границите и еднозначната идентификација на објектите, експлицитно да се дефинираат, при што секој објект е поврзан со атрибутна табела што ги содржи неговите описни карактеристики.

Растрскиот модел го претставува просторот како мрежа од ќелии (пиксели), при што секоја ќелија носи вредност што ја опишува појавата на таа локација. Овој пристап е соодветен за континуирани феномени како модели на висини, температури и слично, а неговата информативност и применливост директно зависат од просторната резолуција, односно од големината на ќелијата.

Површинските модели, односно модели на висини претставуваат висински репрезентации на теренот кои ја опишуваат распределбата на висината во просторот, најчесто како дигитални модели на висина (DEM, DTM, DSM) или како триангулацииска неправилна мрежа (TIN) и служат како основа за теренски анализи како наклон, експозиција и видливост и често служат како „просторна подлога“ за креирање на други слоеви.

Облакот од точки (Point cloud) претставува збир од голем број точки со 3D координати (Y, X, Z) придружени со дополнителни атрибути (интензитет, боја, класа). Во последните години, облаците од точки се наметнуваат како важен 3D просторен запис, бидејќи овозможуваат многу детален опис на објектите во урбаните средини и на тој начин поддржуваат напредни анализи.

3D просторните модели овозможуваат појавите да се прикажат со целосна тридимензионална геометрија, односно како реални 3D форми и волумени (3D објекти или воксели), а не само како површини. Тие се применуваат кога е потребно попрецизно да се опишат и анализираат сложени објекти и нивните просторни односи во урбани и инженерски сценарија.

Мрежните податоци претставуваат структурирани просторни податоци организирани како јазли и врски, кои ја моделираат поврзаноста на системи како патишта или инфраструктурни мрежи и овозможуваат анализи на планирање на траси, најкраток пат и сервисни зони.

Ваквата разновидност на формати на податоци што се користат во GIS овозможува, во зависност од целта на намената, појавите да се претстават со различен степен на геометриска и семантичка сложеност, поради што е важно да се знае на кое ниво на деталност е изработен и интерпретиран конкретниот податок.

2.2.4. Ниво на деталност (Level of Detail) во GIS

Претставувањето на реалноста во GIS, во зависност од целта на анализата и потребите на корисникот, може да се прилагодува. Ова значи дека истата појава може да се моделира со висок степен на сложеност и деталност, или, кога е доволно, да се генерализира и поедностави за поефикасна обработка и прегледност. Во овој контекст се применува принципот „соодветност за употреба“, при што не е пресудна максималната деталност, туку воспоставувањето соодветен баланс меѓу точноста, интерпретабилноста, обемот на податоци и перформансите на системот (Longley et al., 2005; Huisman & de By, 2009; van Oosterom, 2009).

Степенот на генерализација и информативност со кој е претставена една појава се опишува преку концептот ниво на деталност (Level of Detail – LOD). Нивото на деталност се однесува на нивото на апстракција во репрезентацијата на објектите и го определува обемот на геометриски и семантички информации што ќе се вклучат во моделот, за да се постигне соодветен компромис меѓу барањата на примената и ограничувањата во ресурсите.

За 3Д модели на урбани средини, широко е прифатена CityGML 2.0 шемата на нивоа на деталност, каде LOD се организирани во пет нивоа LOD0–LOD4, при што секое ниво претставува постепено збогатување на моделот од наједноставна просторна претстава до архитектонски и внатрешно структурирани модели:

- LOD0 е најосновното ниво на деталност и најчесто ги претставува објектите како 2Д/2.5Д основа, преку основата на објектот (footprint) на терен или контурата на покривот (roof edge). Ова ниво не опишува волумен, туку служи како почетна референца за брзи прегледи и основни просторни анализи, при премин од 2Д кон 3Д контекст,
- LOD1 (модел на блокови) ја надградува основната претстава преку додавање на висина на основата на објектот при што се добиваат поедноставени 3Д форми или блокови. Геометријата е грубо генерализирана (обично со рамна кровна површина), но е доволна за основни 3Д прегледи и приближни анализи како висина, волумен и засенчување на ниво на блокови,
- LOD2 го надградува претставувањето со блокови преку моделирање на покривот во генерализиран, но реалистичен облик. Во ова ниво, надворешната обвивка може да се организира по тематски површини (како кров и сидови), што го прави моделот погоден за анализи каде формата на покривот и фасадите има директно влијание, како што е процена на соларен потенцијал, засенчување, урбанистички проценки,
- LOD3 претставува значително подетална надворешна репрезентација на објектите, каде геометријата е поблиску до реалната архитектонска форма и се опфаќаат карактеристични фасадни елементи. Вообичаено, на ова ниво се моделираат и отвори како прозорци и врати, што овозможува попрецизни визуелизации и анализи кај кои деталите на обвивката влијаат врз резултатите (на пр. видливост, засенчување, симулации),
- LOD4 го надградува LOD3 нивото со вклучување на внатрешната структура на објектот, односно простории и елементи што ја опишуваат организацијата на

ентериерот. На овој начин, моделот не ја претставува само надворешната обвивка, туку овозможува и анализи поврзани со користење и управување со внатрешен простор.



Слика 2.5. Нивоа на деталност (LOD) во GIS (Извор: Biljecki et al., 2013)

CityGML 2.0 се смета за класична и широко прифатена рамка за 3Д моделирање на урбани средини, но овој пристап е дополнително развиен во поновата верзија на стандардот, CityGML 3.0. Во неа концептот на LOD е ревидиран со цел да обезбеди поголема флексибилност и подобра усогласеност со современите потреби за 3Д моделирање и размена на податоци. За разлика од CityGML 2.0, каде LOD4 се третира како посебно ниво за внатрешна репрезентација, CityGML 3.0 дефинира четири нивоа на деталност (LOD0–LOD3), при што и надворешните и внатрешните карактеристики може да се моделираат во рамки на тие нивоа, во зависност од конкретната намена (Open Geospatial Consortium, 2021). На тој начин, деталноста не се разгледува како строго фиксна шема, туку како структуриран и пофлексибилен збир на информации што може да варира во зависност од потребите.

2.2.5. Ограничувања и предизвици на GIS

И покрај тоа што GIS претставува моќна алатка за просторна анализа и управување со податоци, неговите технички ограничувања најчесто произлегуваат од квалитетот и структурата на самите просторни податоци. Просторните податоци секогаш претставуваат одредено поедноставување на реалниот свет, па точноста на анализите директно зависи од нивната точност, ажурност, целосност и меѓусебна усогласеност. Дополнителен предизвик претставува интеграцијата на податоци од различни извори, формати, координатни системи и нивоа на деталност, бидејќи во такви случаи често се потребни трансформации и семантички усогласувања што можат да доведат до губење на дел од информациите. Иако современите GIS платформи сè повеќе поддржуваат 3Д податоци, тие сè уште не се секогаш доволно прилагодени за претставување на високо детална геометрија и сложени односи кај објектите, какви што се среќаваат кај инженерските модели.

Покрај техничките аспекти, GIS има и изразени процесни ограничувања, бидејќи неговата ефикасна примена зависи од континуирано одржување на базите на податоци, јасно дефинирани процедури и координација меѓу институциите што ги создаваат, ажурираат и користат просторните податоци. Во пракса, слабостите често не произлегуваат од самиот систем или софтверска платформа, туку од неусогласени стандарди, различни методологии на прибирање податоци, ограничена размена на податоци и недоволно јасни правила за валидација и ажурирање. Затоа, GIS не треба да се гледа само како технолошка платформа, туку и како организациски систем чиј квалитет

зависи од политики, човечки ресурси, институционален капацитет и доследно управување со просторните податоци.

2.3. Споредбена анализа на BIM и GIS

BIM и GIS претставуваат две технолошки решенија што овозможуваат моделирање и управување со просторни податоци, при што геометриските и атрибутните податоци претставуваат основа за дигитална репрезентација на објектите и просторот. Иако и двете технологии се базираат на просторни податоци, тие се развиени за различни цели, што резултира со разлики во концептуалната рамка, моделите на податоци, методите на репрезентација и нивната примена. Поради тоа, нивната споредба е најсоодветно да се разгледува од повеќе аспекти, со што се создава добра основа за разбирање на нивната комплементарност, но и на предизвиците што се појавуваат при самата BIM-GIS интеграција. Со цел систематско прикажување на разликите помеѓу BIM и GIS, Табела 2.1 ја презентира нивната споредбена анализа во однос на повеќе аспекти.

Табела 2.1. Споредбена анализа на BIM и GIS

Аспект на споредба	BIM	GIS
Концептуална рамка	Објектно ориентиран систем за параметарско моделирање на градежни објекти и нивните составни елементи	Просторно ориентиран систем за управување и анализа на геореференцирани податоци во поширок просторен контекст
Основна ориентација	Детално моделирање на објектот	Анализа на објектот во поширок просторен контекст
Модел на податоци	Објектно-ориентиран модел со јасна хиерархија и релации помеѓу елементите	Модел заснован на просторни ентитети, тематски слоеви и атрибутни табели
Геометриска репрезентација	Параметарска геометрија со висока геометриска точност и конструктивна логика	Точки, линии, површини и 3Д елементи оптимизирани за просторна анализа и репрезентација на објекти во просторот
Семантичка структура	Семантиката е интегрален дел од објектниот модел преку параметри, својства и релации	Семантиката е организирана преку атрибутни табели поврзани со објектите во просторот
Ниво на развиеност/деталност	Високо ниво на развиеност и информациска сигурност	Прилагодливо ниво на деталност и просторна генерализација
Просторна референца	Најчесто локален координатен систем, ориентиран кон внатрешна точност на моделот	Геореференциран координатен систем, ориентиран кон поширок просторен контекст
Стандарди и формати	IFC, RVT, COBie	CityGML, GML, GeoPackage, Geodatabase
Домен на примена	Проектирање, координација, изведба и управување со објекти	Управување со недвижности и простор, управување со инфраструктура, просторно планирање, просторна анализа, мониторинг и поддршка при донесување одлуки

Најосновната споредба меѓу двете технологии може да се постави врз основа на нивната концептуална ориентација, бидејќи со тоа најјасно се гледа разликата во начинот на кој BIM и GIS го разбираат и моделираат просторот. BIM е првенствено насочен кон објектот, односно кон неговата внатрешна структура, составни елементи, материјали и функционални односи, со цел да обезбеди детален и информативно богат модел на градежниот објект. Наспроти тоа, GIS е ориентиран кон поширокиот просторен контекст, односно кон локацијата, распоредот, меѓусебните просторни односи и анализата на објектите и просторните појави во рамки на одредена територија. Оттука, може да се каже дека BIM го третира просторот како составен дел од објектот, додека GIS го разгледува објектот како елемент позициониран во поширок простор. Ваквите концептуални разлики меѓу двете технологии директно се одразуваат врз нивната структура, начинот на репрезентација на податоците и областите на примена.

Концептуалните разлики се одразуваат и во податочните модели и логиката на организација на двата системи. BIM се заснова на објектно-ориентиран пристап, при што секој елемент од објектот се третира како посебен ентитет со свои својства и односи. GIS, пак, го претставува просторот преку просторни ентитети и атрибути, со акцент на нивната локација, просторните односи и анализата во поширок контекст. Токму овие разлики претставуваат една од главните причини поради кои интеграцијата меѓу BIM и GIS бара дополнително усогласување на податочните структури и семантиката (Noardo et al., 2020).

Разликите меѓу BIM и GIS се согледуваат и во геометриската репрезентација, бидејќи начинот на моделирање на објектите е директно поврзан со концептуалната основа и со податочниот модел на двата системи. Во BIM, геометријата е развиена со висок степен на деталност и е тесно поврзана со конструктивната и функционалната логика на објектот, така што секој елемент има јасно определена форма, димензии, улога и место во рамки на целината. Наспроти тоа, во GIS геометриската репрезентација е погенерализирана и е приспособена на размерот, намената на анализата и потребата од поширок просторен контекст (El-Mekawy et al., 2012; Liu et al., 2017).

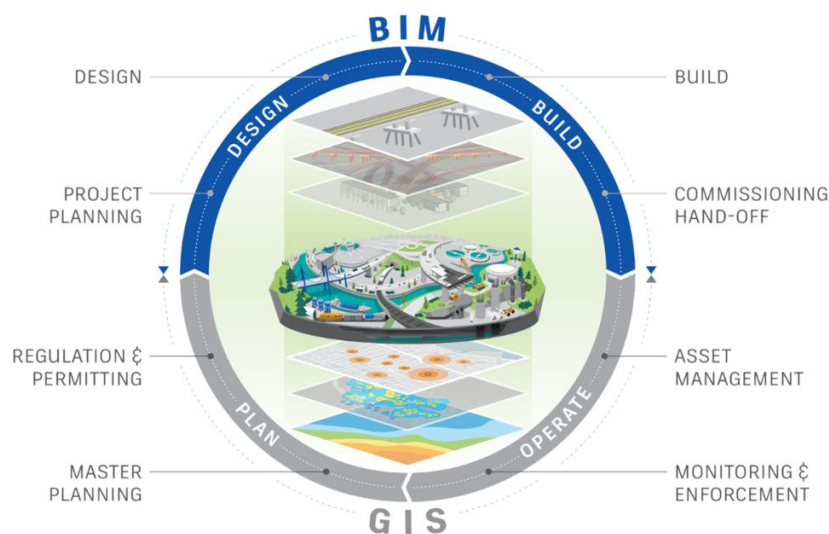
Подеднакво значајни се и разликите во семантичката репрезентација, односно во начинот на кој се дефинираат, организираат и толкуваат својствата, значењето и релациите на објектите. Иако и двата системи користат атрибутни податоци за опис на објектите, нивниот пристап кон семантиката суштински се разликува. Во BIM, семантиката е составен дел од самиот модел, при што секој градежен елемент се третира како посебен ентитет со сопствени параметри, својства и релации со другите објекти во моделот, кои ја одразуваат неговата конструктивна, техничка и функционална улога. Во GIS, семантиката најчесто се организира преку просторни слоеви, класи и атрибутни табели, при што акцентот е ставен на класификацијата на просторните појави, нивната локација и нивните меѓусебни односи во поширок просторен контекст.

Степенот на геометриска и семантичка разработеност на моделите во BIM и GIS често се објаснува преку поимите нивото на развиеност (BIM), односно ниво на деталност (GIS). Иако во двата домени се користи истата кратенка, нивното значење, примена и терминологија се разликуваат. Во BIM, LOD најчесто означува Level of Development и го изразува степенот до кој елементите во моделот се разработени, позиционирани и информациски доверливи за конкретна фаза од животниот циклус на објектот. Во GIS, особено во контекст на 3D модели на урбани средини, LOD се однесува на Level of Detail и го опишува степенот на геометриска и семантичка генерализација на просторните објекти, зависно од размерот и целта на анализата. Оттука, LOD во BIM се поврзани со

развиеноста и доверливоста на моделот, додека во GIS пред сè со нивото на апстракција и просторната применливост на репрезентацијата (BIMForum, 2025; Biljecki et al., 2013; Open Geospatial Consortium [OGC], 2021).

Значајна разлика меѓу BIM и GIS се согледува и во просторната референца. Во GIS, геореференцирањето претставува основен предуслов, бидејќи просторните податоци мора да бидат поставени во јасно дефиниран координатен систем за да можат меѓусебно да се поврзуваат, споредуваат и анализираат во поширок просторен контекст. Кај BIM, моделот најчесто се развива во рамки на локален координатен систем, при што акцентот е ставен на внатрешната точност и на меѓусебната усогласеност на елементите во рамките на самиот објект. Поради тоа, при интеграција на BIM и GIS често е неопходно дополнително геореференцирање, трансформација и усогласување на координатните системи. Ова прашање има особено значење, бидејќи без прецизно просторно позиционирање не може сигурно да се обезбеди вклопување на BIM моделот во неговата реална локација и во пошироката просторна околина (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020).

Стандардите и форматите за размена на податоци имаат клучна улога во примената и интероперабилноста на BIM и GIS технологиите. Поради различните домени на примена, секоја технологија има сопствен сет на стандарди и формати, прилагодени на специфичните потреби на корисниците и типичните сценарија на употреба.



Слика 2.6. Интеграција на BIM и GIS низ животниот циклус на објектот

Анализата на BIM и GIS укажува дека овие два домена се засноваат на различни принципи на организација и интерпретација на просторните податоци, што произлегува од нивната различна доменска ориентација. Оваа разлика не претставува ограничување, туку создава основа за нивно заемно надополнување, при што деталноста на BIM и просторниот контекст на GIS обезбедуваат комплементарна основа за примена во сложени просторни и системи за администрирање со недвижностите и просторот. Нивната интеграција претставува основа за поефикасно планирање, подобро донесување одлуки и поодржливо управување со изградената средина, а истовремено ја нагласува потребата од систематско разгледување на интероперабилноста, стандардите и форматите за размена на податоци.

3. СТАНДАРДИ И ТЕХНИКИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА BIM И GIS

Интеграцијата помеѓу BIM и GIS претставува комплексен предизвик кој бара високо ниво на стандардизација, технолошка усогласеност и методолошка доследност. Двата домени користат различни модели на податоци, различни координатни системи и различни нивоа на деталност, што ја прави нивната интеграција отежната. Ова се должи на фактот што BIM и GIS традиционално се развиваат како два различни технолошки системи: BIM се фокусира на инженерските модели и конструкцијата, а GIS кон просторната анализа, базите на податоци и управување со просторот. Без стандардизиран механизам за комуникација, овие системи би останале изолирани, со ограничена употребливост и со значителни пречки во интеграцијата (Noardo et al., 2020).

Стандардизацијата игра фундаментална улога во надминување на семантичките, геометриските и организациските разлики што традиционално ги раздвојуваат BIM и GIS. *Стандардите обезбедуваат заедничка структура за опишување на објектите, нивните атрибути и релации, како и унифицирани правила за размена, трансформација и долгорочно управување со податоците.* На тој начин се постигнува интероперабилност меѓу двата системи и се овозможува податоците генерирани во BIM околина да се интегрираат во просторни системи без губење на точност, конзистентност или функционалност и обратно, а GIS моделите да се користат како референтен просторен контекст во BIM околина.

За таа цел во меѓународната заедница се развиени повеќе стандарди и спецификации, а квалитетот и успешноста на BIM-GIS интеграцијата во голема мера зависат од степенот до кој се применуваат истите.

Во продолжение најпрво се разгледува поимот интероперабилност како основен предуслов за BIM-GIS интеграција. Потоа, се анализира улогата на стандардите во обезбедување конзистентна структура и разменливост на податоците, како основа за стабилни работни текови и повторлива интеграција. Во тој контекст, се издвојуваат и се објаснуваат два клучни стандарди што доминантно се користат во BIM и GIS домените, IFC и CityGML, со цел да се постави заедничка концептуална рамка за трансформација и мапирање на податоците. На крај се презентираат техниките за BIM-GIS интеграција, вклучително и пристапите за трансформација, усогласување и поврзување на геометриските и семантичките структури во двата системи.

3.1. Интероперабилност во BIM-GIS интеграција

Во контекст на BIM-GIS интеграцијата, интероперабилноста означува размена на податоци меѓу различни софтверски околинати на начин што овозможува нивно конзистентно толкување и оперативна употреба за конкретна намена (ISO/IEC/IEEE 24765:2017; ISO/TR 23262:2021). Во научната и стручната литература, ова прашање најчесто се интерпретира како премин од „споделување датотека“ кон „споделување значење“, при што акцентот не е ставен единствено на техничкиот пренос на податоците меѓу различни софтверски околинати, туку на зачувувањето на нивната семантичка и оперативна употребливост, односно на можноста тие и понатаму да поддржуваат пребарување, филтрирање, просторни операции и аналитичко изведување заклучоци (Liu et al., 2017; Song et al., 2017; Zhu & Wu, 2022).

Во пракса, интероперабилноста значи дека истиот објект може да се препознае, позиционира и анализира без губење на неговиот идентитет и улога во целната апликација. За да се појасни на што точно се однесува интероперабилноста, во контекст на GeoBIM, како интегративна концептуална и техничка рамка за поврзување на BIM и GIS пристапите, таа се разгледува на повеќе нивоа, најчесто како **синтаксичка, семантичка и процесна (органizaциска)** интероперабилност.

Синтаксичката интероперабилност се однесува на тоа дали податоците може технички да се прочитаат и префрлат (формат, структура и начин на запис), што најчесто се решава преку поддршка на стандарди и стабилни шеми за размена.

Семантичката интероперабилност оди чекор понатаму и се однесува на тоа дали објектите и атрибутите имаат исто (или барем усогласено) значење во целниот домен, на пример дали „простор“ од BIM може да стане тематски валидна просторна единица во GIS и да остане употреблив за анализа или катастарска интерпретација.

Процесната (органizaциска) интероперабилност ја опфаќа оперативната страна: правила за работен тек, управување со верзии, ажурирања, контроли на квалитет, односно условите под кои интегрираните модели можат да се одржуваат и да се користат во реални сценарија.

Важно е да се нагласи дека овие аспекти не претставуваат меѓусебни алтернативи, туку комплементарни димензии на интероперабилноста. Оттука, можно е да се постигне синтаксичка размена на податоци, а притоа да изостане нивната семантичка и процесна употребливост (на пример, моделот да биде невалиден, неусогласен или да не може доследно да се ажурира).

Иако преминот меѓу BIM и GIS главно изгледа како техничко прашање: дали датотеката може да се отвори и прикаже од една околина во друга, сепак е проследен со низа структурни и методолошки препреки. Овие препреки произлегуваат од различните цели на двата домени: BIM е насочен кон инженерска прецизност и детално моделирање на објектот, додека GIS е ориентиран кон просторна анализа, тематска организација и управување со база на податоци. Како резултат на тоа, предизвиците најчесто не се појавуваат како една „голема грешка“, туку како комбинација од несоодветности што можат да се јават во повеќе слоеви, во моделот на податоци, во геометриската репрезентација и валидност, во просторната референца (CRS) и во усогласувањето на нивоата на деталност со целната намена, поради што интеграцијата мора да се третира како контролиран процес со јасни правила и проверки, а не како еднократен трансфер на податоци (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020).

Првата голема препрека е различниот модел на податоци и организација на податоците. BIM го претставува објектот како систем од елементи со инженерска семантика и релации, додека GIS очекува тематски структури погодни за просторни операции и управување со слоеви (feature class). Затоа, дури и кога има техничка можност за конверзија, чест проблем е тоа што резултатот не е оптимално организиран за GIS анализа, или пак се губи дел од значењето при мапирање на класи и атрибути. Истражувањата нагласуваат дека токму оваа несоодветност во структурата е една од причините зошто интеграцијата бара контролирани правила и јасно дефинирани минимални атрибутни шеми, наместо неконтролирано префрлање на податоци (Liu et al., 2017; Song et al., 2017).

Втората критична препрека се однесува на геометријата и нејзината формална валидност во 3Д GIS околина. BIM-геометријата често е параметарска, конструктивна или BRep-ориентирана (Boundary Representation), при што објектите се дефинираат преку нивната гранична обвивка составена од површини, рабови и темиња. Наспроти тоа, 3Д GIS моделите најчесто бараат јасно дефинирани површински елементи и затворени тридимензионални објекти со тополошка коректност (затвореност, меѓусебна усогласеност на површините, без самопресекувања, преклопувања и празнини). Истражувањата за IFC→CityGML конверзија покажуваат дека автоматското добивање геометриски и семантички коректни модели (на пр. LOD3) е чувствително на квалитетот на изворниот BIM модел и на начинот на кој софтверските алатки ја интерпретираат геометријата (Donkers et al., 2016).

Поради тоа, во литературата често се користи поимот *near-lossless* премин за да се опише трансформација во која не се настојува кон апсолутно пренесување на сите детали „без загуба“, туку кон минимална и контролирана загуба во однос на целната намена. Тоа значи дека при конверзија (IFC→CityGML/Geodatabase) приоритетно се зачувуваат геометриската валидност, клучните семантички класи и основните односи и атрибути потребни за анализа, пребарување и поврзување со надворешни регистри, додека секундарните детални податоци можат да се генерализираат или да се изостават според јасно дефинирани правила. Ваквиот пристап претставува компромис поради различните концептуални модели и нивоа на деталност во BIM и GIS, со цел резултатот да остане употреблив и проверлив во целниот домен (Stouffs et al., 2018; Liu et al., 2017). Авторите што разгледуваат *near-lossless* трансформации нагласуваат дека зачувувањето на аналитичката вредност не зависи само од степенот на деталност, туку и од тоа дали се пренесени точни граници и просторни односи (Stouffs et al., 2018). Во реални GeoBIM сценарија, ваквите геометриски прашања често стануваат критична точка, бидејќи дури и мал број невалидни елементи може да ја наруши конверзијата, да се оневозможи валидацијата или да доведе до неконзистентни резултати при последователни просторни операции.

Третата група препреки се однесува на геореференцирањето и усогласувањето на нивото на деталност. BIM моделите многу често се креираат во локален координатен систем (или со непотполни податоци за позиционирање), додека GIS бара експлицитен координатен референтен систем и конзистентна висинска референца. GeoBIM benchmark резултатите покажуваат дека токму тука се јавуваат варијации меѓу софтверски алатки и работни текови, особено околу читање и примена на геореференцирање и проверка на излезната 3Д геометрија, што ја нагласува потребата од јасни правила и проверки (Noardo et al., 2020; Arroyo Ohori et al., 2018). Паралелно, изборот на LOD треба да биде усогласен со намената: премногу деталност може непотребно да го оптовари системот, а премногу генерализација може да ја намали применливоста за специфични анализи или 3Д катастар, затоа, литературата препорачува LOD да се третира како јасно дефинирана поставка на интеграцијата, а не како непредвидлив резултат што произлегува од самиот процес на конверзија (Biljecki et al., 2016; Stouffs et al., 2018).

Токму поради овие препреки, стандардите имаат улога на „мост“ меѓу домените: тие воспоставуваат заеднички структури и правила врз кои се засноваат повторливи трансформации, семантички мапирања и проверки за контрола на квалитет,

овозможувајќи интеграцијата да биде проверлива, конзистентна и одржлива со текот на времето (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020).

3.2. Улога на стандардите во BIM-GIS интеграцијата

Стандардите претставуваат формално договорени спецификации што го дефинираат начинот на кој податоците за објектите и просторот се структурираат, именуваат, запишуваат и разменуваат меѓу различни системи. Стандардите воспоставуваат заеднички правила за геометрија и семантика: кои класи и објекти постојат, како се опишуваат нивните својства, како се моделираат просторните односи и под кои критериуми податоците можат да се валидираат. Оваа улога е особено значајна бидејќи BIM и GIS домените историски се развиени за различни цели и применуваат различни модели на податоци, затоа, без стандарди интеграцијата лесно ќе се сведе на изолирани трансформации со ограничена можност за проверување и краток „животен век“ (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020; Zhu & Wu, 2022).

Оттука, стандардите се основа за повторливост, проверливост и долгорочна употреба. Повторливоста значи дека трансформациите и размената може да се изведуваат на конзистентен начин во различни проекти и со различни софтверски алатки, без да се добива различен резултат поради импровизирани поставки. Проверливоста се однесува на можноста резултатот да се тестира, дали 3Д геометријата е формално коректна, дали атрибутите се конзистентни и дали моделот останува интерпретабилен во целиот домен (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020). Долгорочноста е клучна за апликации како 3Д катастар и дигитални близнаци, каде моделите треба да опстојуваат низ времето, да се ажурираат и да останат читливи независно од конкретен софтвер или верзија на алатка, што дополнително ја зголемува важноста на отворени и широко прифатени спецификации.

Важно е да се нагласи дека интеграцијата ретко се потпира на еден „сеопфатен“ стандард. Најчесто се користи комбинација од комплементарни спецификации, затоа што различни стандарди покриваат различни делови од информацискиот процес: од опис на објектот и неговата инженерска семантика, преку просторен контекст и тематска класификација, до правила за просторна референца, квалитет и сервисно споделување. Практичните искуства покажуваат дека токму ова слоевито комбинирање, со јасна улога за секој стандард, ја намалува зависноста од конкретна алатка и го прави работниот тек отпорен и предвидлив (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Стандардите релевантни за BIM-GIS интеграција може да се групираат според доменот што го опишуваат и функцијата што ја исполнуваат во работниот тек, односно според тоа дали првенствено ја формализираат инженерската репрезентација на објектот, просторниот контекст за анализа, административно-правните поими поврзани со сопственост и права, или пак правилата и механизмите за просторна референца, квалитет и сервисно споделување на податоците. Согласно ова се разликуваат:

- BIM стандарди кои го опфаќаат моделот на објектот на микрониво и ја формализираат инженерската семантика, просторната структура и атрибутите, најрепрезентативен пример е IFC како ISO стандард (ISO 16739-1:2024),
- GIS стандарди обезбедуваат тематски и просторен контекст за моделирање и анализа на ниво на град или територија, во овој домен CityGML претставува

клучниот OGC стандард за семантичко тридимензионално моделирање на урбаната средина, преку кој се дефинираат класи, атрибути и просторни односи на објектите во урбана средина,

- административни, правни модели (на пр. LADM) се релевантни кога е потребно формално поврзување на просторни единици со права, ограничувања и одговорности, особено во 3Д катастар и управување со недвижности.

Дополнително, значајна улога имаат и спецификациите за сервиси, како и рамките за просторна референца и квалитет, развиени во рамки на OGC и ISO. Тие обезбедуваат механизми за публикување, пристап и размена на податоци преку сервиси, но и правила за координатна референца, валидација и контрола на квалитет. Без овие елементи, дури и технички „точна“ конверзија може да остане ограничено употреблива во практика: моделот може да биде визуелно прикажан, но нема да биде лесно проверлив, доверлив и конзистентно применлив во реални работни текови (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Покрај оваа класификација, може да се направи и практична разлика на стандардите на отворени и затворени стандарди. Отворените стандарди се јавно достапни и документирани, што им овозможува примена во различни софтверски алатки и ја намалува зависноста од еден производител, особено кога податоците треба да се архивираат и повторно да се употребуваат. Затворените стандарди, иако често се оптимизирани за конкретни платформи, може да внесат ограничувања во размената и во проверката на трансформациите. Поради тоа, во GeoBIM интеграцијата најчесто се преферираат отворени спецификации како IFC и CityGML кога целта е интероперабилност и долгорочно одржлив работен тек (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020).

Врз основа на претходната класификација и споредбата меѓу клучните стандарди, во продолжение вниманието се насочува кон IFC (ISO 16739-1:2024) како основен BIM стандард што ја формализира инженерската семантика, просторната структура и атрибутната содржина на моделот и кој најчесто претставува изворна референца во GeoBIM работните текови. Преку неговото разгледување се создава појасна основа за разбирање на тоа како деталните BIM податоци може контролирано да се трансформираат и да се поврзат со GIS околина, што понатаму ќе биде клучно и за дискусијата за CityGML и за техниките на интеграција.

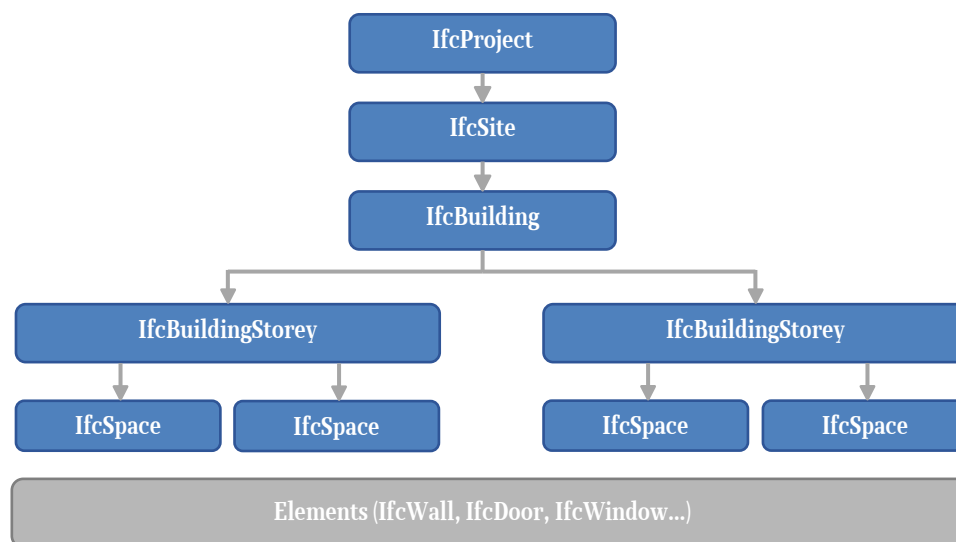
3.3. IFC како основен BIM стандард за BIM-GIS интеграција

IFC (Industry Foundation Classes), стандардизирани како ISO 16739-1:2024, се сметаат за основен „јазик“ на openBIM, затоа што обезбедува неутрална и независна шема за размена иodelување информации за објекти и инфраструктура низ целиот нивен животен циклус (проектирање, изградба, управување и одржување). Оваа улога е суштинска од причина што IFC најчесто претставува изворен модел од кој се извлекуваат геометријата, просторната организација и атрибутите што потоа се трансформираат во GIS-употребливи структури, без да се изгуби поврзаност за потеклото на податокот.

Моќта на IFC произлегува од тоа што не стандардизира само „форма“, туку објектно-ориентирана семантика и односи. Шемата ги опишува објектите (елементи,

простори, системи), нивните карактеристики и меѓусебни релации, а паралелно поддржува и Property Sets и Quantity Sets како структури за формално опишување на својства и количини. За BIM-GIS интеграција ова значи дека, дури и кога дел од деталите ќе се генерализираат за потребите на GIS, IFC овозможува да се задржат (или барем контролирано да се пресликаат) клучните идентификатори, класи и атрибути што ја носат аналитичката вредност. buildingSMART ја нагласува токму оваа димензија: IFC како стандарден модел што ги кодира идентитетот, атрибутите и односите на објектите на начин што може да се користи во различни софтверски околии.

Практично, IFC е важен затоа што нуди просторна структура што може да се искористи при премин кон GIS: хиерархијата (проект-локација-зграда-кат-простор) и експлицитното моделирање на простории, односно просторни единици (на пр. IfcSpace) се добра основа за сценарија каде GIS е работна околина за просторни операции и поврзување со надворешни регистри. Токму затоа, во интегративни работни текови IFC често се третира како „семантички богат извор“, од кој се извлекуваат релевантни класи и својства, па потоа се структурираат во тематски GIS слоеви и атрибутни шеми (Liu et al., 2017). Слика 3.1 ја илустрира просторната хиерархија во IFC и начинот на кој елементите се организираат во рамки на таа структура.



Слика 3.1. Просторна хиерархија во IFC (IfcProject-IfcSite-IfcBuilding-IfcBuildingStorey-IfcSpace)

Литературата покажува дека преминот IFC→GIS не е едноставен, најмногу поради геометриските репрезентации и барањата за валидност во 3Д моделите на урбани средини. Конверзиите кон CityGML, на пример, мора да произведат геометриски и семантички коректни резултати, што подразбира стабилни граници, конзистентни површини и правилна семантичка распределба (Donkers et al., 2016). Дополнително, пристапите што тежнеат кон *near-lossless* премин нагласуваат дека ретко е возможно целосен премин без загуба, па затоа се потребни јасни правила што дефинираат што се задржува и како се пресликува значењето меѓу домените (Stouffs et al., 2018).

Геореференцирањето на IFC и конзистентноста меѓу околните е важен чекор во BIM-GIS работните текови. GeoBIM benchmark студиите покажуваат дека различните софтверски решенија и нивната интерпретација на стандардите можат да дадат различни резултати при вчитување и генерирање на излезни податоци, особено околу

геореференцирање и валидност на излезната 3Д геометрија, што ја наметнува потребата интеграцијата да се постави како повторлив процес со јасни проверки (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020). Во овој контекст, IFC не е само формат за размена, туку „контролен“ референтен модел врз кој се темели можноста за проследување на трансформацијата: ако се задржат стабилни идентификатори и јасни правила за просторно поставување, се олеснува ревизијата, ажурирањето и споредувањето на верзиите во GIS околина.

3.4. CityGML како основен GIS стандард за 3Д модели на урбани средини

CityGML е OGC стандард наменет за моделирање, размена и анализа на тридимензионални објекти во GIS околина, при што воспоставува унифицирана шема за репрезентација на објектите со јасна тематска класификација (Building, Transportation, Vegetation), просторни односи и семантички структури погодни за просторни операции и анализи на урбани средини (Gröger & Plümer, 2012; OGC, 2021). За разлика од BIM стандардите кои ја носат инженерската деталност на објектот, CityGML ја поставува зградата и инфраструктурата во контекст на урбани средини и ја прави содржината разбирлива во GIS околина, со јасно дефинирани класи на објекти, основни геометриски форми и стандарден сет атрибути кои можат да се складираат, пребаруваат и анализираат во просторни бази на податоци и преку сервиси. Токму поради ова, CityGML често се третира како модел во целната околина при BIM→GIS трансформации кога целта е урбанистичко планирање, просторни симулации, дигитални близнаци или интеграција со други слоеви од урбани средини (Liu et al., 2017; Zhu & Wu, 2022).

Една од централните идеи на CityGML е концептот на нивоа на деталност (LOD), кој овозможува ист објект да се претстави со различни степени на геометриска и семантичка разработеност, во зависност од намената (Gröger & Plümer, 2012). Ова е особено важно во GeoBIM бидејќи директниот пренос на деталноста од BIM моделот, често создава модели што се „претешки“ за ниво на урбани средини и не се оптимални за просторни операции. Затоа, CityGML овозможува контролирано поедноставување и стандардизирана репрезентација на обвивки и гранични површини на зградите (WallSurface, RoofSurface, GroundSurface). Во таа смисла, LOD во CityGML претставува практична рамка со која интеграцијата може да се усогласи со нивото на анализата, наместо деталноста да биде непланиран резултат од конверзијата (Kutzner et al., 2020; OGC, 2021).

Во поновите верзии дополнително се развива моделот со поголема флексибилност и појасни механизми за моделирање на објекти и нивни делови, а подобрена е поддршката за современи сценарија на дигитални близнаци и сервисно споделување (OGC, 2021; Kutzner et al., 2020). Истовремено, CityGML поддржува проширување преку Application Domain Extensions (ADE), со што може да се воведат дополнителни структури за атрибути или класи кога стандардниот модел не е доволен за специфични домени (на пр. инфраструктура, енергетика или административни потреби), без да се наруши основната интероперабилност (Gröger & Plümer, 2012; OGC, 2021).

Во интегративните работни текови, CityGML често е следниот чекор по IFC: IFC ја носи инженерската семантика и деталната геометрија, а CityGML обезбедува урбана семантика и GIS-структура за складирање и анализа. Овој премин бара мапирање на класи и атрибути (семантичко усогласување) и внимателно управување со геометријата за да се добијат валидни површини и тела, и правилни гранични површини, особено кога целта е

повисока LOD репрезентација (Donkers et al., 2016; Stouffs et al., 2018). Како практична предност, CityGML моделите полесно се поврзуваат со други слоеви од урбаните средини (парцели, инфраструктурни мрежи, ограничувања), што е значајно и во сценарија за 3Д катастар каде урбаниот контекст и просторната конзистентност се подеднакво важни како и деталноста на објектот (Sun et al., 2019).

Покрај GML записите, во пракса се користат и поекономични шеми за кодирање како што е CityJSON, кои ја задржуваат CityGML логиката, односно семантика, но овозможуваат полесна работа во софтвер и веб-околина (Ledoux et al., 2019). Ова дополнително ја зајакнува улогата на CityGML како „основен GIS стандард“, не само како спецификација, туку како концептуална рамка што може да се имплементира во различни технички форми, зависно од потребите на платформата и апликацијата (OGC, 2021; Ledoux et al., 2019).

Во продолжение е прикажана споредбена табела на IFC и CityGML според доменот на примена, видот на објекти и информации што ги стандардизираат, аспектите на интероперабилност што ги поддржуваат и нивната релевантност за 3Д катастар, со цел јасно да се согледаат нивните комплементарни улоги.

Табела 3.1. Споредба на IFC и CityGML во контекст на BIM-GIS интеграција

Критериум	IFC	CityGML
Домен	BIM / AEC / инфраструктура	3Д GIS / Модели на урбани средини
Предмет на стандардизација	Информациски модел за објекти и инфраструктура со развиена семантика, просторна структура, атрибути и детална геометрија	Концептуален модел за 3Д модели на урбани средини и објекти со семантика, просторен контекст, LOD и тематски модули
Интероперабилност што ја поддржува	Размена на BIM модели меѓу различни софтверски алатки, координација, проектирање, анализа и основа за трансформација, односно мапирање кон GIS околина	Интероперабилност на 3Д модели на урбани средини во GIS, поддршка за просторни анализи, визуелизација, симулации и сервиси на урбано и регионално ниво
Просторен фокус	Јасно моделирање на просторна хиерархија и внатрешни простори (site-building-storey-space), како и нивните релации со елементите на објектот	Организација на објектите во поширок урбан и пејзажен контекст, со акцент на тематски класи и просторни односи меѓу објектите
Релевантност за 3Д катастар	Особено релевантен за моделирање на внатрешни простори, функционални единици, конструктивни елементи и детална семантика на објектот	Особено релевантен за контекстуална интеграција со урбани, теренски, катастарски слоеви и други GIS слоеви, како и за 3Д просторни анализи

Табела 3.1 покажува дека IFC и CityGML го опфаќаат истиот домен на објекти, згради и нивни делови, но од различни перспективи и со различни цели. IFC е доминантно фокусиран на микрониво, бидејќи го третира објектот како инженерски систем со детални елементи, просторна организација по катови и простории, и богат опис со атрибути, што е корисен за проектна документација, координација и управување со

компоненти (ISO 16739-1:2024; Liu et al., 2017). CityGML, е насочен кон макрониво, односно објектот го поставува во урбан контекст и обезбедува тематска структура и LOD концепт што е наменет за просторни анализи и планирање на урбано и регионално ниво (Gröger & Plümer, 2012; OGC, 2021). Оттука, тие не се конкурентни стандарди, туку комплементарни, едниот обезбедува детална инженерска и внатрешна репрезентација, а другиот обезбедува урбан контекст и 3Д GIS рамка.

За 3Д катастар оваа комплементарност е особено значајна, затоа што катастарските сценарија бараат истовремено доволна деталност за идентификација на просторни единици и нивни односи (на пр. простории, функционални целини и нивните граници), и стабилен просторен контекст за поврзување со парцели, околина и урбани ограничувања. IFC природно ја носи „внатрешната“ геометрија и семантика што може да се поврзе со катастарски единици или со функционални единици релевантни за административна интерпретација, додека CityGML создава рамка за просторна интеграција со пошироки GIS слоеви и за анализи на ниво на град или урбана средина (Sun et al., 2019). Во практика, преминот меѓу нив се реализира преку техники за трансформација и семантичко мапирање, поткрепени со процеси за контрола на квалитет, што е и причината зошто стандардизацијата сама по себе не е доволна, односно потребни се јасни работни текови и критериуми за валидност и конзистентност (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Сумирано, стандардите ја обезбедуваат заедничката рамка во која BIM и GIS податоците можат да се опишат на конзистентен начин, од инженерската семантика и просторната структура (IFC), до урбаниот контекст и тематската класификација за просторна анализа (CityGML). Сепак, самата стандардизација не ја гарантира интеграцијата во практика. Разликите во моделите на податоци, геометриските репрезентации и барањата за просторна валидност значат дека преминот меѓу домените мора да се реализира преку јасно дефинирани работни текови со правила и проверки. Оттука, во продолжение фокусот се насочува кон техниките за BIM-GIS интеграција, односно кон конкретните пристапи за трансформација на податоци, семантичко усогласување и системско или сервисно поврзување што овозможуваат моделите да бидат валидни, интерпретабилни и оперативно употребливи.

3.5. Техники за BIM-GIS интеграција

Со оглед на тоа што претходно веќе се разгледани општите поставки за интеграција, интероперабилност и релевантните стандарди, овој дел се фокусира на **техниките како практични механизми преку кои се реализира врската меѓу BIM и GIS**. Во тој контекст, интеграцијата се третира како структуриран работен тек, каде што не е доволно механичко претворање на податоците од еден во друг формат, туку потребна е контролирана трансформација. Со тоа се обезбедува податоците да станат технички употребливи во целиот домен, нивното значење да може да се интерпретира (семантички усогласено), а решението да биде одржливо во реална употреба. Ваквиот пристап е во согласност со истражувањата кои укажуваат дека **BIM-GIS интеграцијата не е единечен чекор, туку збир од комплементарни чекори и избори што зависат од намената и очекуваните резултати** (Song et al., 2017; Wang et al., 2019). Во таа смисла, интеграцијата има за цел да ги искористи „силните страни“ на двата домени во заеднички работен тек, при што се обезбедува континуитет на податоците и можност за ажурирање и поврзаност кон изворните модели (Wang et al., 2019; Zhu & Wu, 2022).

За појасно и конзистентно систематизирање на техниките, се применува поделба на интеграцијата на три нивоа, која е често користена како аналитичка рамка во истражувањата, иако терминологијата меѓу авторите варира (Song et al., 2017; Wang et al., 2019; Zhu & Wu, 2022). Ваквиот пристап овозможува да се разграничи дали одредена техника првенствено е насочена кон трансформација и структурирање на податоците, кон усогласување на значењето и правилата за мапирање или кон имплементација во оперативна средина со механизми за одржување и ажурирање на моделите (Sani & Abdul Rahman, 2018; Stouffs et al., 2018). Во продолжение се издвојуваат следните нивоа:

Податочко ниво (data-level): се решава „како“ податоците да станат употребливи во целниот домен преку трансформација на геометрија, организација на атрибути и добивање структури погодни за GIS операции. На ова ниво доминираат предизвиците поврзани со различните геометриски репрезентации и потребата од формална валидност на 3Д објектите (Sani & Abdul Rahman, 2018).

Семантичко ниво (semantic-level): се определува „што“ претставуваат објектите по интеграцијата преку мапирање на класи или типови, усогласување на атрибути и правила за постапување со семантички несоодветности. Пристапите насочени кон *near-lossless* трансформација покажуваат дека геометријата и семантиката мора да се третираат заедно за да се задржи аналитичката вредност, особено кога се опфаќаат и внатрешни структури или комплексни објекти (Stouffs et al., 2018).

Системско или сервисно ниво (system/service-level): интеграцијата се третира како оперативно решение, складирање во просторни бази, односно репозиториуми, објавување преку сервис, управување со верзии и ажурирања и обезбедување поврзаност меѓу изворните и трансформирани податоци. Ова ниво е особено релевантно за дигитални близнаци и апликации низ целиот животен циклус, каде моделите се користат континуирано и бараат механизми за одржување на конзистентност (Wang et al., 2019).

Врз основа на наведените нивоа, техниките за BIM-GIS интеграција може да се групираат според доминантниот слој на кој дејствуваат. Притоа, се разграничуваат:

- техники насочени кон трансформација и конверзија на податоци, со кои се обезбедува употреблива 3Д геометрија и основна структура на атрибути во GIS,
- техники базирани на модели и правила за семантичко усогласување, кои го задржуваат или систематски го пресликуваат значењето на објектите и нивните својства,
- техники за системска или сервисна интеграција преку платформи, просторни бази и сервис, кои обезбедуваат одржливост, следење на промени и оперативна примена.

Ваквото групирање е во согласност со доминантните согледувања во прегледната литература дека BIM-GIS интеграцијата се движи од „основна употребливост на податоците“ кон поголем степен на интерпретабилност и кон оперативна одржливост во реални системи. Притоа, изборот на конкретен пристап ретко е универзален, тој зависи од целта (визуелизација, просторни анализи, управување со средства, 3Д катастар), од бараното ниво на деталност и точност, како и од тоа дали се очекува интеграцијата да функционира како еднократен или како континуиран процес со ажурирања и верзии (Liu et al., 2017; Wang et al., 2019; Zhu & Wu, 2022). Во таа смисла, техниките не се исклучуваат меѓусебно, туку најчесто се комбинираат во еден работен тек: податочната

трансформација обезбедува структурен „влез“ во GIS, семантичките правила ја гарантираат аналитичката употребливост, а системската интеграција обезбедува долгорочна примена и управување со промени (Song et al., 2017; Zhu & Wu, 2022).

Неопходно е да се нагласи дека доверливоста на резултатите не зависи само од избраната техника, туку и од предусловите што ја обезбедуваат просторната точност и формалната валидност на моделите. Поради тоа, во продолжение прво се разработува слојот кој претставува предуслов – просторна усогласеност и контрола на квалитет, кој се применува низ сите техники и ја гарантира доверливоста на резултатите, од коректна конверзија, преку семантичко усогласување, до оперативна системска или сервисна употреба (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Просторна усогласеност и контрола на квалитет

Просторната усогласеност и контролата на квалитет (QA/QC) се суштински услов за BIM-GIS интеграцијата да биде доверлива и аналитички употреблива. Во практиката, голем дел од проблемите кај интеграцијата не се должат на самиот формат, туку на несогласувања во координатниот контекст, нејасно позиционирање и геометриски аномалии кои подоцна се манифестираат како погрешни просторни пресекувања, неуспешни 3D операции или неконзистентни слоеви во GIS. Токму затоа, повеќе автори нагласуваат дека геореференцирањето и валидацијата треба да се третираат како систематска дисциплина што ја придружува целата интеграција, а не како формален „чекор пред експортирање“ (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Геореференцирање и усогласување на координатни референцни системи (CRS)

Првата компонента на просторната усогласеност е воспоставување на коректен координатен референтен систем и стабилно позиционирање на BIM моделот во реалниот простор. BIM моделите често се развиваат во локални координати, при што ориентацијата и висинската референца се дефинирани според потребите на проектирањето, а не според официјален координатен систем. Од друга страна, GIS подразбира формално дефиниран координатен референтен систем (CRS) и доследна висинска рамка за да може моделот да се преклопи со катастарски податоци, инфраструктурни слоеви, ортофото снимки и теренски модели. Токму поради тоа, геореференцирањето во BIM-GIS контекстот вклучува:

- избор и потврда на координатен референтен систем,
- поставување параметри за трансформација (транслација, ротација, примена на фактор на размер каде што е потребно),
- проверка преку референтни точки како на пример, основи на објекти, контролни точки или други независни извори што овозможуваат да се детектира и коригира систематско поместување (Diakité & Zlatanova, 2020; Noardo et al., 2020).

Во литературата се истакнува дека дури и мали отстапувања во позиционирањето можат да имаат значајно влијание врз точноста на просторните анализи и врз поврзувањето со надворешни регистри, што е особено критично за апликации како 3D катастар и управување со инфраструктура (Diakité & Zlatanova, 2020).

Контрола на квалитет: валидност, топологија и конзистентност

Втората компонента е контрола на квалитет (QA/QC) на геометријата и атрибутите, со фокус на геометриска валидност, тополошка исправност и конзистентност. Во овој контекст, „квалитет“ не значи само колку моделот е прецизен, туку и дали е формално употреблив во GIS: дали површините се конзистентни, дали 3Д телата се затворени каде што е потребно и дали нема пресекувања, преклопувања, празнини или дупликации што би предизвикале проблеми кај 3Д операции. Практичните анализи покажуваат дека ваквите аномалии често остануваат „скриени“ во BIM околина, но стануваат критични кога моделот ќе се префрли во GIS и ќе се подложи на тополошки строги операции (Arroyo Ohori et al., 2018). Од тука произлегува потребата валидацијата да не се третира како еднократна проверка, туку како контролирана серија тестови со јасни критериуми.

Практично, контролата на квалитет подразбира и поставување толеранции (на пр. за минимални разлики во координати, мали празнини или отстапувања што се резултат на конверзија), како и генерирање извештаи за квалитет што документираат кои корекции се направени и кои ограничувања остануваат. Ова е особено важно кога интеграцијата треба да биде повторлива или да се користи во повеќе фази и од повеќе корисници, бидејќи документираните проверки овозможуваат транспарентност и споредливост на резултатите (Noardo et al., 2020).

Пре-процесирање и пост-процесирање како итеративна контрола

Просторната усогласеност и контрола на квалитет може да се разгледуваат како две комплементарни фази, претпроцесирање (pre-processing) и постпроцесирање (post-processing), бидејќи проблемите се појавуваат и „пред“ и „по“ конверзијата. Во фазата на претпроцесирање се прават основни подготовки што го намалуваат ризикот конверзијата да даде погрешен или нестабилен резултат: поставување или потврдување на CRS (кога BIM е во локални координати), проверка на мерни единици, ориентација и висинска референца и брза детекција на очигледни грешки што би ја компромитирале трансформацијата (на пр. груби дупликации, очигледно искривена геометрија или неконзистентни поставки). Со тоа се обезбедува „чист податок за влез“ и се избегнува сценариото каде проблемите во GIS всушност потекнуваат од недоследни почетни параметри. Фазата на постпроцесирање се изведува по трансформацијата и е насочена кон проверка на тоа дали излезниот GIS модел ги исполнува барањата на целниот формат и намената. Тука спаѓа валидација на излезната геометрија (конзистентни површини и затворени 3Д тела каде што е потребно), проверка на топологија и конзистентност по раслојување и генерализација, како и контрола на позициона точност преку споредба со независни просторни референти (на пр. основи на објекти или контролни точки). Според резултатите од повеќе истражувања, токму ваквите работни текови, со подготовка, проверка и документирано известување, се покажуваат како најстабилни, бидејќи ја намалуваат варијабилноста на резултатите меѓу различни софтверски алатки и модели и ја олеснуваат понатамошната системска употреба (Noardo et al., 2020).

Врз основа на наведеното, просторната усогласеност и контролата на квалитет треба да се сфатат како заедничка „основа“ што ја обезбедува точноста, валидноста и конзистентноста на резултатите пред тие да се користат за конверзија, семантичко мапирање или објавување преку сервис. Откако ќе се воспостави стабилен координатен контекст и ќе се потврди формалната коректност на 3Д геометријата, интеграцијата може да се разгледува низ трите техники при што фокусот се поместува од обезбедување

просторна доверливост кон методите со кои податоците се трансформираат, се задржува нивното значење и се обезбедува нивна одржлива употреба во оперативни системи.

3.5.1. Техники за трансформација и конверзија на податоци – податочно ниво (*data-level*)

По воспоставувањето на просторната усогласеност и основните QA/QC контроли, техниките за трансформација и конверзија на податоци имаат за цел BIM содржината да се конвертира во GIS-употребливи 3Д објекти со минимален, но стабилен опис со атрибути, што може да се складира, пребарува и обработува во GIS. Во литературата ова ниво често се опишува како „влезна рамка“ во интеграцијата, бидејќи без употреблива геометрија и конзистентна структура на податоци не може да се продолжи кон семантичко усогласување или системска имплементација (Liu et al., 2017; Song et al., 2017; Wang et al., 2019).

Вообичаено, трансформацијата се организира како ETL-постапка (*extract-transform-load*): се извлекуваат релевантните ентитети од BIM (најчесто преку IFC), се трансформираат геометријата и атрибутите според целната употреба и потоа се вчитуваат во GIS формат или просторна база. Клучен принцип е уште на ова ниво да се дефинира „атрибутен минимум“ (на пр. уникатен идентификатор, основна класификација, кат или ниво, извор и верзија на податокот), со што резултатите стануваат конзистентни и повторливо обработливи, без да се оптовари базата со секундарни детали што не придонесуваат за целната анализа (Liu et al., 2017; Zhu & Wu, 2022). Токму затоа, во практични работни текови често се воспоставува и сет на правила за атрибути: што е задолжително, што е опционално и што се игнорира во зависност од размерот и задачата.

Геометријата е најчувствителниот дел од *data-level* трансформацијата. BIM моделите често користат параметарски и конструктивни репрезентации како *swept solids* (волумени добиени со извлекување на 2Д профил по оска или патека), CSG (конструктивна геометрија на 3Д тела), BRep, што се соодветни за проектирање, но не секогаш директно употребливи за GIS операции, каде што се очекуваат експлицитни 3Д геометриски објекти со формална тополошка коректност (ISO 16739-1:2024). Затоа, во конверзијата често се спроведува дискретизација на геометријата или реконструкција на граници за да се добијат конзистентни површини или затворени 3Д тела (кога анализата бара операции со волумени). Истражувањата за IFC→CityGML покажуваат дека „директната“ конверзија без структурна геометриска корекција лесно резултира со преклопувања, пресекувања или незатворени тела, што ја ограничува аналитичката употребливост и ја намалува доверливоста на резултатите (Donkers et al., 2016; Stouffs et al., 2018).

Податочното ниво подразбира и раслојување во GIS логика, бидејќи BIM хиерархијата не е исто што и тематската организација во GIS. Во пракса, се формираат слоеви или класи што директно поддржуваат операции: обвивка, покрив, фасади, отвори, простории, конструктивни елементи или функционални зони, во зависност од задачата. Тука се јавуваат две типични стратегии: агрегација, каде повеќе BIM елементи се претставуваат како една GIS единица (на пр. за ниво на урбани средини) и декомпозиција, каде еден BIM ентитет се разложува на повеќе геометриски компоненти (на пр. гранични површини) кога се анализира обвивка, пресек со парцели или контактни површини (Wang et al., 2019; Song et al., 2017). Овие избори директно влијаат на големината на податокот, перформансите и стабилноста на 3Д обработката во GIS.

На ова ниво се носат и клучни одлуки за нивото на деталност и генерализација, затоа што тие најчесто се реализираат токму преку геометриско поедноставување и селекција на содржина. Практично, „точното“ ниво на деталност не е апсолутно, туку е условено од намената: за анализи на урбани средини може да биде доволна генерализирана обвивка, додека за апликации што бараат прецизни граници или пресметки на волумени (на пр. 3Д катастарски сценарија) е потребна поголема структурна и геометриска строгост. Во литературата за нивото на деталност се нагласува дека неконтролираното зголемување на деталноста ја намалува стабилноста и управливоста, додека преголемата генерализација ја губи функционалната вредност на моделот, затоа се препорачуваат јасни правила за поедноставување и конзистентност меѓу репрезентациите (Biljecki et al., 2016; Stouffs et al., 2018).

Посебно важен аспект на ова ниво е конзистентноста на идентификаторите и „поврзаноста со изворот“. Дури и кога семантичката хармонизација се разработува подоцна, во податочната конверзија мора да се зачува стабилен клуч (на пр. GlobalId) и доволно метаподатоци (изворна датотека, верзија и датум на податокот, дисциплина или модел) за резултатите да може да се проверуваат и повторуваат. Ова е критично и за ревизија на грешки, и за подоцнежнo ажурирање: без стабилни врски, GIS резултатот станува „изолиран дериват“ што тешко се одржува (Zhu & Wu, 2022; Noardo et al., 2020).

Треба да се земе предвид и дека различни софтверски алатки можат различно да ја интерпретираат IFC геометријата. Истражувањата покажуваат варијабилност во начинот на кој се добива геометриски и просторен резултат, особено околу геореференцирање и валидност на излезната 3Д геометрија, што ја зголемува потребата трансформацијата да се опише како повторлив процес со јасни проверки и критериуми (Noardo et al., 2020). Во оперативна смисла, податочната трансформација најдобро се претставува како кратка, но строго дефинирана постапка на селекција на содржина според намена → геометриска трансформација → тематско раслојување и атрибутен минимум → валидација на излезниот резултат → вчитување во GIS околина што ја прави методологијата транспарентна и споредлива меѓу различни студии на случај.

Иако трансформацијата на ова ниво формално не е семантички усогласен слој, тој има директна тежина за апликации како 3Д катастар. Ако излезните 3Д единици не се геометриски коректни и просторно конзистентни, подоцнежните интерпретации и поврзувања со регистри стануваат несигурни. Затоа податочната конверзија треба да се сфати како основа што ја обезбедува техничката употребливост на моделот и ја подготвува сцената за понатамошно усогласување и системска употреба (Sun et al., 2019; Liu et al., 2017).

3.5.2. Техники базирани на модели и правила за семантичко усогласување (semantic-level)

Семантичкото ниво го надградува податочното со експлицитни правила за значење, за да се добие модел кој е тематски читлив и аналитички употреблив, односно да се знае што е секој објект, кои својства му припаѓаат и како се поврзува со други објекти во просторни операции.

Во BIM доменот значењето е вградено во IFC шемата и релациите (на пр. класи како IfcWall/IfcSlab/IfcSpace и нивните својства), додека GIS бара тематски организирани објекти со стабилни атрибути и доследни домени на вредности. Затоа, јадрото на ова ниво најчесто е шематско мапирање, односно се дефинира кои IFC ентитети и сет на атрибути

се пресликуваат во кои GIS класи и атрибути, со нормализација на имиња, единици и типови на податоци за да се добие конзистентен модел. Во вакви правила се решаваат и „семантичките празнини“ (кога нема 1:1 еквивалент), па дел од информацијата се агрегира или се пренесува како контролирани атрибути наместо како нови објекти (El-Mekawy et al., 2012). Практично, правилата за семантичко усогласување секогаш се врзани со намената и со нивото на деталност: ист BIM елемент може да е преситен за ниво на урбани средини, но критичен за внатрешна структура или за катастарска интерпретација. Овде се дефинира што се задржува, што се генерализира и како се одржува конзистентност меѓу тематските слоеви, на пример, дали просториите ќе се третираат како клучни просторни единици, дали ќе се извлекуваат гранични површини за анализа на обвивка, или ќе се работи со генерализирани претставувања. Пристапите што тежнеат кон *near-lossless* конверзија покажуваат дека подобар резултат се добива кога геометриската и семантичката логика се третираат заедно, но истовремено се признава дека трансформација „целосно без загуба“ е ретко реалистично и треба да се контролира според случајот на употреба (Stouffs et al., 2018).

Во контекст на BIM-GIS интероперабилноста, често се јавуваат ситуации во кои стандардната целна шема не е доволна за целосно да го пренесе значењето на изворните податоци. Во такви случаи, трансформацијата не може да се сведе само на директно пресликување на елементи, туку бара дополнително семантичко посредување. Тоа посредување најчесто се реализира преку референтни модели, онтологии или систематизирани правила за мапирање, со чија помош појасно се дефинираат врските меѓу концептите од BIM и GIS доменот. На пример, при поврзување на IFC и CityGML, ваквиот пристап овозможува не само геометријата, туку и значењето на објектите и нивните односи да бидат поусогласено интерпретирани. На тој начин, пресликувањето станува поексплицитно, поконзистентно и полесно за одржување, што е особено важно за долгорочна и сигурна размена на податоци меѓу различни системи.

Во контекст на 3Д катастар, семантичкото усогласување е многу важно затоа што просторните единици не се само геометрија, туку носители на функционално и административно значење. Затоа, треба да се обезбедат јасни категории, стабилни идентификатори и правила за припадност (простор-ниво-објект) за моделот да остане проверлив и применлив во регистри и процедури (Noardo et al., 2020; Zhu & Wu, 2022).

3.5.3. Техники за системска или сервисна интеграција (system/service-level)

Системската или сервисна интеграција го третира BIM-GIS поврзувањето како оперативно решение што треба да функционира во реални услови: повеќе корисници, повеќе извори на податоци, различни апликации и потреба од континуирано ажурирање. На ова ниво фокусот се поместува од тоа дали моделот може да се префрли во GIS, кон тоа како податоците ќе се складираат, објавуваат и користат преку сервис, без да се изгуби врската со изворот и без да се наруши конзистентноста низ времето (Liu et al., 2017; Zhu & Wu, 2022). Во практична смисла, ваквата интеграција најчесто се реализира преку комбинација од репозиториуми и просторни бази, ETL/ELT процеси и сервисен слој за пристап. BIM моделите (или нивните деривати) се чуваат во BIM репозиториум, додека GIS претставувањата и аналитичките слоеви се управуваат во просторна база на податоци или просторна платформа, со јасни правила за синхронизација. Клучно е да се воспостави механизам за следење на промени и верзии (на пр. што е изменето, кога, од кого и во која верзија), како и стабилни идентификатори што овозможуваат објектите да останат

поврзани меѓу BIM и GIS дури и кога се трансформираат или генерализираат. Во GeoBIM benchmark анализите се потенцира дека токму конзистентното управување со геореференцирање, параметри за конверзии и верзии е предуслов интеграцијата да биде повторлива и споредлива низ различни софтверски алатки и работни текови (Atgboyo Ohoji et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Сервисното ниво ја операционализира интеграцијата преку објавување на податоците преку веб-сервиси и API, со јасно дефинирани правила за пристап, перформанси и безбедност. Овој пристап е особено релевантен кога се бара интеграција со други системи (урбанистички бази, катастарски регистри), каде што моделите не се користат само за визуализација, туку како дел од поширок информациски систем (Wang et al., 2019; Zhu & Wu, 2022).

Во контекст на дигитални близнаци и 3Д катастар, системската интеграција станува критична затоа што моделите треба да останат одржливи и ажурни. Новите мерења (LiDAR/SLAM), реконструкции или административни промени треба да можат контролирано да се внесат, да се документираат и да се сервираат кон различни корисници и апликации. Затоа, ова ниво логично се надоврзува на претходните: податочната трансформација обезбедува технички употребливи 3Д структури, семантичкото усогласување обезбедува интерпретабилност, а системската или сервисната интеграција ја обезбедува долгорочната оперативна примена и управување со промените (Sun et al., 2019; Noardo et al., 2020).

Со ова се поставува рамката за BIM-GIS интеграцијата преку три меѓусебно поврзани аспекти: интероперабилноста како предуслов за пренос и заедничко користење на просторни податоци меѓу различни системи, улогата на отворените стандарди, како формални носители на геометрија, семантика и правила за размена и техниките за интеграција како практични механизми што ја реализираат врската меѓу домените на податочно, семантичко и системско ниво, при што просторната усогласеност и контролата на квалитет се издвојуваат како основа за доверливи резултати.

4. ДОМЕНИ НА ПРИМЕНА НА ИНТЕГРИРАН BIM-GIS СИСТЕМ

Современите работни процеси во инженерството, урбанистичкото планирање и управувањето со недвижностите се карактеризираат со сè поголема комплексност, потреба од интегрирано планирање и потреба за постојана размена на податоци меѓу различни дисциплини. Во тој контекст, традиционалната поделба помеѓу BIM доменот, кој е ориентиран кон детално инженерско и архитектонско моделирање на објектите, и GIS доменот, кој е насочен кон моделирање на просторот и управување со просторни податоци, станува ограничувачка и не може да ги задоволи барањата на современото дигитално општество. Иако секоја технологија функционира во свој длабоко специјализиран домен, потребата од нивно поврзување произлегува од фактот дека ниту еден инженерски или урбанистички процес не е изолиран од просторот и неговите зависимости (Biljecki et al., 2015).

Потребата од BIM-GIS интеграција е засилена од трендовите на глобалната дигитална трансформација, развојот на дигитални близнаци, автономни инфраструктури, умешни градови и 3Д катастарски системи. Овие концепти бараат постојано ажурирани, просторни и семантички поврзани модели кои можат да поддржат напредни анализи, симулации и донесување одлуки. Дополнително, урбаниот развој, климатските промени, зголемените барања за енергетска ефикасност и потребата од транспарентност во јавниот сектор ја прават интеграцијата неопходна, а не само пожелна.

Домените на примена на интегрираните BIM-GIS системи се многубројни и опфаќаат широк спектар на процеси и дисциплини. Меѓу нив се издвојуваат **урбанизмот и просторното планирање**, каде интеграцијата овозможува визуелно и аналитички поддржано моделирање на урбаните средини, подобро **проектирање и управување со инфраструктурата**, каде системот обезбедува координирано управување со комплексни надземни и подземни системи, напредни симулации за **процена на енергија, микроклима и ризици**, кои се можни само преку комбинирање на физичките и просторните атрибути на објектите, како и **развојот на дигитални близнаци**, што претставува следна генерација на управување, мониторинг и оптимизација на овие системи во реално време.

Една од доста значајните можности на еден интегриран BIM-GIS систем е 3Д визуелизацијата и навигацијата, каде корисниците можат да ги истражуваат просториите, објектите и околината во реалистичен, геореференциран контекст. Ваквите визуелизации претставуваат важна поддршка за архитектонско планирање, мониторинг на објекти, истражувачки цели и комуникација помеѓу засегнати страни. Ваквите системи исто така овозможуваат прецизни пресметувања на волумени, површини и просторни односи, со што се отвораат можности за квантитативни анализи кои се особено важни за 3Д катастар, енергетска ефикасност и моделирање на урбани средини.

Интегрираниот BIM-GIS систем овозможува анализа на сенки и соларен потенцијал, што е клучно за проценка на енергетските можности на објектите, оптимизирање на поставување на фотоволтаични системи и оцена на влијанието на околината. Овие симулации се поддржани од современи 3Д GIS платформи кои работат со пресметка на сончевата позиција во реално време и аналитички соларни индикатори. Интегрираниот 3Д модел овозможува и напредни симулации на природни и технички ризици, како што се модели на поплави, сценарија на ширење на пожари или анализи на евакуациски рути. Овие симулации се базираат на топологијата и структурните својства

на објектот, што овозможува реалистични сценарија на движење на вода, чад, топлина или луѓе (Zhou et al., 2020).

Особено значаен домен е **регистрацијата на правата врз недвижностите во 3Д просторот**, односно 3Д катастар, кој станува суштински за современите урбани средини со комплексни вертикални и подземни структури. Тридимензионалната репрезентација на правата врз недвижностите, како и ограничувањата и одговорностите кои произлегуваат од тие права, не може да се постигне без комбинација од детална BIM геометрија и просторниот контекст на GIS и со прецизна правна формализација. Со оглед на ваквите трендови, интегрираниот BIM-GIS станува фундаментална основа за дигиталното управување со недвижностите, просторот и ресурсите.

4.1. Просторно и урбанистичко планирање

Во доменот на урбанистичкото планирање, BIM-GIS интеграцијата овозможува прецизно поставување на архитектонските и инженерските објекти во нивниот реален просторен контекст. BIM обезбедува детални податоци за геометрија, материјали, висини, волумени и функционални намени на објектите, додека GIS обезбедува поширок територијален контекст, вклучувајќи транспортни мрежи, социодемографски индикатори, еколошки параметри и регулаторни урбанистички зони (Biljecki et al., 2021; Arroyo Ohori et al., 2018). Овој спој создава интегрирана 3Д средина која овозможува подетални анализи, поголема точност и побрзо донесување информирани одлуки.

Интегрираниот BIM-GIS пристап исто така овозможува полуавтоматизирана проверка на усогласеност со урбанистичко-планската документација. Параметрите како висински ограничувања, регулациони линии, максимална дозволена густина и функционална намена, можат да се анализираат директно врз дигиталниот модел, со што административните процеси стануваат побрзи и потранспарентни (Lee et al., 2016). На овој начин, ризикот од човечки грешки се намалува, а одлучувањето се заснова врз конзистентни и проверливи просторни податоци. BIM-GIS интеграцијата овозможува напредни анализи на засенување, соларна експозиција и заштита на визуелни коридори. Соларните симулации врз 3Д контекстуален модел се особено важни за одржливи стратегии, енергетска ефикасност и регулативи поврзани со квалитет на живот. GIS параметрите за ориентација, надморска висина и климатски услови, комбинирани со BIM параметрите за геометрија на објектот, овозможуваат креирање на реалистични сценарија за соларен потенцијал и микроклиматски ефекти (Nouvel et al., 2017).

Урбаната густина и инфраструктурниот капацитет, како клучни индикатори за одржлив раст, можат да се анализираат со поголема точност кога BIM и GIS податоците се поврзани. BIM обезбедува податоци за број на единици, висини и волумени, додека GIS ги поврзува овие информации со инфраструктурните капацитети, транспортната достапност и јавните сервиси (Zhao et al., 2019). На овој начин се поддржуваат сценаријата за развој, кои ја минимизираат оптовареноста и ги максимизираат капацитетите на постојната инфраструктура.

Интегрираните BIM-GIS платформи создаваат основа за поголема транспарентност во процесот на урбанистичко одлучување. Преку веб-базирани GIS решенија и интерактивни 3Д визуелизации, јавноста, општините и инвеститорите можат да увидат реални сценарија базирани на реални податоци, што води кон повисоко ниво на

учество на јавноста. Овие дигитални алатки го модернизираат начинот на кој урбанизмот комуницира со граѓаните и создаваат услови за поинклузивни процеси на планирање.

4.2. Планирање и управување со инфраструктура

Инфраструктурните проекти (патишта, мостови, железнички траси, комунални системи) бараат прецизно усогласување помеѓу дизајнот и реалниот терен, како и интегрирано управување со големи количини просторни податоци.

Интегрираниот BIM-GIS систем овозможува:

- *геореференцирање на инфраструктурните модели,*
- *поврзување на BIM елементите со просторни слоеви (геологија, хидрологија, ограничувачки зони),*
- *управување со подземна инфраструктура,*
- *симулации на сценарија за сообраќај, хидраулика, ризици и климатски влијанија,*
- *оптимизација на траси и прошиоци базирани на реалните теренски услови.*

Како резултат, интеграцијата обезбедува повисока точност во проектирањето и значително намалување на ризикот при изведбата. На Слика 4.1 е дадено интегрирано BIM-GIS решение за планирање и управување со сообраќајна инфраструктура.



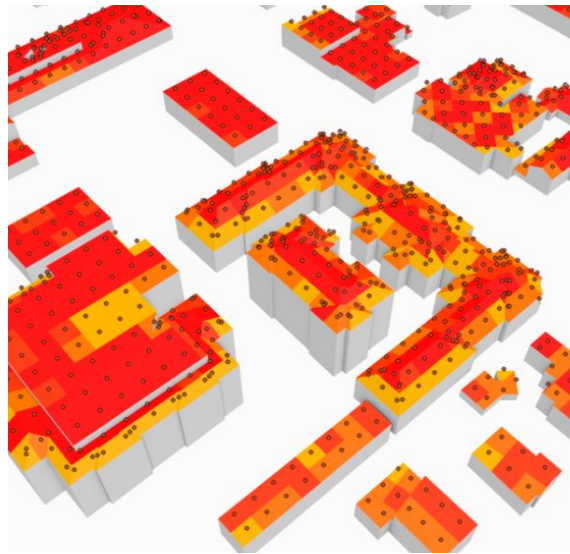
Слика 4.1. Интегрирано BIM-GIS решение за планирање и управување со сообраќајна инфраструктура

Во контекст на инфраструктура, интегрираниот BIM-GIS систем може да биде применет за оптимизација на инфраструктурните системи, вклучително и водоводни, транспортни или енергетски мрежи. Преку мрежните GIS анализи, може да се процени капацитетот, пропусноста, ризиците од преоптоварување, како и да се анализираат сценарија за реконфигурација (Sun et al., 2019). Особено значајна е и улогата на топошката анализа, која опфаќа операции како пресек (intersection), допирање (touch), растојание (distance) и просторна поврзаност. Со овие анализи се определува дали елементите се во конфликт, дали може да се изгради инфраструктура без да се нарушат постојните системи, или да се детектираат нелегални интервенции (Zlatanova et al., 2020).

4.3. Симулации и анализа на перформанси

BIM-GIS интеграцијата ги подобрува можностите за комплексни симулации кои ги комбинираат физичките својства на објектите (BIM) со регионални и локални просторни параметри (GIS). Во оваа категорија се вбројуваат:

- енергетски симулации на ниво на урбана зона или град,
- анализа на соларен потенцијал, ветрови и микроклима,
- процена на ризици од појави, пожари и земјотреси,
- симулации за акустика и загаденост на воздухот.



Слика 4.2. Интегриран BIM-GIS пристап за процена на соларен фотоволтаичен потенцијал на покриви на објекти

Овие аналитички процеси играат клучна улога во развојот на политики за одржливост, енергетска ефикасност и климатска адаптација. На Слика 4.2 е даден интегриран BIM-GIS пристап за процена на соларен фотоволтаичен потенцијал на покриви на објекти.

4.4. Дигитални близнаци (Digital Twins)

Интегрирањето на BIM моделите во сеопфатен GIS систем претставува основа за развој на т.н. дигитални близнаци. Дигиталниот близнак на објектот претставува виртуелен модел дизајниран точно да го рефлектира физичкиот објект. Во просторен контекст, дигиталниот близнак е виртуелна претстава на реалниот свет, вклучувајќи физички објекти, процеси, релации и однесувања. GIS технологијата овозможува креирање дигитални близнаци на природните и изградените средини и нуди можност за интеграција на различни видови дигитални модели.

Интегрираните BIM-GIS модели претставуваат важна технолошка основа за развој на дигитални близнаци на објекти и градови. Конвергирањето на инженерските, просторните и сензорските податоци создава динамична дигитална репрезентација што овозможува континуирано следење, анализа и оптимизација на изградената средина. Како што укажуваат современите истражувања, дигиталните близнаци ја надминуваат

традиционалната визуелизација и стануваат интелигентни системи кои ги поддржуваат фазите на планирање, проектирање, изградба и управување (Su et al., 2022). Во оваа насока, интегрираните BIM-GIS модели се јавуваат како медијатор, бидејќи овозможуваат унифициран 3Д просторен контекст во кој можат да се поврзат сите релевантни податоци.

Дигиталните близнаци претставуваат динамични, ажурирани дигитални модели кои го репрезентираат реалниот свет во реално време. BIM го обезбедува деталниот 3Д инженерски модел, додека GIS овозможува просторен контекст и интеграција со IoT сензори, квантитативни мерки, инфраструктурни слоеви и статистички показатели.

Интегрираните дигитални близнаци:

- овозможуваат мониторинг на состојбата на објектите,
- поддржуваат предвидливо одржување,
- симулираат сценарија за оптоварување, ризици и оперативни процеси,
- ги поврзуваат урбаните и техничките системи во единствен интегриран модел.

Овие системи се основа за паметни градови и за долгорочно управување со јавни и приватни ресурси.

4.4.1. Дигитален близнак на објект

Дигиталниот близнак на објект претставува високодејална, динамичка 3Д репрезентација на еден објект или систем, која се ажурира во реално време. Во својата основа, дигиталниот близнак го комбинира BIM моделот како инженерска основа, GIS податоците како просторна рамка, како и IoT сензорските податоци како извор на тековни информации (Khaşarı et al., 2019). Благодарение на BIM, моделот содржи детални податоци за конструкцијата, материјалите, просториите и MEP системите. GIS обезбедува прецизна позиција во државниот координатен систем, контекст на околината и поврзување со инфраструктурни слоеви. IoT уредите, поставени на критични точки во објектот, обезбедуваат информации за температура, влажност, вибрации, CO₂, потрошувачка на енергија и слично. Овие податоци се надополнуваат со временски серии кои го документираат однесувањето на објектот низ времето, со што моделот станува жив систем што се адаптира и се ажурира автоматски. Такви дигитални близнаци овозможуваат:

- мониторинг на структурната здравствена состојба,
- предвидливо одржување преку анализа на аномалии,
- управување со потрошувачката на енергија,
- симулации за безбедносни сценарија,
- оптимизација на просторните функции и движење во реално време.

Овие функционалности ја зголемуваат ефикасноста и го продолжуваат животниот циклус на објектите, што е клучно во современите системи за управување со недвижности (Boje et al., 2020).

4.4.2. Дигитален близнак на град

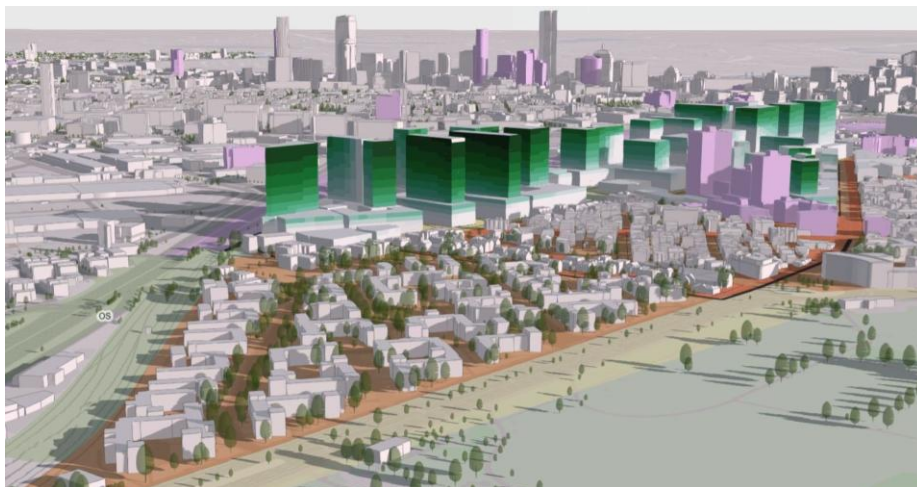
Дигиталниот близнак на град претставува интегрирана, мултимодална дигитална репрезентација на целиот урбан систем, која ги обединува податоциите за објектите, инфраструктурата, мобилноста, природната средина и урбаниите процеси. За разлика од дигиталниот близнак на објект, кој се фокусира на локален инженерски контекст, дигиталниот близнак на град ги моделира сите урбани слоеви, вклучувајќи:

- транспортни мрежи,
- подземна и надземна инфраструктура,
- енергетски и телекомуникациски системи,
- движење на населението,
- динамика на ресурси и услуги.

Со примена на BIM-GIS интеграцијата, овие податоци добиваат заеднички просторен контекст, што овозможува:

- просторни симулации, како сценарија за развој, урбани трансформации или климатски ризици,
- следење на состојбата на инфраструктурата, со поддршка од IoT, SCADA и мрежни анализи,
- анализа на мобилност, вклучувајќи проток на пешаци, јавен транспорт и сообраќајни оптоварувања,
- управување со урбани ресурси, како енергија, вода и отпад,
- поддршка на концептот „smart city“, каде реалните и дигиталните системи се меѓусебно поврзани (Batty, 2018).

Како резултат, дигиталниот близнак на град (Слика 4.3) станува платформа за донесување одлуки во реално време, со која локалните самоуправи, операторите и граѓаните можат да разберат и оптимизираат сложени урбани процеси. Тој претставува основа за стратешко планирање, климатска адаптација, енергетска транзиција и подобрување на квалитетот на животот.



Слика 4.3. Дигитален близнак на град

4.5. 3Д катистар

Катистарскиите системи традиционално се воспоставени како клучен механизам за правна сигурност во прометот со недвижности, преку јасна идентификација на недвижностите и носителите на правата. Во практична смисла, оваа сигурност најчесто се обезбедува преку две основни компоненти: геометриска репрезентација на недвижностите (катастарски план) и текстуална евиденција, база со регистрирани носители на права, товари и приклучоци. Геометриската репрезентација, историски гледано, е организирана во две димензии, при што просторот се претставува преку парцели и нивни граници во рамнина, а објектите се прикажуваат најчесто како контури или проекција на објектот во хоризонтална рамнина во рамките на границите на парцелите. Во таа логика, правната рамка во многу држави се потпира на максимата *superficies solo cedit*, која го третира земјиштето како примарен објект на правото, а градбите како нешто што по правило ја следи правната судбина на парцелата.

Меѓутоа, пазарот на недвижности и трендовите во градежништвото создаваат нови потреби кои постепено ги надминуваат капацитетите на класичниот 2Д катастар. Денес сè почесто се градат комплексни објекти и структури со слоевита просторна организација: подземни гаражи под јавни површини, инфраструктурни коридори што поминуваат под повеќе парцели, објекти со конзоли и натпатници, мултифункционални комплекси со различни режими на сопственост по катови и делови, како и објекти кај кои правните и функционалните граници не се совпаѓаат со проекцијата на објектот врз хоризонтална рамнина. Во вакви случаи, принципите на традиционалната 2Д регистрација, дури и кога се дополнети со описи или технички прилози, не секогаш можат да обезбедат доволна деталност и недвосмисленост за обемот на правата, ограничувањата и одговорностите.

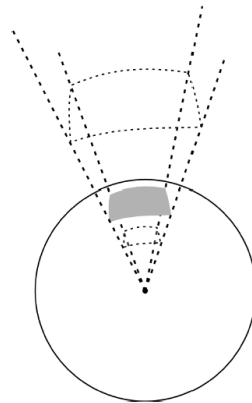
Традиционалните 2Д катастарски системи создаваат ограничувања кои не можат да се надминат со примена на основните принципи на регистрација кои самите ги имаат поставено. Оттука се наметнува **потребата од еволуција на катистарскиите системи и инкорпорирање на модели кои ќе можат да ја претставуваат недвижноста како просторна единица во три димензии и ќе овозможат јасно разграничување на правата во вертикална смисла.** Овој премин не е само техничка надградба, туку одговор на реалните барања на пазарот, инвеститорите и институциите за повисока транспарентност, правна сигурност и поефикасно управување со сè покомплексниот изграден простор.

4.5.1. Римскоправните начела и нивното влијание врз разграничувањето на сопственичките права

Кога се разгледуваат сопственичките права врз недвижностите и нивното разграничување во вертикална смисла, особено во контекст на теоретска и концептуална анализа, неминовно е поаѓањето од максимата *superficies solo cedit*, присутна во римското право. Оваа максима, која има длабоки историски корени и континуирана примена, претставува еден од темелните принципи врз кои се изградени современите правни системи во областа на недвижностите. И покрај долгогодишната експлоатација, може да се констатира дека *superficies solo cedit* во суштина ја задржала својата форма и значење сè до денес, при што продолжува да има значително влијание врз начинот на кој се дефинираат и регистрираат правата врз земјиштето и објектите изградени врз него (Stoter, 2004).

Начелото *superficies solo cedit* го изразува принципот според кој зградата изградена на одредено земјиште ја дели правната судбина на самото земјиште. Тоа значи дека зградата е нераскинливо поврзана со парцелата и се третира како нејзин прирасток (*accessio*). Во практична смисла, ова подразбира дека секое правно дејствие поврзано со земјиштето, како отуѓување, наследување, оптоварување со хипотека или воспоставување други стварни права, автоматски се однесува и на објектот изграден врз тоа земјиште. Според ова правило, земјиштето и зградата се третираат како една единствена недвижност, при што сопственикот на земјиштето се смета и за сопственик на објектот, дури и во случаи кога објектот е изграден со средства на друго лице.

Покрај тоа што го регулира односот меѓу земјиштето и објектот, начелото *superficies solo cedit* поставува и основа за дефинирање на границите на недвижноста во вертикална смисла. Во римското право, простирањето на сопственоста се опишува со максимата *ad inferos et usque ad sidera*, што симболично значи „од пеколот до рајот“ (Слика 4.4). Оваа формулација сугерира дека правото на сопственост не е ограничено само на површината на земјата, туку се протега и над и под неа, при што вертикалните граници не се експлицитно дефинирани, туку се подразбираат како правна апстракција (Sandberg, 2003).



Слика 4.4. *Ad inferos et usque ad sidera*, познато како „од пеколот до рајот“

И покрај јасната логика што ја воспоставува ова начело, уште во периодот на неговото формирање постоеле одредени исклучоци. Римското право дозволувало изградба на објекти врз туѓо земјиште преку користење на концесија или други облигациони односи, при што градителот имал обврска да плаќа надомест на сопственикот на земјиштето, а правото било временски ограничено. Со тек на времето, ваквите односи еволуирале од облигациони во стварноправни, овозможувајќи раздвојување на земјиштето и објектот како два засебни објекти на правото. На тој начин се оформува спротивното начело *superficie solum cedit*, според кое земјиштето ја следи правната судбина на објектот (Stoter & Van Oosterom, 2006).

Примената на начелото *superficie solum cedit* е особено карактеристична за социјалистичките и комунистичките држави, каде земјиштето, најчесто градежното, било национализирано и се наоѓало во општествена или државна сопственост, додека физичките и правните лица стекнувале право на користење и сопственост врз објектите изградени на тоа земјиште. Овој модел резултира со двоен правен режим, во кој земјиштето и објектот се трајно функционално поврзани, но правно раздвоени. По транзицијата на овие држави кон демократски општества и пазарна економија, често се јавува враќање кон начелото *superficies solo cedit*, што дополнително ги комплицира

постојните сопственички односи и отвора прашања за нивна соодветна регистрација и просторна репрезентација (Lemmen et al., 2015).

4.5.2. Последици од примената на *superficies solo cedit*

Зголемувањето на густината на населението во урбаните средини, интензивната урбанизација и изградбата на објекти под и над површината на земјата создаваат просторни ситуации кои се значително покомплексни од оние што постоеле пред неколку децении. Современите градби се карактеризираат со сложена геометрија, вертикално слоевито распоредување и интензивно користење на подземниот простор, што ја наметнува потребата од многу подетално дискретизирање на просторот и пореалистично претставување на просторната содржина во системите за регистрација и управување со недвижности (Stoter, 2004).

Подземниот простор, кој долго време бил релативно малку искористен, се почесто се користи за подземни гаражи, тунели, транспортна и комунална инфраструктура, што претставува рационален одговор на ограниченоста на површинскиот простор. Интеграцијата на овој простор во урбаната структура и очекуваните подобрувања во квалитетот на живеење бараат ревизија и надградба на традиционалните правни доктрини што го регулираат подземниот простор (Sandberg, 2003).

Иако *superficies solo cedit* формално ја дефинира сопственоста под и над површината на земјата, неговата примена е целосно соодветна само на ниво на државна територија. Кога станува збор за поединечни сопственички единици, овој принцип не обезбедува јасен одговор на прашањето како да се разграничат правата во случаи кога објектите се пресекуваат по вертикала. Водени од ова начело, традиционалните катастарски системи ја земаат парцелата, дефинирана со јасни и недвосмислени 2Д граници, како основна единица за регистрација на правата, додека она што се случува во висина и длабочина се третираат индиректно и апстрактно.

Овој пристап создава сериозни ограничувања и недоследности во регистрацијата на правата врз недвижностите. Секое навлегување под или над границите на парцелата, следејќи го начелото *superficies solo cedit*, се толкува како нарушување на владението, што често води до правна несигурност, инвестициски ризици и судски спорови.

Недостатоците на традиционалниот пристап кон дефинирање на просторот во кој егзистира сопственоста, стануваат се поизразени, особено во развиените земји, каде урбаната средина се карактеризира со изградба на се поимпозантни и конструктивно комплексни објекти, чија економска вредност континуирано расте. Во такви услови, секое парче земјиште, како и секој слободен простор под површината на земјата, се користи интензивно или постои јасна тенденција за негово идно искористување. Оваа просторна и економска реалност ја става под силен притисок традиционалната катастарска парадигма заснована на 2Д парцели и имплицитно дефинирање на сопственоста во вертикална смисла (Stoter, 2004; Stoter & Van Oosterom, 2006).

Сепак, важно е да се нагласи дека ограничувањата на ваквиот пристап се присутни и во помалку развиените земји, иако таму тие се помалку видливи и поретко се третираат како приоритетен проблем. Причината за ова не лежи во нивната непостојаност, туку во фактот дека сложените надземни и подземни градби се уште не се бројни, а институционалниот фокус најчесто е насочен кон поосновни предизвици, како што се

воспоставување ажурен катастар, решавање на неажурирани сопственички записи и обезбедување основна правна сигурност за едноставни ситуации на сопственост. Во таков контекст, проблемите поврзани со вертикалното преклопување на правата остануваат во втор план, иако нивната појава е прашање на време (Lemmen et al., 2015).

Традиционалните 2Д катастарски системи се базираат на моделирање на недвижностите со кое земјиштето и објектите се претставуваат преку проекција во рамнина, односно преку нивни 2Д геометриски презентации. Основна просторна единица е катастарската парцела, чии граници се дефинираат со линии и темиња или полигони, чии прекршни точки претставуваат снимени локации во просторот и проектирани врз хоризонтална рамнина. Во ваков модел, просторот се сведува на модел во рамнина, а вертикалната димензија се третира индиректно, преку правни претпоставки, текстурални описи и дополнителна документација, без притоа експлицитно да се моделира третата димензија на објектите, нивната форма и правата кои се поврзуваат со тие делови на објекти или простор.

Во поглед на зградите, кај традиционалните 2Д катастарски системи, во зависност од законската регулатива, постои разлика во начинот на прикажување на објектите на плановите. Тие најчесто се претставуваат како проекција од основата на зградата која е материјализирана преку контактната линија помеѓу објектот и теренот. Во најдобар случај, на катастарскиот план се прикажуваат контурите на конструкцијата, влезовите и деловите од објектот кои ја надминуваат основата на зградата како еркери, балкони и тераси. Меѓутоа, ваквата репрезентација по правило не ги содржи клучните информации за вертикалната структура: број на катови, промена на габаритот на објектот по катови (пример, подземно ниво со различен габарит во однос на останатите катови), конзоли со нивната форма и застапеност по катови, како и односот на објектот со подземни простории и инфраструктура. Така, зградата во 2Д катастарот е сведена на еден полигон прикажан во рамнина, кој може да биде корисен за преглед на локацијата на објектот, но не ја отсликува реалната просторна комплексност.

Овој проблем станува уште поизразен кога се разгледуваат посебните делови од згради (станови, деловни простори, гаражи, подруми итн.) и нивната регистрација во катастарскиот систем. Во многу системи, етажната сопственост се документира преку етажни скици и прилози што најчесто се подготвуваат како дел од елаборати за регистрација или техничка документација. Овие скици често се креираат „парцијално“, односно стан по стан, или „посебен дел по посебен дел“, при што секој стан добива сопствена скица со граници, површина и опис на просториите. Иако ова може да биде доволно за индивидуална регистрација на конкретен посебен дел од зграда, при разгледување на објектот како една целина резултира со слабост: не постои интегрален и конзистентен просторен модел на целиот објект или барем кат, прикажан со единствен геометриски модел. Практично, ова значи дека за еден кат може да постојат повеќе одделни скици, за секој стан, за заедничките простории (ходници, скали, лифт-јадро), за технички простории, за она што според закон се дефинира како недвижност, но тие не се секогаш составени во единствен модел, кој ја прикажува распределбата и меѓусебните односи на сите единици. Како резултат на тоа, соседствата, пресеците и контактните површини меѓу становите остануваат нејасни или се интерпретираат преку наративни описи и останата проектна документација, наместо преку стандардизиран просторен модел.

Дополнително, 2Д катастарските системи по правило немаат механизам за експлицитно моделирање на вертикалните односи меѓу посебните делови: вертикална поврзаност на катовите и посебните делови, подземните гаражи во однос на парцелата, зградата и останатите објекти, пресекување на сопственоста по вертикала или дали дел од објектот се протега над јавен простор (улица, тротоар, плоштад). Подземните објекти, гаражи, тунели, подземни премини, инфраструктурни коридори и слично, во 2Д најчесто се прикажуваат со симболи или воопшто не се прикажуваат на катастарскиот план. Ваквиот пристап на моделирање на недвижностите ја ограничува можноста за регистрација на правата и презентација на границите на недвижностите со целата нејзина комплексност, а притоа јасно и недвосмислено да се дефинираат границите на сопственост и прикажат правата и ограничувањата. Надземните објекти како „конекции“ помеѓу згради, конзолни делови што ги преминуваат границите на катастарските парцели, натпатници кои преминуваат преку патишта, во 2Д или не се прикажуваат воопшто или се сведуваат на проекција каде едниот објект го преклопува вториот, па од самата регистрација не може недвосмислено да се утврди просторниот однос на објектите, а следствено на тоа и регистрацијата на правата станува нецелосна, недефинирана до крај, па дури во одредени случаи и не ја пресликува реалната геометриска состојба и распоред на објектите.



Слика 4.5. Студентски дом „Гоце Делчев“, конекциите помеѓу зградите не се прикажани на катастарскиот план

Ограничувањето на 2Д репрезентацијата се гледа и во неможноста за воспоставување 3Д тополошки односи и автоматизирана валидација. Во 2Д не може со сигурност да се утврди дали два објекта се пресекуваат во вертикала, дали еден волумен е содржан во друг, или дали постои конфликт меѓу подземна инфраструктура и приватна сопственост. Поради тоа, традиционалните катастарски системи често мора да се потпираат на дополнителни документи, рачни проверки и правни интерпретации, што ја намалува транспарентноста и ја зголемува можноста за спорови. На Слика 4.5 и Слика 4.6 се дадени примери на сложени просторни односи за објекти во Скопје за кои не постои соодветна регистрација во Геодетско-катастарскиот информационален систем на Агенцијата за катастар на недвижности.



Слика 4.6. Подземни гаражи во комплексот „Лептокарија“, влезната рампа и подземниот објект не се прикажани на катастарскиот план

Од претходно презентираниите примери и дискусии, може да се извлечат неколку клучни констатации. Принципитите врз кои се темелат традиционалните катастарски системи немаат доволен концептуален и технички капацитет за спроведување јасна, недвосмислена и просторно експлицитна регистрација на објекти со сложена вертикална структура, како и на објекти кои се целосно или делумно лоцирани под или над површината на земјата. Исто така, 2Д катастарските прикази, воведуваат значителни рестрикции во разбирањето и анализата на просторните настани, бидејќи овозможуваат исклучиво хоризонтален поглед на просторот и ја игнорираат неговата волуметриска природа. Користењето на одвоени скици и дополнителна документација како поддршка на 2Д приказите претставува фрагментиран пристап кој не е соодветен за каква било сериозна геометриска или информациска интеграција, ниту пак овозможува автоматизирана просторна анализа и валидација (Stoter, 2004).

Со оглед на фактот дека традиционалните катастарски системи очигледно не можат да одговорат на современите просторни и сопственички потреби, се наметнува суштинското прашање дали просторот под и над површината на земјата треба да се третира по аналогија со земјиштето, односно дали и тој треба да се дели со граници по вертикала, слично на поделбата на земјиштето во 2Д рамнина со вертикални гранични линии. Ова прашање не е само техничко, туку и концептуално, бидејќи директно ја проблематизира применливоста на парцелно-ориентираната логика во тридимензионален простор.

Поделбата на просторот, особено под површината на земјата, има свои специфичности кои ја прават суштински различна и значително покомплексна од поделбата на земјиштето на 2Д парцели. Врската меѓу она што се наоѓа над и под површината на земјата е поцврста и поинтензивна од односите меѓу соседни парцели во хоризонтална смисла, што е резултат на вертикалната поставеност на просторните тела и на физичките закони, особено гравитацијата. Неправилното или несоодветно користење на подземниот простор може директно да предизвика сериозни оштетувања на објектите на површината, што дополнително ја нагласува меѓусебната зависност на овие просторни нивоа (Sandberg, 2003). Понатаму, објектите изградени на површината на земјата по правило мора да навлезат под неа преку темели, подрумски конструкции или инсталации,

а често постои и потреба од вертикални отвори за вентилација, пристап или евакуација. Овие функционални и конструктивни барања јасно укажуваат дека апсолутна и целосна одделеност на објектите над и под површината на земјата во практиката е речиси невозможна. Иако постојат изолирани случаи во кои може да се постигне целосно разграничување, тие се ретки и претставуваат исклучок, а не правило во современото урбано планирање и градење (Stoter & van Oosterom, 2006).

Сумирано, традиционалните 2Д катастарски системи обезбедуваат јасна претстава на хоризонталните граници на парцелите и основите на објектите, но не обезбедуваат интегрална и аналитички употреблива репрезентација за комплексните 3Д ситуации. Традиционалните, парцијални етажни скици дополнително ја фрагментираат просторната информација и ја отежнуваат конзистентната интерпретација на состојбата на ниво на кат и на објектот во целина. Овие ограничувања ја оправдуваат потребата од надградба кон 3Д катастарски модели кои ќе овозможат волуменска репрезентација, конзистентна етажна структура и јасно дефинирани односи меѓу посебните делови, заедничките простории и јавниот простор, со што ќе се подигне правната сигурност и техничката прецизност на регистрацијата.

4.5.3. Присвојување на регистрација на комплексни 3Д ситуации

Актуелните истражувања поврзани со регистрација на комплексни 3Д ситуации, недвосмислено посочуваат дека 2Д катастарските системи, иако се стабилна основа за регистрација на недвижностите прикажани на катастарските планови како проекција во рамнина и правата врз нив, многу често не можат да обезбедат јасна и недвосмислена регистрација и интерпретација на ситуации и односи помеѓу недвижностите во кои сопственоста и другите права се пресекуваат во вертикална смисла. Затоа, значаен дел од современите истражувања се насочени кон концептуално редефинирање на катастарските системи во контекст на редефинирање на дефиницијата на недвижност и дефинирање на нивните граници: наместо граници во 2Д, се промовираат пристапи базирани на тридимензионално дефинирани недвижности или тридимензионално дефинирани простори во кои правото се врзува за јасно определен простор. Во таа насока, van Oosterom et. al (преку LADM) ја нагласуваат потребата од формално моделирање на односите меѓу носителите на права, правата и ограничувањата и просторните единици, со можност просторната единица да биде, покрај традиционалните дефиниции, и тридимензионално дефинирана (van Oosterom et al., 2013). Паралелно со концептуалните рамки, се развиваат и технички решенија кои директно ги адресираат слабостите на традиционалните 2Д катастарски системи: правила за 3Д топологија и конзистентност, валидација на геометрија, модели за повеќеслојна репрезентација (објект-кат-простор), како и интероперабилност меѓу стандардите (IFC, CityGML и LADM) за поврзување на физичката реалност со катастарската регистрација. Дополнително, современите методи за аквизиција (TLS, UAV-LiDAR, SLAM) овозможуваат побрзо и подостапно добивање на 3Д геометрија, што ја зголемува практичната изводливост на тридимензионалната регистрација и просторни анализи.

Иако постојат повеќе концептуални и технички решенија за надградба на катастарските системи, во продолжение фокусот ќе биде ставен на систематизацијата направена од Jantine Stoter, истакнат истражувач во оваа област, која издвојува три јасни пристапи за регистрација на 3Д ситуации: *3Д катистар со дојолниелни дескрипции* (анотации, анекси, дополнувања), *Хибриден 3Д катистар* и *Целосен 3Д катистар*. Овие

пристапи ќе бидат разгледани според нивната логика, степен на интервенција во постојните 2Д катастарски системи, предности, ограничувања и применливост како патеки за практична еволуција кон 3Д катастарски систем.

3Д Катастар со дополнителни дескрипции за 3Д ситуации

Варијантата 3Д катастар со дополнителни дескрипции е најконзервативниот пристап. Кај ова концептно решение, основната катастарска единица останува 2Д парцелата, а правата (сопственост, товари, прибелешки) формално продолжуваат да се водат во рамнина. Концептот предвидува воведување на дополнителна дескрипција во катастарската регистрација која сигнализира дека во рамките на одредена парцела (или во нејзина близина) постои 3Д ситуација што не може соодветно да се интерпретира само преку 2Д модел на недвижностите.

Клучен елемент е тоа што дополнителната дескрипција во суштина е линк до дополнителни документи (геодетски елаборати, проекти, договори, етажни скици, технички описи и слично) каде се објаснува простирањето на правото во 3Д. Практичната предност е очигледна: решението може да се имплементира брзо и со мала промена на постојните процеси. Меѓутоа, токму поради тоа што 3Д информацијата не претставува експлицитен 3Д модел, оваа варијанта има ограничена аналитичка моќ:

- просторните соодноси и преклопувања на недвижностите не можат да се проверуваат автоматизирано,
- визуелизацијата е индиректна (преку прилози),
- просторните анализи и пребарувања во 3Д (пример „дали волуменот на тунелот навлегува во просторот на парцелата?“) остануваат тешки за системска проверка.

Оттука, овој пристап е најсоодветен како преодна и нискоризична надградба на катастарскиот систем, кога институционалната и правната рамка сè уште не е подготвена за формално тридимензионално дефинирање на недвижностите.

Хибриден 3Д катастар

Хибридниот пристап за регистрација на недвижности со користење на третата димензија е концептуиран така што основната 2Д регистрација (парцели и објекти) останува во постојната форма, односно се задржуваат воспоставените процедури, правни принципи и начинот на запишување на правата. Разликата се состои во тоа што, како дополнителен слој кој се води паралелно со 2Д катастарската евиденција, се воведува и тридимензионален модел на просторната положба во оние ситуации каде границите на сопственоста и обемот на правата не можат јасно и недвосмислено да се прикажат дводимензионално. На тој начин, примарно се проширува геометриската презентација на недвижностите, додека правната регулатива најчесто останува непроменета или претрпува само минимални интервенции.

Во рамки на овој модел, 3Д геометријата со која се опишуваат објектите или просторните сегменти што предизвикуваат ограничување на правата во рамките на една 2Д парцела (на пример: подземни објекти, натпатници, инфраструктурни коридори) се интегрира со постојната 2Д регистрација. Во контекст на правата врз недвижностите, се регистрираат права, како на пример службеност, долгогодишен закуп и слично, врз катастарските парцели, со што правно се обезбедува постоењето на објектот под или над

површината на парцелата. Клучната придобивка е што системот, покрај класичниот 2Д приказ, добива можност за 3Д визуелизација, просторни анализи и проверка на преклопувањата и односите на соседните недвижности врз основа на просторните податоци. Во рамките на хибридниот концепт, се дадени две варијанти на геометриско дефинирање на просторот или недвижностите:

- регистрација преку 3Д дефиниран простор,
- регистрација преку 3Д модел на конкретен објект.

Кај првата варијанта, примарен објект за регистрација на правата претставува дефиниран 3Д простор во кој егзистира одредено право или со кој се поврзува одредено ограничување. На пример, службеност за тунел, право на градење над јавна површина или дефиниран заштитен простор околу инфраструктурен вод. За таа цел, во регистрацијата се внесува тридимензионално дефиниран простор кој го претставува токму просторниот опфат на тоа право, поврзано со носителот на правото, правниот основ и релевантните ограничувања на правата на недвижностите. Овој дефиниран простор не мора строго да ги следи границите на објектот кој е под или над површината на земјата, односно може да има и поширок опфат, како на пример простор кој го опфаќа тунелот и дополнителен заштитен простор околу него. Предноста е што системот директно го регистрира, дефинира просторот кој се однесува на одредено право. Дополнително, ваквата репрезентација овозможува јасна слика за недвижноста, нејзината просторна поставеност како и правата поврзани со неа бидејќи добива јасно дефинирана тридимензионална просторна форма, а не само текстуален опис. Кај втората варијанта, фокусот е ставен на физичкиот објект (тунел, подземна гаража, мостовска конструкција и слично), при што во катастарската регистрација се внесува 3Д геометријата на самиот објект и неговата врска со парцелите што ги пресекува.

Во пракса, хибридниот катастар може да ги комбинира и двете логики: правниот волумен да е носител на правата, а физичкиот објект да служи за веродостојна просторна референца и контекст. Од аспект на применливост, хибридниот модел е реалистичен чекор за земји со функционален 2Д катастар, затоа што овозможува постепено воведување на 3Д регистрација на недвижности без целосна замена на основните катастарски принципи.

Целосен 3Д катaстap

Целосен 3Д катастар е најамбициозното решение и подразбира дека недвижностите се дефинираат како 3Д простор, со граници кои се експлицитно утврдени во трите димензии. Наместо 2Д парцела со недефинирана граница во висина и длабочина, се регистрира просторна единица која прецизно го опфаќа обемот на сопственоста или правото, пример волумен на стан, деловен простор, волумен на подземна гаража, волумен на коридор итн.

Во рамки на ова концептно решение често се разгледуваат две варијанти и тоа:

- Комбиниран 2Д/3Д модел, и
- Целосен 3Д модел.

Комбинацијата на 2Д и 3Д дефинирани недвижности во суштина значи дека поголемиот дел од територијата останува репрезентиран како 2Д парцели со „стандардна“

вертикална екстензија, додека таму каде што постојат сложени 3Д ситуации се воведуваат „тридимензионални парцели“ што „исклучуваат“ дел од просторот од основната парцела. На тој начин, системот е целосно 3Д таму каде што е неопходно, а останува практичен и стабилен за едноставните ситуации каде што регистрацијата е јасна со 2Д репрезентација.

Целосниот 3Д модел, значи целосно напуштање на 2Д катастарскиот систем и премин кон целосно 3Д моделирање на недвижностите и границите на сопственост. Ова во суштина значи дека нема да постојат повеќе граници на сопственост дефинирани во 2Д, туку секоја недвижност, дури и границите на земјиштето врз кое нема изградено објект или врз кое има одредени ограничувања заради подземни инфраструктури и слично, ќе биде дефинирано во три димензии. Ова теоретски дава најголема јасност и конзистентност, но бара радикални промени во правната рамка, стандардите за премер, одржување на податоци и институционалните процедури, па дури и целиот систем за администрирање со недвижностите. Токму заради неговата комплексност и широките импликации кои ги има во секој сегмент од администрирањето со недвижности, најчесто се смета за долгорочна цел.

Предложените концепти за регистрација на 3Д ситуации во катастарскиот систем, „3Д Катастар со дополнителни дескрипции за 3Д ситуации“, „Хибриден 3Д катастар“ и „Целосен 3Д катастар“, упатуваат дека долгорочното надминување на ограничувањата на 2Д катастарот е невозможно без систематско тридимензионално моделирање на недвижностите. Дури и кај пристапот „3Д Катастар со дополнителни дескрипции за 3Д ситуации“, каде 3Д содржината не е интегрирана во основниот просторен модел на регистрација на недвижности, таа мора да биде геореференцирана, јасно документирана и технички проверлива за да може недвосмислено да го објасни просторниот опфат на правото. Кај хибридниот модел, 3Д геометријата веќе станува оперативен податок во катастарската база, како дефиниран простор или физички објект, со можност за просторни анализи, преклопување, соседства, пресек со парцели итн. Кај „Целосниот 3Д катастар“, тридимензионално дефинираниот простор е примарна катастарска единица, па се бара највисоко ниво на тополошка коректност и долгорочно одржување на границите во 3Д.

За да се реализира ваква регистрација, неопходно е да се воспостави методологија и стандардизирани процедури кои ќе ги дефинираат:

- изворите на податоци (TLS, UAV-LiDAR, SLAM и Scan-to-BIM),
- процесирањето и контролата на квалитет (регистрација, геореференцирање, филтрирање, извештаи за точност и метаподатоци),
- правила за ниво на деталност (LOD) и минимален сет на атрибутни податоци,
- формати и интероперабилност (за BIM и GIS), и
- поврзување со регистрираните права преку стандардизиран модел на податоци (LADM), вклучително и постапки за ажурирање низ животниот циклус на недвижностите.

Само со ваква стандардизирана рамка, 3Д моделирањето станува практично применливо во катастарскиот систем, што ќе придонесе за јасна, детална и недвосмислена регистрација на недвижностите и правата врз нив.

5. АКВИЗИЦИЈА НА ПРОСТОРНИ ПОДАТОЦИ ЗА 3Д МОДЕЛИРАЊЕ

Аквизицијата на просторни податоци претставува темелна фаза во развојот на секој доверлив 3Д модел, бидејќи квалитетот на влезните податоци директно влијае врз геометриската точност, семантичката интерпретација, нивото на деталност и употребливоста на конечниот модел во понатамошни анализи и апликации. Во контекст на современите просторни и инженерски работни текови, *аквизицијата е систематски процес на планирање, мерење, контрола и документирање, насочен кон формирање на репрезентативен дигитален запис за реалниот простор* (Shan & Toth, 2018; Vosselman & Maas, 2010).

Значењето на оваа фаза е особено изразено кај 3Д модели наменети за BIM-GIS интеграција, каде што од податоците се очекува истовремено да обезбедат висока геометриска веродостојност (за моделирање на објектите), просторна усогласеност (за геореференцирање и интеграција во GIS), и доволна тематска и структурна информативност (за атрибути, класификација и функционални анализи). Во такви услови, изборот на технологија за аквизиција не може да се сведе само на критериумот „најголема точност“, туку мора да се усогласи со намената на моделот, очекуваното ниво на деталност, типот на објект и околина, временските ограничувања и барањата за интероперабилност (Tang et al., 2010; Volk et al., 2014; Noardo et al., 2020).

5.1. Концептуални основи на аквизиција на податоци за 3Д моделирање

Аквизицијата на просторни податоци за 3Д моделирање може да се дефинира како процес на добивање геометриски, радиометриски и семантички податоци за објекти и просторни феномени, со цел нивна дигитална репрезентација во координатен систем погоден за анализа, моделирање и размена.

Од методолошки аспект, клучна е разликата меѓу мерење и моделирање. *Мерењето обезбедува дискретни или континуирани набљудувања на реалноста, додека 3Д моделот е интерпретирана, структурирана и често генерализирана репрезентација која зависи од целта на примената.* Оттука, за истата сцена може да се реализира аквизиција на просторни податоци со многу висока густина, но конечниот модел сепак да има пониско ниво на деталност поради намерна генерализација, семантичко групирање или технички ограничувања на целиот формат (Biljecki et al., 2016; Kolbe, 2009).

За потребите на 3Д моделирање, аквизицијата треба да се планира во однос на неколку меѓусебно поврзани барања:

- геометриска точност (колку блиску е измерената позиција до референтната, вистинската позиција),
- прецизност, повторливост (стабилност на мерењата при повторување),
- резолуција и густина на податоците (просторна „фреквенција“ на мерење),
- комплетност (степен на покриеност на релевантните површини и објекти),
- семантичка употребливост (можност за класификација и интерпретација),

- просторна референца (геореференцирање и вертикална усогласеност),
- метаподатоци и податоци за квалитет (параметри на снимање, калибрација, услови, контроли).

Во контекст на BIM-GIS, овие барања добиваат дополнителна тежина, бидејќи податоците треба да поддржат и инженерско моделирање на елементи (сидови, плочи, отвори, конструкции) и просторна интеграција (терен, околина, инфраструктура, парцели, тематски слоеви). Затоа, „соодветноста“ на аквизицијата се оценува не само преку метрички индикатори, туку и преку способноста на податоците да се трансформираат во интероперабилни модели (IFC, CityGML/Geodatabase) без значајно губење на значењето и просторната конзистентност (ISO/TR 23262:2021; Noardo et al., 2020).

5.2. Ласерска технологија како основа за современа 3Д аквизиција

Примената на ласерската технологија во аквизицијата на просторни податоци започнува во втората половина на XX век, непосредно по развојот на првиот ласер во 1960 година. Првично, ласерот бил воведен како извор на монохроматска и насочена светлина користена кај геодетските инструменти за мерење на растојанија. Најраните примени се поврзани со ласерските должиномери кои како додатоци се монтираа на теодолити, кои овозможува директно и брзо мерење на должини со поголема точност од класичните оптички методи. Со технолошкиот напредок, ласерот станува интегрален дел од тоталните станици, каде се комбинираат електронско мерење на растојание и мерењата на агли, што овозможува целосна дигитализација на теренските мерења. Во 1980-тите и 1990-тите години се појавија рачните ласерски мерачи на растојание, кои ја направиле прецизната ласерска технологија достапна и апликативна во секојдневната реализација на проекти каде геометријата и просторната позиција на објектите има значајна улога.

Клучната револуција доаѓа со развојот на ласерското скенирање, кое овозможува масовна и автоматска аквизиција на милиони точки, од објекти и нивната околина, во секунда. По последната декада, примената на **LiDAR (Light Detection and Ranging)** технологијата во аквизицијата на просторни податоци е во континуирана и нагорна линија, применлива во голем број на области во геодезијата. Цела оваа еволуција на примената на ласерската технологија покажува дека истата станала нераскинлив дел од геодетската мерна технологија што фундаментално го промени начинот на кој геодетските инженери ги реализираат поставените задачи во контекст на позицијата и геометријата на објектите.

5.2.1. Системи за ласерско скенирање

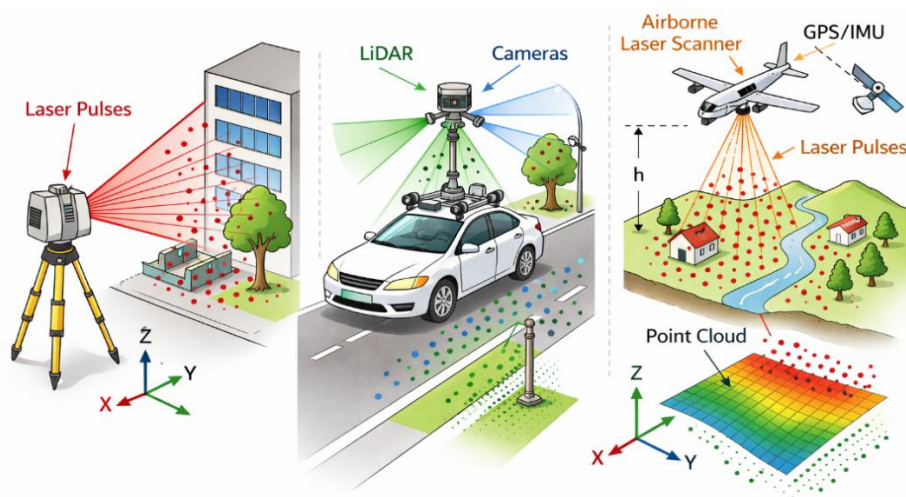
Ласерското скенирање денес претставува една од најнапредните технологии за аквизиција на просторни податоци во геодезијата. Неговата примена се базира на комбинација од прецизни методи за мерење на растојание, добро дефинирани оптички и механички процеси за насочување на ласерскиот зрак и напредни електронски и сензорски системи кои овозможуваат интегрирано толкување на податоците во просторот. Во современи услови, ласерското скенирање се развива во технологија која не само што ги заменува традиционалните методи на мерење, туку и овозможува создавање *густ, детален и структурно богат облак од точки* кој може да се користи за разновидни цели.

Основната предност на ласерското скенирање произлегува од неговата способност да врши **директно тридимензионално снимање преку испраќање и регистрирање на ласерски импулси**. Принципот е универзален: ласерски зрак се испраќа кон површина, од која дел од светлината се одбива и се враќа назад кон инструментот, каде се регистрира неговото пристигнување. Во зависност од применетата технологија, растојанијата до точките се одредуваат преку мерење на времето кое му е потребно на импулсот да го мине патот до објектот и назад, преку анализа на фазната разлика меѓу испратениот и примениот сигнал, или преку триангулациска постапка во која се користи фиксна геометрија на изворот и детекторот на ласерскиот зрак. Независно од избраниот принцип, сите овие методи се насочени кон пресметување на прецизни 3Д координати на површините во опкружувањето.

За геодетски цели, ласерското скенирање се реализира преку инструменти и системи кои се состојат од неколку клучни компоненти. Овие компоненти заедно го формираат интегрираниот систем кој ја изведува целокупната операција на мерење. Во основа, секој ласерски скенер, меѓу другото, се состои од:

- **ласерски извор на светлина,**
- **оптички систем за проекција,**
- **детектор, и**
- **механички систем за насочување на зракот.**

Освен овие основни елементи, некои скенери, особено оние кои работат од подвижни платформи, интегрираат дополнителни сензори, како што се GNSS приемници за определување на апсолутната позиција и IMU единици за мерење на ориентацијата и динамиката на платформата. Во современите системи, сите овие компоненти се усогласуваат преку електронски и софтверски модули кои ја обезбедуваат потребната синхронизација и обработка на податоците во реално време.



Слика 5.1. TLS vs. MMS vs. ALS

Разбирањето на овие компоненти е клучно, бидејќи начинот на кој тие се интегрирани ја определува класата и функционалноста на ласерскиот систем. Геодетските системи за ласерско скенирање можат да се поделат на неколку главни

категории, кои произлегуваат од нивната платформа, подвижност, метод на позиционирање и тип на примена. Во трудот се дискутирани трите најважни групи:

- *терестрички ласерски скенери (TLS),*
- *мобилни ласерски системи (MMS), и*
- *ласерски системи за скенирање од воздух (ALS).*

5.2.2. Терестрички ласерски скенер (TLS)

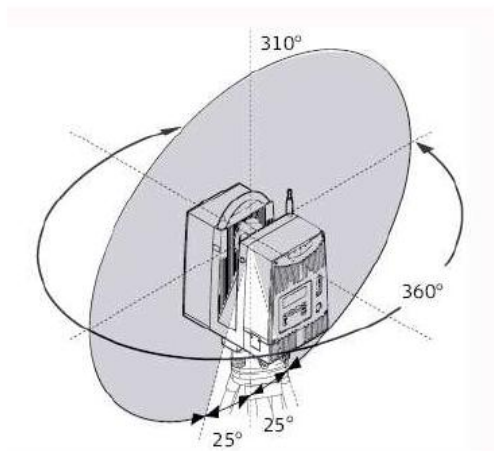
Терестричките ласерски скенери (TLS) претставуваат една од најпрецизните и најстабилните технологии за тридимензионално снимање на објекти и затворени простори кои имаат голема примена во геодезијата, градежништвото и архитектурата. TLS системите овозможуваат директна, високо детална и геометриски блиска до реалниот модел, репрезентација на физичките структури преку создавање густ облак од точки кој содржи координати и атрибутни податоци за секоја снимена точка. Поради нивната способност да обезбедат точност на ниво од неколку милиметри, TLS инструментите се сметаат за стандардна алатка при снимање објекти со сложена геометрија и потребна голема геометриска прецизност (Vosselman & Maas, 2010).



Слика 5.2. Терестрички ласерски скенер (TLS)

Терестричкиот ласерски скенер (TLS) претставува најстабилна и најпрецизна категорија од расположливите системи за ласерско скенирање кои стандардно се користат во геодезијата. Овој тип на скенери функционира така што снимањето го реализира од фиксна позиција, поставен на статив, при што скенирањето се изведува преку целосна или делумна ротација на LiDAR сензорот. Принципот на работа вклучува контролирана комбинација од хоризонтална ротација на инструментот и вертикално отклонување на зракот преку ротирачко или осцилирачко огледало. На овој начин TLS врши скенирање на околината, при што, најчесто ротацијата на главата на скенерот во хоризонтална смисла изнесува 360° , додека опсегот на скенирањето во вертикална смисла е приближно помеѓу 270° – 300° , карактеристики кои се директно зависни од конструкцијата на самиот скенер. Делот од просторот кој не може да се скенира е оној кој е покриен од постојето и стативот на кој е поставен инструментот. Кога инструментот е поставен на статив, висината на инструментот во однос на теренот изнесува околу 1,5 m,

а опсегот на скенирање изнесува 270° , тогаш се работи за мал круг со дијаметар од околу 3 m околу инструментот кој не е опфатен со скенирањето.



Слика 5.3. Геометрија на видното поле (Field of View) на TLS

Хоризонтална ротација

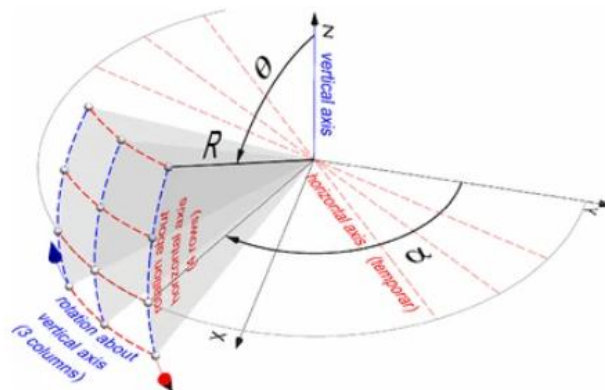
Кај повеќето терестрички скенери, целата глава на инструментот се ротира околу вертикалната оска, што овозможува комплетна 360° покриеност во хоризонталната рамнина. Оваа ротација е изведена со помош на серво мотори, додека аголните мерења се реализираат со високо прецизни енкодери кои овозможуваат секундна точност на аголните мерења, што значи дека дури и минималните промени во аголот се прецизно регистрирани.

Една од клучните предности на хоризонталната ротација е униформноста во аголната распределба. Со оглед на тоа дека TLS инструментите најчесто снимаат во рамномерни аголни чекори, ова овозможува создавање на облак од точки со стабилен просторен распоред. На тој начин, без оглед на тоа дали скенерот работи со мала или висока густина, координатите на секоја поединечна точка се определуваат врз база на прецизно измерени агли, хоризонтален и вертикален, и измерена должина, што овозможува висок степен на метричка сигурност.

Вертикално отклонување на зракот

Вертикалното отклонување на зракот кај терестричките скенери обично се постигнува преку осцилација или ротација на внатрешно огледало. Додека хоризонталната ротација е бавна и стабилна, вертикалната осцилација е многу побрза, што овозможува скенерот да испрати голем број импулси за краток временски период. Вертикалните линии кои се создаваат на овој начин се комбинираат со хоризонталната ротација за да формираат 3Д мрежа од точки.

Механизмот на вертикална осцилација е особено значаен затоа што обезбедува густо вертикално скенирање. Осцилирачкото огледало типично работи со фреквенции од неколку стотици до неколку илјади херци, при што секоја осцилација создава нов вертикален „профил“. На овој начин, TLS може да создаде детален пресек на објектот во секој хоризонтален агол.



Слика 5.4. Шематски приказ на вертикалното отклонување на ласерскиот зрак

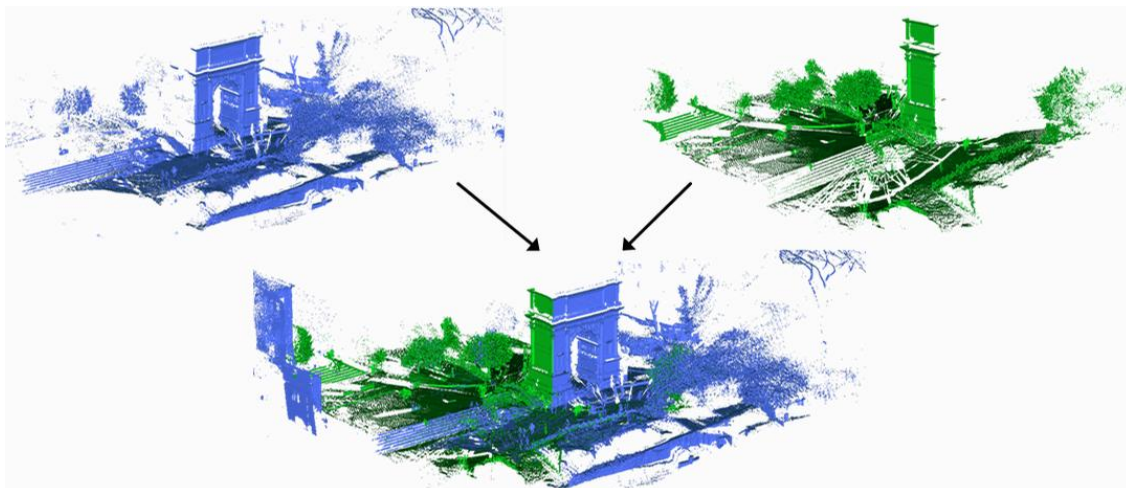
Предностите на можноста за вертикално отклонување на терестричкиот скенер се:

- висока брзина на снимање,
- голем опсег на вертикални агли,
- стабилна репродукција на вертикалните точки,
- можност за снимање на високи структури или терени со големи денивелации.

Во пракса, вертикалното скенирање претставува критичен дел во процесот затоа што од него зависи резолуцијата во вертикален правец на моделот. Поголемата аголна резолуција во вертикалното отклонување овозможува терестричките скенери да создадат детални модели на објекти со поголема висина, посебно значајно кај високите делови од објектите.

При терестричкото ласерско скенирање, секоја поединечна станица на снимање може да биде реализирана во локален, државен или глобален координатен систем, зависно од начинот на поставување на инструментот и достапноста на геодетската мрежа. За да се добие еден кохерентен облак од точки, метрички стабилен и употреблив за понатамошни просторни анализи, неопходно е сите поединечни скенови да се усогласат и интегрираат во единствен координатен систем. Ова подразбира внимателно планирање на снимањето (поставување на станиците, избор на маркери, видливост меѓу позиции и меѓусебен преклоп на поединечните скенови), но и соодветна обработка во постпроцесирање.

Процесот преку кој повеќе облаци од точки, добиени од различни позиции на инструментот, се спојуваат во еден единствен облак од точки се нарекува регистрација. Регистрацијата вклучува усогласување на координатните системи, и овозможување точките прецизно да ја презентираат реалната просторна позиција на објектите. Како резултат на тоа, регистрацијата претставува фундаментален чекор кој обезбедува интегритет на податоците и овозможува финалниот облак да биде стабилен, точен и применлив во инженерски и геодетски апликации.



Слика 5.5. Концептуален приказ на регистрација на облаци од точки

Методите за регистрација на облаците од точки може да се поделат во неколку категории, во зависност од тоа дали се користи геодетска мрежа, поставени маркери или алгоритамски пристап.

Првиот метод се темели на поставување на TLS скенерот над геодетска точка со познати координати, по што следува ориентација кон друга позната точка. Во овој класичен геодетски пристап, координатите на инструментната точка и ориентациониот правец овозможуваат скенот веднаш да се трансформира во државниот координатен систем (Vosselman & Maas, 2010). Овој метод обезбедува висока почетна точност, но бара добра геодетска мрежа и визуелна поврзаност со ориентационата точка.

Втор пристап е регистрацијата со маркери (targets). Кога маркерите имаат познати координати, нивната површина или центар се детектира автоматски во облакот, по што се применува 3Д трансформација (најчесто седумпараметарска Хелмертова трансформација) за усогласување на сите скенови (Soudarissanane, 2016). Овој метод обезбедува многу висока точност, особено кога маркерите се поставени на добро распоредени позиции (различни висини, неколинеарни точки).

Маркерите може да имаат и непознати координати, при што служат како референтни точки за меѓусебно поврзување на скеновите. Во таков случај се изведува релативна регистрација, а глобалната се постигнува дополнително преку GNSS, тотална станица или други апсолутни техники.

Кога објектите и околината која се скенира, нуди доволно геометриски карактеристични елементи, регистрацијата може да се спроведе и со cloud-to-cloud техники како ICP (Iterative Closest Point), кои автоматски ги усогласуваат преклопените површини (Besl & McKay, 1992). Најчесто, најдобри резултати се добиваат со хибриден пристап, комбинација од таргети и ICP, кој обезбедува стабилност, точност и минимална акумулација на грешки.

5.2.3. Мобилни ласерски скенери (MMS)

Мобилните ласерски скенери (Mobile Mapping Systems – MMS) претставуваат напредни системи монтирани на подвижни платформи, автомобили, специјализирани

возила, возови, бродови, па дури и ранци за пешачко снимање. За разлика од терестричките ласерски скенери (TLS), кои работат од фиксна позиција, MMS овозможуваат непрекинато собирање на податоци во движење, што значително го зголемува просторното покривање и ја забрзува аквизицијата на просторни податоци. Оваа можност ги прави MMS системите исклучително ефикасни за снимање на патна инфраструктура, урбани средини, железнички траси или тунели, при што во реално време може да се документираат километарски коридори (Barber et al., 2008).



Слика 5.6. Мобилен ласерски скенер поставен на возило

Функционирањето на MMS се заснова на истите физички принципи како TLS, емисија на ласерски импулс, прием на повратниот сигнал и пресметка на растојание, но е методолошки посложено поради динамичката природа на платформата. Ласерскиот скенер мора да ги компензира сите промени во положбата и ориентацијата што се случуваат во текот на движењето. Клучна улога игра IMU единицата, која го мери забрзувањето и аголната брзина со висока фреквенција од 100 до 500 Hz, обезбедувајќи непрекината информација за *roll*, *pitch* и *yaw* (Kealy et al., 2011). Комбинирано со GNSS, кој обезбедува апсолутна позиција во глобален координатен систем (најчесто ETRS89), се добива примарниот систем за позиционирање. Енкодерите на возилото дополнително ја подобруваат одометриската точност, особено во урбани услови каде GNSS сигналот е нарушен.

Ласерскиот скенер, најчесто со полигонално огледало поради неговата способност за висока фреквенција на отклонување, генерира облак од точки со милиони точки во секунда, задржувајќи стабилна геометриска точност и на поголеми брзини на движење. Ваквиот начин на скенирање, со висока густина на точки, овозможуваат детален тридимензионален модел на улици, фасади и инфраструктурни објекти.

Клучниот технички сегмент што го прави MMS функционален е *sensor fusion*, интегрирање на најголем број сензорски податоци во единствена временски усогласена траекторија. Најчесто за ова се користат проширени Калманови филтри (Extended Kalman Filters – EKF), кои овозможуваат синхронизација на IMU (високофреквентни, но склони кон отклонување) со GNSS (апсолутни, но поретки и чувствителни на прекини). Ласерските податоци исто така играат важна улога во овој процес, бидејќи преку препознавање на статични структури овозможуваат корекција на инерцијалната траекторија кога GNSS сигналот е слаб или недостапен. На тој начин секоја точка добива 3Д позиција во глобален координатен систем.

Во идеални услови MMS системите постигнуваат точност од 1–3 cm, што е доволно за голем број инженерски и урбанистички апликации (Puente et al., 2013). Главната предност на MMS, покрај брзината, е континуитетот на снимањето, нема потреба од поставување инструменти, ориентација, одделни позиции на скенирање и сложени процедури за меѓусебно поврзување на скеновите, како кај TLS. Сепак, MMS технологијата е чувствителна на GNSS сигналот, бара дополнително процесирање и има потреба од висококвалитетен IMU за да се минимизира акумулираното отклонување. Во однос на TLS, се работи за технички понапредна технологија која бара значително поголема експертиза за обработка и интерпретација.

Како заклучок, MMS претставува моќен метод за брза и прецизна аквизиција на просторни податоци во динамична околина, а неговата интеграција со TLS и ALS (UAV-LiDAR) создава комплементарен просторен систем кој овозможува високо ниво на деталност и метричка валидност, како што е неопходно за современите BIM, GIS и инфраструктурни апликации.

5.2.4. Авионско ласерско скенирање (ALS)

Airborne Laser Scanning (ALS) или авионско ласерско скенирање, претставува една од најмоќните технологии за создавање тридимензионални модели на теренот, објектите и вегетацијата. Технологијата се базира на емисија и прием на ласерски импулси од летало, традиционално авион или хеликоптер, при што времето на патување на импулсот се користи за пресметка на растојанието до површината од каде се рефлектира ласерскиот зрак. Кога овие пресметки се комбинираат со стабилизирано позиционирање и ориентација на платформата, се добива густ облак од точки кој опфаќа големи површини со високо ниво на деталност.

ALS системите се состојат од неколку клучни компоненти. Прво, ласерскиот скенер, кој може да емитира од десетици илјади до неколку милиони импулси во секунда и често овозможува регистрирање на повеќе повратни импулси (multiple returns), што е од суштинско значење за снимање на вегетација и терен. Второ, системот за позиционирање, кој се состои од GNSS антена и приемник за апсолутна локација и IMU единица која ги мери аголите промени и забрзувањата на леталото. Овие два извора овозможуваат прецизно определување на положбата и ориентацијата на скенерот во времето кога секој импулс е испратен и примен (Schaer et al., 2007).

Важно е да се истакне дека современите ALS системи многу често вклучуваат и камери за фотограметриско снимање, поставени паралелно со LiDAR сензорите. Овие камери можат да бидат RGB, мултиспектрални или NIR (Near Infrared) и служат за цела низа задачи: создавање ортофото снимки, текстура на 3Д моделите, подобра класификација на облакот од точки, визуелна инспекција, препознавање на материјали и комбинирана анализа на LiDAR и фотограметрија (Leberl et al., 2010). Комбинирањето на овие две технологии овозможува значително повисок квалитет и семантичко збогатување на моделите. LiDAR обезбедува геометрија, додека фотограметријата обезбедува визуелна и спектрална содржина, што е особено важно во некои апликации на просторните податоци.

ALS снимањето е дефинирано од неколку клучни параметри како што се висината на лет, брзината на лет, начин на скенирање во смисла на движење на зракот по теренот и аголот на снимање. Повисоките летови овозможуваат поголемо покривање, но помала

густина на точки, додека ниските летови овозможуваат густина од десетици до стотици точки по квадратен метар. Кај скенирањето со класичните авиони оваа густина е ограничена со брзината на летот, често 150–250 km/h и висината која се движи помеѓу 500 и 3000 m (Vosselman & Maas, 2010). Вертикалната точност зависи од повеќе фактори, но често се движи помеѓу 5 и 20 cm, зависно од платформата и квалитетот на сензорите.



Слика 5.7. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало

Промена на ALS со појавата на беспилотни летала

Појавата на беспилотни летала (UAV) претставува една од најголемите технолошки промени во историјата на ALS. Пред нивната појава, ALS беше ограничен на големи летала, скапи мисии и снимање од големи висини, што ја ограничуваше густината и прецизноста на податоците (Colomina & Molina, 2014). Снимање на мали објекти, градби, индустриски комплекси или било какви локации со мали површини беше практично невозможно или прескапо.

Со UAV платформите, ALS технологијата доживеа револуција. Висините на прелет се намалија на 30–150 m, што овозможи густина, со денешната расположлива технологија, од 200–500 точки по квадратен метар, драматично повисока од традиционалното ласерско скенирање со авион (Wallace et al., 2012). Во исто време, бројот на ласерски импулси се зголеми на над 1 000 000 до 2 000 000 импулси во секунда, а скенерите добија прецизни механизми за насочување, како што се осцилирачки огледала, фазни решетки и мулти-бим конфигурации.

Беспилотните летала овозможија и нови начини на снимање, како *double-grid* летови, кои обезбедуваат снимање под два различни агли, што е особено важно за фасади, вертикални структури и кровни елементи. Ниската висина на лет и стабилноста на платформата овозможуваат снимање дури и на мали архитектонски детали кои претходно беа тешко достапни. Паралелно, интеграцијата на високопрецизни RTK и PPK GNSS системи овозможи облаците од точки да бидат сместени директно во државен координатен систем, што е клучно за геодезијата и геоинформатиката.

Контрола на квалитетот во ALS

Клучен елемент во планирањето на скенирањето, без разлика дали се работи за снимања со класични авиони или беспилотни летала, е преклопот меѓу линиите на летање. Вообичаено се користат 20–40% страничен преклоп и 50–60% напреден преклоп,

додека кај UAV-ALS вредностите често се и поголеми (до 70%) поради пониската висина на лет и потребата од снимање на вертикални фасадни сегменти.

Контролата на квалитетот се спроведува со анализа на вертикалната усогласеност помеѓу точките од два соседни скена кои се преклопуваат, со цел да се откријат систематски отстапувања од IMU, GNSS или калибрациски грешки. Исто така се спроведува проверка на хоризонталната геометрија преку споредба на фасади, рабови и теренски структури, со што се идентификуваат странични поместувања и несогласувања меѓу линиите. Анализата на густината дополнително помага во откривање неправилности во висината на летот или перформансите на скенерот (Vosselman & Maas, 2010). Покрај контролата на податоците добиени од различни прелети, ALS податоците се проверуваат и екстерно, преку Ground Control Points (GCP) чии позиции се прецизно измерени со класични геодетски инструменти. Овие точки обезбедуваат објективна процена на точноста по трите оски, проверка на глобалната трансформација и уверување дека облакот од точки е усогласен и трансформиран во соодветен координатен систем.

Може слободно да се каже дека во последната деценија ALS претставува клучна технологија за аквизиција на просторни податоци, а со појавата на UAV платформите доби ново значење и применливост. Наместо да биде ограничена на скапи и комплексни операции, ALS стана широко достапна, флексибилна и исклучително моќна технологија. Комбинацијата со фотограметриски системи ја подигна вредноста на моделите на ново ниво, овозможувајќи создавање интегрирани репрезентации погодни за GIS апликации и BIM моделирање.

5.2.5. SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*)

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) технологијата претставува фундаментална пресвртница во областа на аквизицијата на просторни податоци, роботиката и навигација на автономните системи. Оваа технологија се појавува во средината на осумдесеттите години на дваесеттиот век, кога истражувачите од областа на роботиката се обидуваат да го решат проблемот на одредување на позицијата на автономните системи во непозната средина, додека во исто време се создава и просторен моделот на истата. Првите формулации на SLAM проблемот се поврзуваат со работата на John Leonard и Hugh Durrant-Whyte, кои го дефинираат концептот во почетокот на 1990-тите и го поставуваат теоретскиот темел на алгоритмот преку стохастички методи и Баесови филтри. Во годините што следуваат, SLAM се развива од теоретски концепт во примарна технологија за автономна навигација, применета кај подводни возила, роботика, автономни возила и секако, во ласерско скенирање при аквизиција на просторни податоци.

Примената на SLAM во геодетските снимања добива на значење по 2010 година, со развојот на компактни, брзи и високо-фреквентни LiDAR сензори монтирани на рачни уреди. Со појавата на ваквите системи, снимањето на ентериери и комплексни простори доживува радикална трансформација. Наместо поставување на голем број станици со терестричкиот ласерски скенер (TLS), алгоритмот на SLAM уредот со движење и скенирање низ просторот или објектот, автоматски ја реконструира траекторијата и околината. Овој метод овозможува снимање на затворени простории, тесни коридори, скали, технички простории и подруми со брзина која претходно беше невозможна. SLAM технологијата претставува револуција и во моделирањето на објектите, бидејќи

обезбедува континуирани, стабилни облаци од точки кои значително го забрзуваат процесот Scan-to-BIM.

Скенирањето на објекти со SLAM скенерите секогаш започнува со формирање на иницијалниот скен и воспоставување локален координатен систем. Првата позиција на скенерот (позиција и ориентација) на сензорот се дефинира како почетна, референтна, обично со координати (0,0,0). За разлика од TLS и ALS, каде позицијата е позната од GNSS или од станичната точка со познати координати, SLAM ги нема овие податоци кои го сместуваат во некој претходно дефиниран координатен систем (на пример, државен координатен систем). Затоа, целиот процес и позиционирање на сите наредни скенови е релативен, односно секој нов скен се позиционира во однос на претходното движење и веќе скенираните геометриски структури. Ова ја прави технологијата автономна и независна од востановените геодетски мрежи. Особено кај ентериерните скенирања, каде нема GNSS сигнал, SLAM овозможува целокупното снимање да се спроведе без надворешни сензори или подготовка на теренот.

Недостаток на овој пристап на релативно референцирање на секој нареден скен е систематско отклонување на облакот од точки од нивната реалната позиција, што на подолги траектории може да резултира со постепено изместување на моделот. Затоа, SLAM алгоритмите мора да користат дополнителни механизми за корекција, како затворање на јазли (loop closure).

Основата на функционирањето на SLAM алгоритмот е перцепцијата, односно способноста системот да ја реконструира и разбере тридимензионалната структура на околината врз основа на континуирано LiDAR скенирање. Секој емитиран импулс, по враќањето до сензорот, се регистрира како точка со координати во локалниот координатен систем на уредот, и на тој начин формира густ облак од точки кој ја опишува геометријата на околината. Врз основа на облакот од точки со кој се дефинира геометријата на околината, SLAM алгоритмот идентификува карактеристични геометрии кои пак претставуваат стабилни и повторливи елементи од просторот. Најчесто тоа се: рабови, остри линии, рамнински структури, агли, вертикални носиви елементи, хоризонтални конструктивни елементи (греди, плочи), отвори (врати и прозорци) и криволиниски форми. Овие елементи се сметаат за „природни маркери“, бидејќи овозможуваат сигурна идентификација на локацијата при последователни скенирања (Zhang & Singh, 2014).

Препознавањето, детекцијата, на карактеристични геометриски облици, претставува критичен чекор во локализацијата, односно во одредувањето на позицијата на скенерот. Во современите SLAM системи се издвојуваат два фундаментални пристапи:

- feature-based SLAM, кој се потпира на експлицитно издвојување на рабови и рамнини за потребите на регистрација, и
- direct (dense) SLAM, кој работи со целокупниот облак од точки без селекција на карактеристики, минимизирајќи ги разликите помеѓу последователните скенови.

Во геодетските LiDAR-SLAM уреди доминира feature-based пристапот, бидејќи нуди повисока метричка стабилност, пониска чувствителност на шум и подобра воспоставеност на релативната геометрија (Cadena et al., 2016).

Клучен елемент во функционирањето на секој SLAM систем е способноста да ја процени сопствената промена на положбата помеѓу последователни скенирања. Бидејќи

SLAM скенерите работат без надворешни референтни точки, системот мора автономно да одреди како уредот, а со тоа и операторот што го носи, се движел низ просторот. Процената на движењето претставува фундаментот врз кој се надградуваат локализацијата и формирањето на облакот од точки, а грешките во процената на движењето директно ја нарушуваат геометриската стабилност на целиот модел (Thrun et al., 2005).

Важен сегмент во целиот алгоритам претставува LiDAR одометријата, која ја проценува промената на положбата преку анализа на разликите меѓу два последователни облаци од точки. Алгоритмот ги идентификува стабилните геометриски структури (рамнини, рабови, агли) и го пресметува најверојатното поместување што ги усогласува двата облаци. На пример, ако сите видливи површини во вториот облак се појават поместени надесно, системот логично заклучува дека сензорот се придвижил налево. Овој процес често се реализира со варијанти на ICP или feature-based усогласување, што овозможува висока прецизност на релативните поместувања, но е чувствителен на шум и на големи дисконтинуитети во геометријата (Zhang & Singh, 2014).

Inertial Measurement Unit (IMU) обезбедува паралелна процена на движењето преку мерење на аголните брзини (gyroscope) и линеарните забрзувања (accelerometer), а кај некои системи и ориентацијата во однос на магнетното поле (magnetometer). Придобивка на IMU е неговата висока фреквенција на обновување на податоците (100–500 Hz), што овозможува континуирана и стабилна реконструкција на движењето дури и кога системот нема идентификувано доволно карактеристични геометриски облици е за сигурна регистрација на последователните скенови. Сепак, IMU одометријата е подложна на акумулирање грешки, т.н. drift, или акумулирано отклонување, што значи дека малите отстапувања во мерењето, со текот на времето, можат да доведат до значително искривување или отклонување на траекторијата (Scaramuzza & Siegwart, 2008). Современите SLAM системи користат комбинирана одометрија, во која IMU обезбедува иницијална, брза и континуирана процена, а усогласувањето врз основа на облаците од точки ја коригира акумулираната грешка. Комбинираниот пристап овозможува висока временска резолуција и стабилност, при што LiDAR ја обезбедува метричката точност, а IMU го обезбедува континуитетот на движењето (Cadena et al., 2016). Меѓутоа, дури и со фузија на податоци од овие два сензори, акумулираното отклонување не може целосно да се елиминира. Затоа е неопходен SLAM концепт на затворање на јазли, кој преку препознавање на веќе посетени локации ја оптимизира целата траекторија и ја минимизира акумулираната грешка.

Критичен сегмент од SLAM обработката е локалната регистрација на облаците од точки, односно процесот преку кој секој нов облак од точки се усогласува со претходниот, со цел да се формира непрекината, геометриски исправна траекторија. Овој чекор е основата врз која се гради целосниот, интегрираниот облак од точки, а неговата стабилност директно влијае врз акумулацијата на грешки во системот. Во најголем дел од современите LiDAR-SLAM системи, локалната регистрација се реализира преку комбинација од ICP, feature-based методи и хибридни решенија (Cadena et al., 2016). Современите SLAM решенија најчесто се потпираат на feature-based усогласување. Наместо да се споредуваат сите точки, алгоритмот експлицитно извлекува стабилни геометриски структури како: рабови (edge features), рамнини (planar patches), агли и пресекувања, вертикални и хоризонтални структури. Овие карактеристики претставуваат многу појак и поотпорен сет на податочни елементи, што овозможува брза и робусна

регистрација дури и во динамички средини или делумно непознати простори (Zhang & Singh, 2014). Feature-based пристапот исто така значително ја намалува сложеноста на пресметување.

Крајната цел на SLAM пристапите е секој нов скен да биде прецизно позициониран во однос на претходниот. Со цел да се обезбеди глобалната стабилност, се користи механизмот *loop closure* кој е од исклучителна важност за добивање геометриски валиден облак од точки. *Loop closure* претставува принцип на контрола и корекција кој се активира кога системот препознава дека скенерот се вратил во претходно посетена локација. Во тој момент алгоритмот идентификува:

- дека сегашниот облак од точки припаѓа на простор веќе присутен во базата на скенирани делови од објектот,
- дека моменталната позиција би требало да биде блиска со првичното решение,
- дека постојат несогласувања поради акумулираните грешки во проценетата траекторија.

Овој процес започнува со детекција на преклоп (*overlap detection*), при што алгоритмите како *scan-context*, *feature-matching* или *place-recognition* техники го идентификуваат повторно посетениот сегмент (Kim & Kim, 2018).

Откако ќе се утврди дека е затворен кругот и посетена повторно иста локација, SLAM системот:

- пресметува оптимална ротација и translација помеѓу тековниот и претходниот скен,
- утврдува колкава е акумулираната грешка и
- ја распределува корекцијата низ целата траекторија.

Резултатот од еден ваков принцип на работа и алгоритамска конструкција е драматично подобрување на точноста и конзистентноста на целиот модел. Просторните искривувања се елиминираат, долгите ходници се исправуваат, затворените простории се повторно геометриски кохерентни, а целиот облак од точки добива јасна структура. Без *loop closure*, SLAM би можел да понуди точна локална геометрија, но би бил неспособен да изгради глобално стабилен модел. Затоа *loop closure* се смета за централен принцип во модерните SLAM системи.

По процесите на локализација, корекција на акумулираното отклонување и глобална оптимизација преку примена на концептот на затворање на јазли, SLAM алгоритмот генерира детална тридимензионална претстава на просторот. Резултатот е единствен координатен систем, во кој целата траекторија на скенирање е усогласена со просторот. Овој координатен систем не е глобален, туку локално дефиниран во однос на почетната позиција на скенерот, карактеристика типична за сите LiDAR-SLAM системи (Cadena et al., 2016). Доколку уредот е опремен со RTK модул, како што е сè почесто случај со современите рачни скенери, SLAM решението може да биде директно референцирано во државен или глобален координатен систем. Во спротивно, потребно е дополнително геореференцирање, кое најчесто се изведува со измерени референтни точки или усогласување во однос на облак од точки кој веќе е сместен во посакуваниот координатен систем.

Прецизноста на облаците од точки добиени со SLAM скенирање варира зависно од средината и употребениот уред. Вообичаените точности кои се постигнуваат се следните:

- во внатрешност на објекти, 1–3 cm, каде геометриските структури овозможуваат стабилна регистрација,
- надворешност на објекти, кај уред без RTK, 3–6 cm, поради ограничена структурност и акумулирано отклонување,
- надворешност на објекти, кај уред со RTK, 2–3 cm, поради ограничена структурност и акумулирано отклонување.

Овие точности ги прават SLAM облаците исклучително погодни за Scan-to-BIM процеси, бидејќи обезбедуваат реална метричка основа за моделирање на ентериери, габарити на објекти и комплексни 3Д структури, особено кога се комбинираат со TLS и UAV LiDAR за целосна реконструкција на објектот.

Современите SLAM системи доведоа до една од најзначајните промени во аквизицијата на просторни податоци во последните две децении. Традиционално, ентериерното снимање се изведуваше со терестрички ласерски скенери (TLS), кои иако нудат исклучително висока метричка точност, бараат комплексна организација на снимањето, што опфаќа поставување на геодетска мрежа, внимателно позиционирање на стативи, поставување маркери, мерења за ориентација, процес кој одзема време. Во сложени објекти, овој процес може да биде времено и логистички тежок, бидејќи секоја станица мора да се регистрира одделно, а покривањето на сите делови од ентериерот може да бара мерење од стотици станици (Vosselman & Maas, 2010).

Појавата на LiDAR-SLAM технологијата драматично го трансформира овој процес. Со интеграција на брзи LiDAR сензори, IMU единици и оптимизација во реално време, снимањето стана мобилно, континуирано и неколкукратно побрзо. SLAM технологијата овозможува операторот да се движи нормално низ просторот, додека уредот во континуитет формира непрекинат облак од точки. На тој начин, традиционалната TLS логика на снимање, станица по станица, е заменета со континуирано скенирање, со што ентериерното снимање стана: значително побрзо (5–10 пати во однос на TLS), полесно за логистичка подготовка, без потреба од стативи, маркери или геодетска мрежа, без зависност од GNSS сигнал, достапно за снимање на сложени и долги простори (ходници, скали итн.), погусто поради континуираното движење и евентуално повторување на локациите (50–300 точки/m²). Дополнително, SLAM природно создава континуиран облак од точки без празнини, нешто што кај TLS често бара голем број дополнителни станици за покривање на празнини во геометријата, поради скриени зони кои не биле достапни во текот на скенирањето. Оваа промена ја направи технологијата идеална за Scan-to-BIM процеси, корисни во 3Д катастар, архитектура, инженерство, машинство итн.

Иако SLAM технологијата донесе драматично подобрување во брзината и ефикасноста на ентериерното и габаритното снимање, има одредени ограничувања кои произлегуваат од природата на алгоритмот. За стабилно функционирање, SLAM скенерите се потпираат на присуство на карактеристични геометриски форми што може да ги препознае и да ги користи како референтни. Треба да се напомене дека кај габаритното снимање, овие структури не се секогаш присутни или доволно изразени.

Во надворешни средини со еднолична морфологија, примената на LiDAR-SLAM често е проследена со намалена стабилност и пониска точност на регистрацијата.

Причината за тоа е што рамните фасади без изразени архитектонски детали, како што се стаклени површини, еднолични сидови или големи индустриски објекти, содржат ограничен број геометриски карактеристики што можат да се користат како сигурни референтни елементи. Во отсуство на доволно рабови, агли и други просторни особености, алгоритмите потешко воспоставуваат стабилна одометрија и конзистентно усогласување на последователните облаци од точки.

Сличен проблем се јавува и кај отворени простори, како што се паркинзи и дворни површини, каде бројот на статични објекти и препознатливи форми е релативно мал. Недостатокот на јасно дефинирани обележја ја намалува можноста за сигурна регистрација и ја зголемува зависноста од проценетата траекторија на движење, со што се зголемува ризикот од акумулација на грешки. Дополнителна сложеност создаваат и високите објекти, бидејќи сензорот најчесто регистрира само ограничен дел од нивните фасади, додека повторливоста на вертикалните линии ја отежнува нивната меѓусебна диференцијација. Воедно, повисоките делови од објектите често остануваат надвор од ефективниот опсег на снимање, што резултира со непотполна геометриска репрезентација.

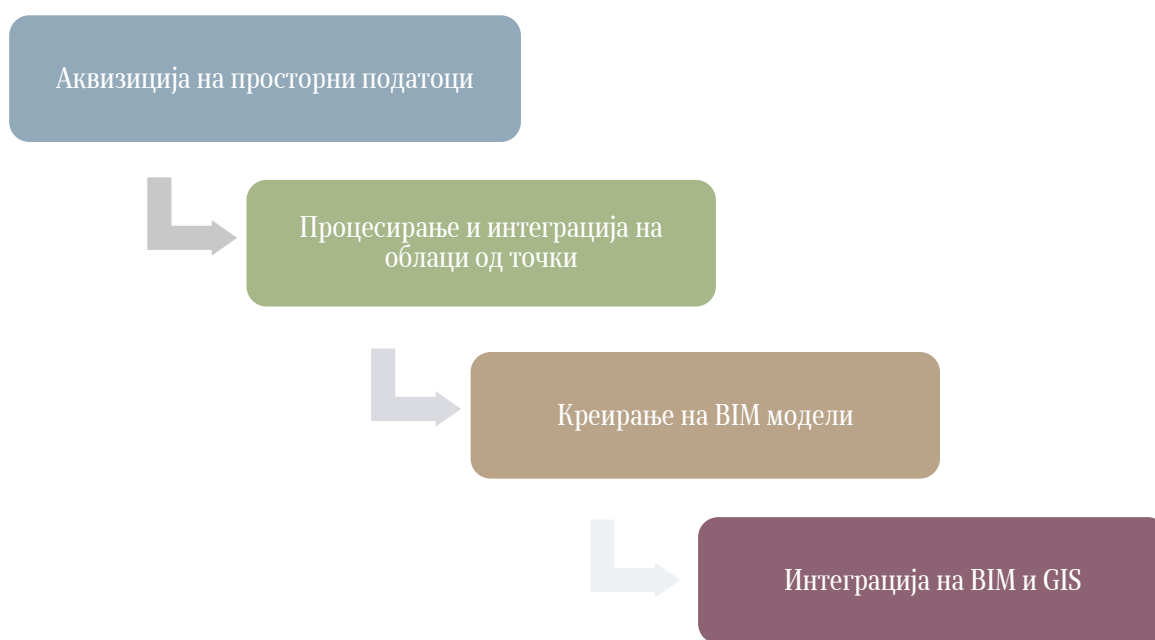
Точноста на системот може дополнително да се наруши и под влијание на амбиенталните услови. Кај одредени LiDAR сензори, силната сончева светлина може да предизвика зголемување на шумот, што негативно се одразува врз сигурноста на детекцијата и прецизноста на повратниот сигнал. Особено неповолни се и сценаријата со долги праволиниски траектории на движење, карактеристични за габаритно снимање, каде изостанува можноста за затворање на јазли. Бидејќи токму преку ваквите јазли SLAM алгоритмите ја коригираат траекторијата и ја ограничуваат акумулацијата на грешки, нивното отсуство доведува до постепено влошување на позициската конзистентност. Во такви услови, класичните LiDAR-SLAM системи често покажуваат поголеми отстапувања, особено во хоризонталната компонента. Појавата на RTK-SLAM уреди значително ги подобри перформансите во габаритното скенирање. Вградените GNSS-RTK приемници обезбедуваат директно глобално позиционирање на секоја точка од траекторијата, со што се минимизира акумулацијата на грешките и се подобрува стабилноста дури и во подрачја со геометрија на објектите која не е најсоодветна за SLAM скенирање. RTK обезбедува:

- глобално усогласување на целата траекторија,
- стабилна надворешна локализација,
- едноставно спојување со UAV-LiDAR и TLS податоци,
- значително намалено акумулирано отклонување во отворени простори.

Со ова, RTK-SLAM стана практична алтернатива за габаритно снимање, особено кога комбинираниите резултати треба да се интегрираат во државен координатен систем.

6. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ИНТЕГРИРАЊЕ НА BIM И GIS

Интегрирањето на изградени технологии со самостојни амбиенти на функционирање за истражувачите претставува предизвик и обврска за воспоставување на здрави фундаменти врз кои ќе се градат принципите и стандардите за нивна блискост и интеграција. Во овој труд следејќи и отворајќи ги овие намери кон семантиката на насловната формулација на трудот беа земени како основа за развој на методолошката пристапност и алгоритамската конструкција, сè со намера интеграцијата да има суштина и егзактни резултати. Да се интегрираат технологии какви што се ласерското скенирање, BIM и GIS во основа бара јасно дефинирана низа од чекори, кои овозможуваат систематска трансформација на оригинални, постојни просторни податоци добиени од реален феномен, проследени преку тридимензионални, правно и технички значајни модели. Овој пристап овозможува добивање на сеопфатни 3Д дигитални репрезентации на објекти и простор, кои можат да се применат за различни намени, од урбанистичко и инфраструктурно планирање, преку анализа на ризици, до управување со недвижности. Ваков тип практикувања бара пред сè еднозначна конструкција на податочната осмисленост врз кои еднозначно можат да се пласираат сервисни ангажмани како доминантна потреба и иницијатива за технолошки надградувања за зголемена ефикасност и исплатливост во практичната нивна имплементација.



Слика 6.1. Методологија за интегрирање на ласерско скенирање, BIM и GIS

Методолошката рамка на истражувањето внимателно е структурирана со вградени условувања кои го опфаќаат целиот процес за создавање на интегриран BIM-GIS систем. Методолошки гледано, пристапот ги постави и претпазливо ги обработи условите и пристапноста за прибирање на просторни податоци, нивната обработка и моделирање, до интеграција и анализа во просторна средина. Методологијата се состои од четири главни методолошки фази: *аквизиција на просторни податоци, процесирање и интеграција на просторните податоци добиени со примена на различни методи на*

аквизиција, моделирање во BIM околина и интеграција на модели во GIS околина, кои како континуирана и хиерархиска организација се прикажани на Слика 6.1.

Во првата фаза, почитувајќи го концептот и значењето дека податокот е фундамент во секој процес од просторните моделирања, методолошки е даден приоритет во обезбедувањето на податоците. Оттука, методолошки се поставени аквизициските пристапи преку кои конструктивно се обезбедува просторниот податок чија ориентација е во согласност со алгоритамските и процесните уредувања на излезните модели. Во таа насока, се дефинирани критериуми за оценување на стабилноста, отвореноста, густината и прецизноста во единствена референтност за секој податок во проектното подрачје. Во рамки на оваа фаза се разработуваат најсовремени технологии за аквизиција на просторни податоци како LiDAR (Light Detection and Ranging) и SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) технологија.

LiDAR скенирањата технолошки се реализираат со користење на различни платформи опремени со LiDAR сензори, кои можат да бидат статички како терестрички ласерски скенери или динамички, како рачни SLAM-скенери и скенери монтирани на беспилотни летала UAV-LiDAR (Unmanned Aerial Vehicle). UAV-LiDAR скенерите генерираат детален облак од точки со посебна изразеност во обезбедувањето на податоци за надворешноста на повисоките делови и покривите од објектите, како и за просторот во кој истите егзистираат. SLAM технологијата кај рачните LiDAR скенери овозможува снимање во простори без GNSS покриеност, како внатрешноста на објектите, а исто така обезбедува повеќе детали за фасадите и надворешноста на ниските делови од објектите, во споредба со ласерското скенирање од воздух. Доколку е потребна висока точност за специфични објекти или делови од објекти, се применува и терестричко ласерско скенирање TLS (Terrestrial Laser Scanning). Комбинирањето на овие технологии овозможува создавање на интегриран, кохерентен и детален 3Д облак од точки, кој ги опфаќа сите структурни компоненти на објектот. Поволноста на овие аквизициски пристапи е во обезбедување на респектабилна количина на просторни податоци со референтност која овозможува извлекување, селектирање на релевантна содржина погодна и референтна за примена на одредени просторни моделирања. Оваа фаза е од суштинско значење, бидејќи квалитетот на добиените податоци директно влијае врз точноста, деталноста и сигурноста на крајниот BIM-GIS модел.

Втората фаза ја опфаќа техничката обработка на добиените податоци од аквизицијата, со цел нивна регистрација, усогласување и подготовка за тридимензионално моделирање. Добиените облаци од точки од различните технологии за аквизиција на просторни податоци, најпрво се подложуваат на филтрирање со цел елиминација на шумови и груби грешки. Потоа следува регистрација на сите сетови податоци во заеднички координатен систем, најчесто државниот координатен систем, што овозможува нивна конзистентност и просторна референцираност. Резултатот е единствен, хомоген и детален облак од точки. Дополнително, се врши контрола на точноста преку мерење на отстапувања во карактеристични точки и споредба со познати координати. Така подготвениот облак од точки претставува сигурна основа за креирање на BIM модел и понатамошна трансформација кон GIS околина, овозможувајќи моделирање, анализа и симулации врз основа на квалитетни просторни податоци.

Третата фаза од методолошката рамка се фокусира на трансформацијата на интегрираниот облак од точки во прецизен и семантички структуриран BIM модел. Оваа фаза се реализира со примена на напредни софтверски алатки за параметарско

моделирање. Параметарското моделирање значи дека секој елемент (сид, прозорец, врата, покрив) не е само цртеж, туку интелигентен објект со поврзани параметри, како што се висина, ширина, материјал, позиција, агол и слично. Ова овозможува динамично ажурирање на моделот, што значи дека ако се смени еден параметар, моделот автоматски се прилагодува во согласност со зададените правила. На пример, ако се промени висината на катот, сите врати и прозорци што се поврзани со тој кат ќе се прилагодат соодветно. Во BIM контекст, параметарското моделирање овозможува конзистентност, прецизност и флексибилност при моделирање и анализа на објекти, како и полесна интеграција со други системи.

Процесот започнува со импортирање и позиционирање на облакот од точки во софтверското опкружување, каде што се идентификуваат и реконструираат клучните архитектонски и структурни елементи: сидови, подови, скали, покриви и сл. Секој елемент од моделот се дефинира со атрибути и параметри според меѓународните стандарди, овозможувајќи интероперабилност и поврзување со други системи. Дополнително, се извршува верификација на геометриската прецизност преку преклопување со оригиналниот облак од точки, со цел да се гарантира дека моделот ја репрезентира реалната состојба на терен. Вградените семантички и атрибутни податоци обезбедуваат не само визуелна туку и аналитичка вредност на моделот, со што тој прераснува во дигитален близнак на објектот. Овој BIM модел служи како основа за интеграција со GIS.

Четвртата фаза од методологијата претставува критичен чекор во процесот на воспоставување на интероперабилен BIM-GIS систем, бидејќи овозможува трансфер на податоци од инженерски модели во просторна околина. Интеграцијата на BIM моделот во GIS се реализира преку трансформација на моделот во стандарден формат, најчесто IFC и негово прилагодување за употреба во GIS апликации преку конверзија во формати како што се CityGML или просторна база на податоци (Geodatabase). Оваа постапка вклучува не само инкорпорирање на BIM моделот во државниот координатен систем, туку и раслојување на елементите на BIM моделот во категории (слоеви) погодни за управување и анализа во GIS околина, пример: сидови, покриви, подови, простории, инсталации и слично. Преку ваквата трансформација, секој елемент од BIM моделот се претвора во објект кој може да се лоцира, поврзе и анализира во просторна околина, а со тоа се овозможува визуелизација, просторна анализа и интеграција со други тематски и правни податоци (катастарски, урбанистички, инфраструктурни).

Крајниот резултат е референтен тридимензионален просторен модел со вградени инженерски и семантички својства, кој претставува основа за развој на напредни системи за управување со недвижностите и континуитет со останати, идентификувани просторни појави и објекти. Ваквиот интегриран систем создава дигитални близнаци на објекти и простор и ја проширува можноста за нивно користење во концептот на паметни градови. Во оваа фаза се потврдува дека BIM-GIS интеграцијата не е само техничка трансформација, туку системска конвергенција на инженерството, геоинформатиката и управувањето со недвижностите и просторот.

6.1. Аквизиција на просторни податоци

Аквизицијата на просторни податоци е суштинска и почетна фаза во процесот на создавање дигитални модели на објекти, особено во контекст на Scan-to-BIM методологијата и современите системи за регистрирање на недвижности. Квалитетот,

деталноста и конзистентноста на податоците добиени во овој чекор директно влијаат врз точноста на финалниот BIM модел и врз неговата употребливост во инженерското моделирање и катастарската регистрација. Затоа, изборот на метод и технологија за аквизиција на податоци не се сведува само на техники на снимање, туку претставува клучен дел од целиот систем на градење и интеграција на моделите.

Современите практики за аквизиција на 3Д просторни податоци во контекст на формирање на BIM модели, најчесто се базираат на три категории ласерско скенирање: терестричко ласерско скенирање (TLS), мобилно SLAM скенирање и UAV-LiDAR скенирање. Наместо да се третираат како конкурентни или меѓусебно заменливи технологии, во рамките на оваа методологија тие се разгледуваат како комплементарни сензорски системи, секој со своја специфична улога во формирањето на целосен, метрички прецизен и просторно дефиниран BIM модел.

TLS системите нудат највисока прецизност и се оптимални за снимање фасади, конструктивни елементи и архитектонски детали каде е потребна висока метричка точност. SLAM системите, пак, се посебно погодни за ентериерно снимање на простории, катови и комуникации, каде мобилноста, флексибилноста и брзината се клучни фактори. UAV-LiDAR технологијата овозможува снимање на покриви, тешко достапни делови од објектите и пошироката околина, обезбедувајќи просторен контекст и теренски модели кои се неопходни за последователна GIS интеграција.

Со ова, секој метод придонесува со комплементарни податоци:

- ***SLAM за внатрешна и надворешна геометрија,***
- ***TLS за надворешна и внатрешна деталност и прецизност,***
- ***UAV-LiDAR за поширок контекст, терен и објекти кои се недостижни со други методи.***

Интегрирани заедно, овие податоци овозможуваат формирање на сеопфатен и просторно дефиниран BIM модел што ги отсликува и геометриските карактеристики и околниот контекст на објектот. Таквиот модел претставува основа за понатамошна интеграција со GIS, со што се овозможува не само визуелизација, туку и создавање податок и околина за интеграција со податоци стекнати преку регистрација на права врз недвижностите во катастарскиот систем, во согласност со современите концепти и потреби за управување со недвижностите.

6.1.1. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) технологијата има примарна улога во аквизицијата на податоци за моделирање на објектите, со посебен акцент при скенирање на ентериерот на објектите. SLAM алгоритмите истовремено го пресметуваат движењето на сензорот и ги надоврзуваат скеновите еден на друг, што овозможува континуирана аквизиција на податоци додека уредот е во движење. Современите мобилни SLAM скенери, рачни скенери, скенери кои се монтираат на ранец или роботски единици, овозможуваат скенирање на сложени објекти со голема брзина и флексибилност во работата без притоа да се развива мрежа од маркери, преку кои би се регистрирале облаците од точки, како би биле интегрирани во еден податочен сет, претставени во единствен координатен систем.

Примената на SLAM технологијата во снимањето на внатрешните простори, но и надворешни делови на објекти, претставува значаен напредок во аквизицијата на просторни податоци. Кај традиционалните методи, како што се терестричко ласерско скенирање (TLS) или класичните геодетски мерења, операциите се базираат на статички позиции на инструментот и постепено градење на моделот. SLAM пак, создава сет на податоци во реално време и истовремено ја проценува сопствената позиција базирана на LiDAR скенови, IMU податоци и алгоритамска оптимизација. Овој пристап овозможува брзо, динамично, оперативно и флексибилно документирање на внатрешниот простор, што е особено важно за потребите на 3Д катастарските системи, кои бараат комплетна, тополошки конзистентна и метрички валидна 3Д репрезентација на просториите, односно на катастарските просторни единици (Koeva et al., 2019).

Во пракса, сепак, SLAM не е сеопфатно решение. Овој начин на скенирање е чувствителен на одредени услови, особено на т.н. *drift* (акумулирано отклонување), што значи постепено систематско зголемување на грешката во позицијата, што може да доведе до нестабилни или деформирани модели ако снимањето не се изведе според строго дефиниран методолошки протокол. Истражувањата покажуваат дека правилно планирање на траекторијата, контролирање на брзината и ориентацијата и создавање на затворени траектории на снимање т.н. *loop closures* значително ја подобруваат точноста на конечниот продукт, облакот од точки (Gharebaghi et al., 2021; Chrbolková et al., 2025). Поради тоа, употребата на SLAM треба да биде водена од систематска и јасно дефинирана методологија, која се состои од неколку меѓусебно поврзани чекори: **подготовка на просторот, оптимизација на условите, планирање на патека на движење, примена на техники за снимање во различни типови простории и верификација на резултатите.**

Подготовка на просторот и претходни услови за снимање

Употребата на SLAM скенерите наметнува исполнување на одредени предуслови како произведениот податок би го постигнал потребниот квалитет и комплетност. Од тие причини, просторот треба да биде оптимизиран за SLAM скенирање, што значи дека треба да се минимизира движењето во просторот кој се скенира. Движењето на луѓе, објекти, завеси или подвижни предмети може да создадат шум, бидејќи SLAM алгоритмите не прават разлика помеѓу статични и динамични точки во првата фаза на реконструкцијата (Di Stefano et al., 2021). Динамичните објекти можат да доведат до погрешни проценки на позицијата, особено во средини каде облакот од точки е богат со повторливи и еднолични структури (на пример ходници, празни сидови, еднолични форми итн.). Затоа, се препорачува да се отворат вратите, да се отстранат или зачуваат во стабилна позиција сите подвижни предмети и да се обезбеди доволно светлина во просторот.

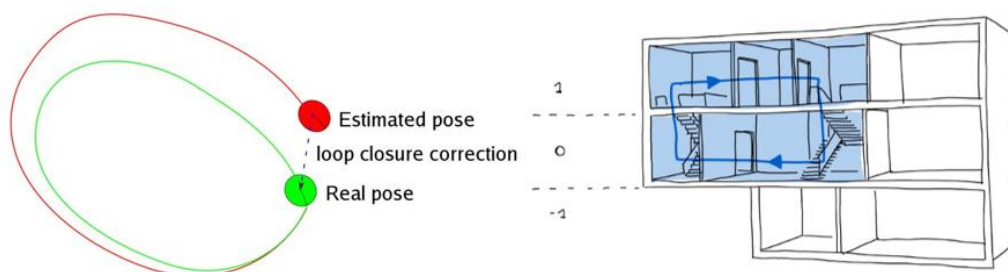
Вториот чекор во подготовката е изборот на локација од каде се започнува со скенирањето. Кај SLAM скенерите, важно е снимањето да започне во подрачје што има стабилни и препознатливи структурни карактеристики, како влезен дел, приемна просторија на објект, поголем простор во кој можеби се позиционирани сфери или маркери за ориентација на скенерот. Истражувањата покажуваат дека комбинацијата на SLAM и TLS може да даде облак со поголема густина и високо ниво на точност (Argan et al., 2021; Chrbolková et al., 2025).

Траекторија на движење при снимање

Најважниот дел од целата методологија за скенирање е патеката на движење, бидејќи SLAM ги интерпретира просторот и положбата токму преку оваа физичка патека. SLAM алгоритмите се чувствителни на брзи движења, нагли ротации, вибрации и непредвидливи промени во насоката, па затоа движењето мора да биде стабилно, со константна брзина и со контролирана ротација (Gharebaghi et al., 2021).

Оптималната брзина за снимање изнесува 0,5–1,0 m/s, што е доволно бавно за да се избегне разлевање на податоците (губење на дефиницијата, односно замачкување на геометријата) и доволно брзо за да се одржи континуитет во аквизицијата. Исто така, хоризонталните ротации треба да се ограничат на не повеќе од 15–20°/s, со што се елиминираат можните грешки од IMU уредот и нивното влијание врз пресметувањето на координатите. Стабилната ориентација на скенерот овозможува алгоритмот да ги поврзува последователните облаци непречено, што го минимизира акумулираното отклонување на облакот од фактичката состојба на објектите. Се работи за систематска грешка на податокот каде позицијата на точките од облакот е поместена во еден правец и истата се зголемува со текот на скенирањето.

Снимањето треба да започне со јасна и права патека, по можност во ходник или отворена просторија. Движењето треба да се одвива по должината на просторот, да се стигне до крајната точка и потоа да се врати назад по истата траса. Ова се нарекува затворање на јазли, *loop closures*, фундаментален принцип кај SLAM скенирањето (Слика 6.2). Затворањето на јазлите му овозможува на алгоритмот да препознае дека веќе се вратил во иста точка, по што врши глобална оптимизација на целата траекторија, намалувајќи го отклонувањето и стабилизирајќи го моделот (Chrbolková et al., 2025).



Слика 6.2. Затворање на јазли (loop closure) кај SLAM скенирање

Кај сложените објекти, затворањето на јазлите не треба да биде еднократна стратегија, туку треба да се изведува на повеќе нивоа:

- локални затворања на јазли во поединечни простории,
- затворања на јазли при снимање на секој кат,
- глобално затворање на јазли при завршување на целата мисија.

Овој принцип е клучен при скенирањето на згради, бидејќи обезбедува стабилна тополошка конзистентност низ целиот објект. Ако не се создадат доволно јазли, контролни точки на траекторијата, моделот може да се деформира, да има локални изместувања или неприфатлива систематска грешка на отклонување.

Примена на методологијата во различни типови простории

Ходниците иако изгледаат едноставно, се сложени простории за SLAM скенирање бидејќи се долги, тесни и често со еднолични геометриски карактеристики. Во нив лесно се акумулира грешката на отклонување на облакот, па затоа се препорачува стабилно движење низ целата должина и враќање назад по истата линија. Потребно е да се одржува константната оддалеченост од сидовите (1,5–2 m), да се избегнува преминување од едната на другата страна од ходникот и да не се прават ненадејни ротации при влегување во страничните простории.

Просториите исполнети со мебел или други објекти, наметнува потреба од снимање на два начини:

- снимање по должина на периметарот на просторијата, за да се добијат стабилни референтни површини како сидови, прозорци и отвори, и
- кружно движење низ центарот за да се сними таванот, мебелот и деталите што не се видливи од периметарската патека.

Овој метод (периметар и центар) е докажан како ефикасен во создавање на комплетна реконструкција на просториите (Di Stefano et al., 2021).

Вертикалниот комуникациски простор, скали и лифтови се исто така карактеристични простории кои бараат поголемо внимание. При снимање на скали важно е да се задржи истата ориентација на скенерот при качување и спуштање, да се движи бавно и да се создаде затворање на јазли на двете нивоа. Вертикалните патеки се посклони кон отклонување на облакот од точки поради промената на висината и нерамномерните површини.

Малите и затворени простории, како тоалети, тавански и подрумски простории, претставуваат своевиден предизвик за SLAM скенерите поради едноличноста на површините, што резултира со недоволно присуство на карактеристични геометриски структури потребни за SLAM скенирањето и слабата осветленост. SLAM алгоритмите се потпираат на препознавање карактеристични точки и структури со цел стабилно да ја пресметаат траекторијата и да го спречат акумулираното отклонување. Кога просторијата содржи долги празни сидови, еднолични плочки, темни агли или ограничен простор за движење, системот може да изгуби локализација, што резултира со локални деформации во облакот од точки.

За да се минимизираат овие проблеми, препорачлива е примена на неколку стратегии:

- *Користење дополнително осветлување.* Иако LiDAR сензорот не е чувствителен на видлива светлина, многу SLAM уреди комбинираат LiDAR со визуелни сензори. Во темни простории, слабата видливост го намалува бројот на визуелни карактеристики што алгоритмот ги користи за стабилизација на траекторијата. Дополнителното осветлување овозможува подобро препознавање на структури и намалување на отклонувањето.
- *Избегнување движење покрај еднолични сидови.* Празните, рамни површини создаваат недостиг на геометриски карактеристични елементи. При скенирањето треба да се избегнува движење паралелно до празни сидови и наместо тоа да се насочува траекторијата така што во видното поле да има повеќе структурни

елементи (на пример: цевки, врати, столбови, мебел, рабови), со што се обезбедува стабилност на SLAM решението.

- *Создавање на микро-затворени јазли (micro-loop closures).* Затворањето јазли е основен механизам во SLAM кој овозможува корекција на акумулираното отклонување. Во мали простории, нема доволно место за создавање големи патеки кои се враќаат на почетната точка, што обично му помага на SLAM да го коригира отклонувањето. Затоа се препорачува неколку пати кратко да се помине низ истото место, но со малку изменет агол на движење. Овие „микро-повторувања“ му овозможуваат на SLAM да препознае дека е повторно на истата локација, што ја подобрува стабилноста на траекторијата и ја зголемува точноста на конечниот облак од точки.

Завршната фаза на снимање е финалното затворање на јазли, кое треба да се изведе на истата иницијална точка. Ова овозможува глобално оптимизирање на целата SLAM траекторија, со што се редуцира акумулираната грешка и се гарантира дека моделот е метрички стабилен. Според Chrbolková et al. (2025), глобалното затворање на јазлите може да ја намали грешката и до 50% кај SLAM скенирањето.

Овој чекор е од суштинско значење за интеграцијата на BIM и GIS, бидејќи сите последователни процеси, екстракција на архитектонски и структурни компоненти од облакот од точки, дефинирање простории и нивно интегрирање во GIS околина, зависат од стабилноста на SLAM податоците.

За разлика од примената на овие скенери во аквизицијата на податоци за внатрешноста на објектите, каде SLAM скенерите доминираат поради нивната мобилност и способност да создаваат конзистентни 3Д модели во затворени простори, примената на SLAM во снимањето на надворешноста и габаритот на објектите бара адаптирана методологија и внимателен избор на работна стратегија. Надворешните услови, како отворени простори, променливи текстури и поголеми растојанија меѓу фасадните елементи, бараат повисоко ниво на стабилност на локализацијата, особено затоа што SLAM алгоритмите зависат од континуираното препознавање на геометриски карактеристики на објектите.

При габаритно снимање на објект, SLAM скенерот овозможува брзо и континуирано создавање облак од точки преку движење околу него, без потреба од статички маркери како кај TLS системите. Ова го прави SLAM погоден за снимање објекти каде има пристап на соодветно растојание до фасадата, вклучително и околината на објектот заедно со целата урбана опрема и партерно уредување околу него. И покрај тоа, за стабилна локализација е неопходно околината или објектот да содржи доволно структурни елементи, прозорци, рабови, огради, столбови, дрвја, кои го одржуваат алгоритмот во рамнотежа и овозможуваат локализација на секој последователен скен. Мазните фасади, голите ѕидови или рефлексивните површини често создаваат локални отклонувања, па снимањето треба да се планира така да бидат вклучени повеќе објекти од околината, а не само фасадата.

Во последните години, значајно е зголемена применливоста на скенирање на надворешност на објекти и урбани средини со SLAM скенери благодарение на интегрирањето на RTK GNSS приемници директно во SLAM уредите. Овие хибридни системи ја комбинираат локализацијата со SLAM технологијата и системите за глобално позиционирање, овозможувајќи подобрена стабилност на траекторијата, елиминирање на

постепени отклонувања кај долгите траектории и добивање на координати во државен координатен систем во реално време. Во услови на добра GNSS покриеност, RTK модулот обезбедува сантиметарска точност на траекторијата, позицијата на скенерот, што ја подобрува и точноста на генерираниот облак од точки. Ова е особено корисно за снимање габарит на средно високи објекти, долги фасади и простори со не многу соодветна текстура за скенирање, каде стабилноста на локализацијата е критична.

Сепак, и покрај значајните предности, овој начин на скенирање има свои физички и технички ограничувања, особено кога станува збор за снимање на целосната висина на повисоки објекти. Поради тоа што уредот го носи човек и се движи на висина типично помеѓу 1,2–2 метри над земја, SLAM скенерите можат да ги снимаат фасадите до одредена максимална висина, дефинирана од аголот на отклонување на ласерскиот зрак, растојанието од скенерот до објектот и архитектонските елементи на објектот. Кај повисоки згради, горните катови и кровните елементи често остануваат делумно или целосно недостапни за снимање со SLAM системи, бидејќи системот не може да обезбеди доволен агол на покривање од нивото на снимање.

Поради ова ограничување, најчесто, SLAM се користи за снимање на приземни и средно високи делови од фасадата, додека UAV-LiDAR ги покрива покривите и највисоките сегменти, а TLS обезбедува висока прецизност на критичните делови од објектите, доколку тоа е потребно.

6.1.2. TLS (*Terrestrial Laser Scanning*)

Примената на терестричкото ласерско скенирање во процесите на формирање на BIM модели претставува една од најпрецизните, најдеталните и најсигурните техники за аквизиција на просторни податоци. TLS овозможува прецизна, метрички валидна и детална репрезентација на архитектонските, функционалните и конструктивните компоненти на објектите, што ја прави значајна технологија во Scan-to-BIM работните текови (Tang et al., 2010; Volk et al., 2014). За разлика од SLAM системите, кои се карактеризираат со мобилно и брзо снимање, TLS се изведува од фиксна позиција, инструментот е поставен на статив и не се движи за време на снимањето. Ова создава стабилни услови на мерење, без траекторија која може да предизвика акумулација на грешки. Поради фиксните позиции на инструментот, целата геометрија на скенот се гради околу една стабилна референтна точка, што драстично ја намалува можноста за грешки. Поради тоа, при проекти каде прецизноста и деталноста се критични, како што се реконструкции, инженерски анализи, мониторинг на деформации и катастарски регистрации на специфични објекти, TLS е незаменлив.

Процесот започнува со внимателно планирање на снимањето. Планирањето треба да вклучи анализа на геометријата на објектот, препознавање делови со потенцијални скриени делови и одредување на позициите на TLS станиците, така што секој сегмент од објектот ќе биде снимен барем двапати. Овој пристап ја минимизира веројатноста за непокриени површини и обезбедува стабилна регистрација.

При скенирање на внатрешноста на објектите, терестричкиот ласерски скенер се позиционира на локации кои овозможуваат максимална видливост, минимална неопфатена површина и доволно преклопување во однос на соседните скенови. Согласно начинот на скенирање со TLS, како погодни локации може да се посочат следните:

- *Аглиите на просторите.* Тие овозможуваат скенерот да има широк агол на видливост, па со една станица се опфаќаат две до три сидни површини, таван и под.
- *Почетоците и крајот на коридорите.* Истите се избираат за да се обезбеди целосно опфаќање на долгите и тесни простори, кои во спротивно би имале големи нескенирани зони.
- *Средина на големи пространи сали.* Се бираат една или повеќе централни позиции за да се снимат целата висина и ширина од различни агли.
- *Вертикални комуникациски сегменти* (скали, атриуми, шахти). Истите се скенираат од најмалку две висински позиции за да се добие континуирана геометрија во вертикална насока.

Овој пристап не само што обезбедува покриеност, туку создава и значително преклопување меѓу соседните скенови, што е потребно за стабилна регистрација. За разлика од SLAM скенерите, кои честопати се соочуваат со проблеми при снимање на еднолични површини, мазни сидови или простории со повторувачка геометрија, TLS генерира податоци со многу мал шум и со прецизна репрезентација на реалната површина.

При надворешно снимање, TLS станиците се поставуваат околу објектот во форма на периметарска мрежа. Овој пристап е особено ефикасен за снимање на фасади со висока сложеност: отвори, профили, венци, декоративни елементи и структурни компоненти. Додека SLAM може да обезбеди приближна геометрија, неговата способност да снима високи делови на фасадите е ограничена. TLS, од друга страна, може да снима фасади на поголеми растојанија некогаш и до 100 m со минимална загуба на точноста. Заради тоа, TLS обезбедува многу поголем вертикален опфат и е далеку посоодветен за создавање на BIM модели на објекти со сложени фасадни структури.

Клучниот технички дел од методологијата е регистрацијата на скеновите. Бидејќи TLS снимањето најчесто се реализира од повеќе позиции, конечниот облак од точки се создава по нивно спојување во единствен координатен систем. Најчесто користени методи за спојување на облаците во единствен координатен систем во пракса се:

- автоматска *cloud-to-cloud* регистрација и
- регистрација базирана на маркери.

Првиот метод на автоматска регистрација, кој се базира на алгоритмот Iterative Closest Point (ICP), ги усогласува облаците од точки преку минимизирање на разликите меѓу нивните преклопени сегменти. Овој метод може да се користи во простории богати со карактеристични геометриски форми, но проблематичен е кај еднолични простории, како долги ходници или фасади без текстура. Во вакви ситуации ICP може да не даде доволно квалитетни решенија, што резултира со акумулација на грешки во конечниот модел.

Токму затоа, за проекти каде е потребна висока точност, најчесто се применува регистрацијата базирана на маркери. Во оваа техника се поставуваат сферични или плоснати маркери на различни точки во просторот, при што TLS ги снима нивните позиции со висока точност. Маркерите мора да бидат видливи од најмалку две станици и да бидат поставени на различни висини, со што се овозможува стабилна

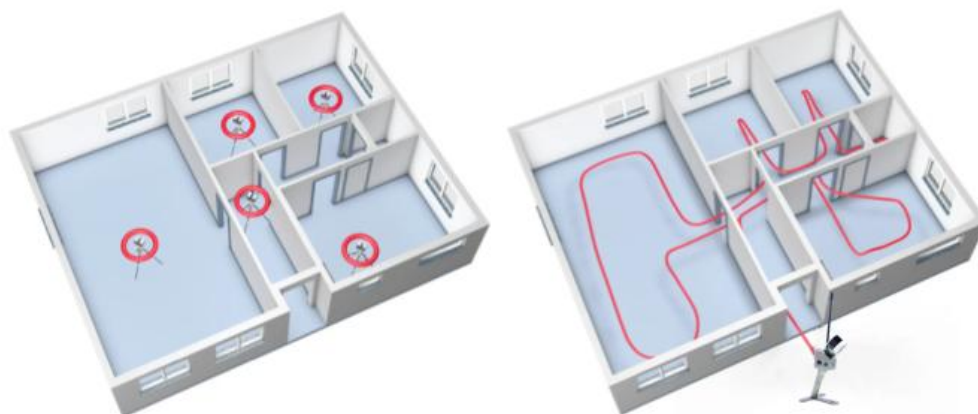
тридимензионална трансформација (Gielsdorf et al., 2004). Овој метод е особено важен во BIM проекти, каде грешките од неколку сантиметри можат да предизвикаат значајни отстапувања при моделирањето на елементите.

Постојат истражувања кои покажуваат успешност во регистрацијата на поединечните скенови добиени со TLS со примена на *cloud-to-cloud* методот за регистрација, каде како референтен се користи облак од точки добиен од SLAM скенер. Ова е само уште еден метод со кој може да се комбинираат податоците од различни извори со цел постигнување сеопфатен облак од точки за детално и квалитетно BIM моделирање.

Кога е потребно интегрирање на BIM моделите со GIS каде крајна цел е регистрација на правата врз недвижностите, не е доволно релативно да се ориентираат поединечните скенови, туку потребно е да се донесат податоците во државен координатен систем. Оваа фаза подразбира одредување на координатите на дел од маркерите со мерења реализирани со тотална станица или GNSS систем. На тој начин, целиот облак од точки се пренесува од локален координатен систем (на инструментот) во државен координатен систем, што го прави погоден за интеграција со GIS. Истражувањата покажуваат дека геореференцирањето преку маркери може да даде глобална точност од 3–5 mm, што е значително подобро од точноста што може да се постигне со SLAM скенирање (Kukko et al., 2012).

Кога облакот од точки ќе биде регистриран, следи фазата на негова примена во BIM околина, а сè со цел создавање на модел на објектот кој се третира. TLS овозможува препознавање дури и на најситните детали: неправилности во сидовите, отклонувања на вертикалноста, структурни оштетувања, мали инсталациски елементи и декоративни профили. Поради тоа, TLS-базираните BIM модели се со многу висока геометриска точност и можат да бидат користени за проверка на изведена состојба, реконструкции и инженерски анализи (Turner & Zakhor, 2014).

Во компарација со TLS, SLAM скенерите, иако се многу мобилни и погодни за брза аквизиција, често создаваат податоци со повисок шум, помала релативна точност и ограничена способност да опфатат високи или далечни делови од објектот. Поради нивната зависност од стабилноста на траекторијата, SLAM системите се склони кон акумулирано отклонување, што може да доведе до деформации при моделирањето. Затоа, во комплексни и технички чувствителни проекти каде точноста и деталноста се примарни, TLS се користи како технологија за аквизиција на просторни податоци.



Слика 6.3. TLS vs. SLAM

6.1.3. UAV-LiDAR (Unmanned Aircraft System-Light Detection and Ranging)

Во процесот на формирање на BIM модели на објекти, каде треба да се обезбеди квалитетен модел на габаритот на објектот, UAV-LiDAR се издвојува како клучна алатка во снимањето на делови од објектите кои се тешко достапни за терестричките методи на аквизиција на просторни податоци. Неговата употреба се наметнува како неопходност во ситуациите кога класичните терестрички методи, како рачните SLAM скенери и TLS, се соочуваат со ограничувања во линијата на видливост и пристапност до објектот.

UAV-LiDAR системите овозможуваат аквизиција на податоци од воздух, што го прави овој пристап особено погоден за снимање на кровни конструкции, високи делови од фасади, стреи, кули, еркери и други архитектонски елементи кои не се видливи од земја. Тие нудат перспектива која ниту еден терестрички сензор не може да ја постигне без употреба на скеле, дигалки или други помагала. На тој начин UAV-LiDAR го пополнува сегментот во Scan-to-BIM процесите, кој се однесува на геометријата на високите делови од објектите и кровната конструкција, заедно со пропратните архитектонски елементи и инсталирана опрема, која е неопходна за комплетен BIM модел, елементи кои често е невозможно или многу комплицирано да се добијат со SLAM или TLS скенирање.

Комбинирањето на UAV-LiDAR со SLAM претставува пристап за целосна геометриска реконструкција на објектите. SLAM системите, како што веќе и беше претходно презентирани, претставуваат оптимално решение за снимање на ниските делови од објектите и нивната внатрешност. Овој вид снимање обезбедува податоци со релативно висока густина во ниските делови од објектот, создавајќи стабилна основа за моделирање на волуменот и основните фасадни структури, но високите делови од објектот и кровните површини остануваат неопфатени со просторни податоци. Од друга страна, UAV-LiDAR обезбедува податоци за оние делови од објектот кои остануваат невидливи за SLAM. Со снимање од воздух и со можност за флексибилно управување со траекторијата на летот, овој систем обезбедува податоци кои ги покриваат високите и достапни делови од објектот, создавајќи основа за прецизно моделирање на кровните површини и високите делови од фасадите на објектите. Ваквиот интегриран пристап резултира со комплетен и непрекинат облак од точки, во кој слабостите и недостатоците на едниот систем се надополнуваат со силните страни на другиот систем.

Значењето на ваквото комбинирање лежи во фактот што само интегриран облак од точки може да обезбеди основа за детален BIM модел. Без UAV-LiDAR податоците, BIM моделите често остануваат непотполни во горните делови, без SLAM, пак, недостасува деталноста и густината во приземните сегменти. Со методологијата на комбинирано снимање се добива целосен, конзистентен податок за целосно геометриско моделирање и просторно презентирање на објектот во контекст на катастарските системи, 3Д моделите на урбани средини итн.

Методолошки, снимањето со UAV-LiDAR опфаќа неколку меѓусебно зависни фази: **избор на услови за снимање, дефинирање на параметриите на летот, планирање и реализација на мисијата, снимање на објектите и околината и контрола на добиените резултати преку GCP точки**. Секоја од овие фази е од суштинско значење, бидејќи влијае врз квалитетот, густината и употребливоста на финалниот облак од точки.

Првиот аспект што мора да се разгледа се условите под кои се изведува снимањето. Иако LiDAR технологијата не е зависна од природното осветлување, доброто и стабилно осветлување значително ја подобрува контролата и ја намалува веројатноста за

неочекувани одблесози или рефлексии од стаклени и метални површини. Најдобри резултати се постигнуваат во услови со умерено или стабилно осветлување. Атмосферските услови имаат директно влијание врз стабилноста на летот и квалитетот на повратниот LiDAR сигнал. Ветерот е еден од најограничувачките фактори, дури и умерени ветрови можат да го нарушат одржувањето на константна траекторија, со што IMU системот регистрира варијации кои последователно создаваат аголни грешки, а сето тоа се рефлектира врз квалитетот на облакот од точки. Затоа снимањето обично се изведува при ветер послаб од 4–6 m/s, што овозможува стабилен лет и минимизирање на грешките. Дополнително, влажноста и присуството на водени честички во воздухот се значаен ризик за дисперзија и апсорпција на LiDAR зраците. Ова резултира со шум, слаб сигнал, рефлексии со низок интензитет и појава на груби грешки. Поради тоа, треба да се избегнува снимање во услови на магла, дожд, снег или висока влажност, кога ризикот за деградација на податоците е најголем.

Следната фаза е дефинирање на параметрите на летот, кои ја одредуваат густината, стабилноста и покриеноста на податоците. Висината на летот може да биде различна, обично се движи меѓу 50 и 120 m, што претставува компромис меѓу потребата за деталност и опсегот на снимање. На пониски висини се добива поголема густина на точки и подобро снимање на архитектонските детали, но се зголемува бројот на потребни прелети. На повисоки висини се подобрува покриеноста, но се губи густината на точки. Брзината на летот, исто така, игра значајна улога. Побавен лет (3–5 m/s) овозможува зголемена густина на точки, што е од суштинско значење за BIM моделирањето на сложени кровни структури и фасадни елементи. Побрзите летови (6–15 m/s) се погодни за снимање на широки површини, но со намалена деталност.

Аголот на скенирање е од исклучителна важност за квалитетот на облакот од точки кои се добиваат со рефлексии на ласерските зраци од фасадите на објектите. Класичното снимање од надир, со зрак насочен вертикално надолу, обезбедува висока точност на кровните површини, но остава големи празни зони, не доволно покриени со точки, на вертикалните сидови. Затоа, за снимање на објекти се применува off-nadir пристап, при кој зракот е насочен под наклон од 20° до 45°. Овој пристап овозможува значително подобра фасадна покриеност и минимизирање на скриени делови од конзолните елементи на објектот. Постигнувањето на оптималната комбинација од снимање од надир и снимање под наклон, претставува најдобра практика при UAV-LiDAR аквизиција. Ова е посебно важно кај високите објекти.

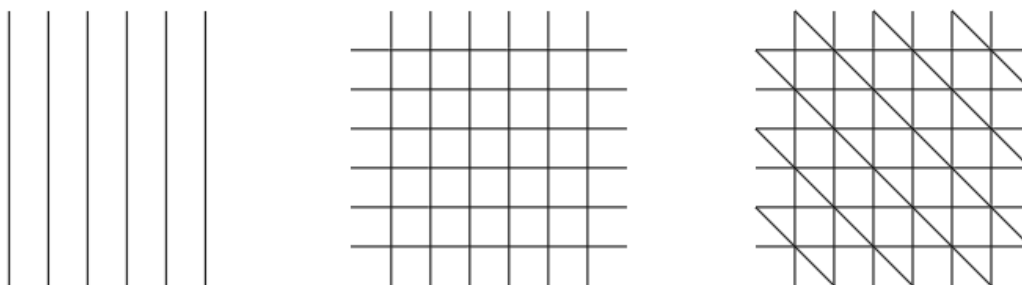
Планирањето на траекториите е еден од најсуштинските елементи бидејќи ја определува рамномерноста и стабилноста на облакот од точки за целосна опфатеност на објектот. Во пракса, за снимање на објекти се применуваат три главни стратегии: *grid pattern*, *cross-flight* и *double-grid*, секоја со свои специфични предности и ограничувања (Слика 6.4).

Grid pattern претставува основна и најчесто користена шема на лет кај UAV-LiDAR, каде беспилотното летало ја покрива целната површина со серија паралелни линии на лет во една доминантна насока, со однапред дефиниран преклоп помеѓу поединечните линии на снимање. На овој начин се обезбедува систематично и релативно рамномерно покривање на теренот, со континуирано собирање LiDAR точки по должината на секоја траса. Бидејќи снимањето се изведува од една насока, шемата е ефикасна по време и ресурси, но може да резултира со делумно неопфатени зони и пропусти зад вертикални објекти или густа вегетација, особено во сложени урбани и шумски средини.

Grid pattern е особено ефикасен за едноставни кровни геометрии, каде најважно е да се добие наклонот на кровната конструкција. Недостаток е тоа што вертикалните структури, на пример сидовите, се опфаќаат многу ограничено, бидејќи LiDAR зракот се насочува во надир или со мал наклон. Затоа *grid pattern* сам по себе не е доволен за добивање на податоци од фасадите, но е незаменлива основа за добивање на квалитетен модел на покривот.

Cross-flight го проширува *grid pattern* методот со систематско снимање во паралелни линии, создавајќи правоаголна мрежа со униформно преклопување. Овој пристап овозможува многу рамномерна распределба на точките и ја минимизира веројатноста за празни зони, дури и кај објекти со сложена кровна морфологија или големи хоризонтални површини. *Cross-flight* е особено корисен кај објекти каде кровните рамнини се на различни висински нивоа или каде постојат повеќекратни испусти кои можат да создадат скриени делови ако снимањето се изведе само во две насоки. Ограничувањето на *cross-flight* е што снимањето главно е наменето за хоризонтални и наклонети структури, додека фасадите сè уште се опфаќаат ограничено, освен ако не се користи аголно (*off-nadir*) снимање.

Најкомплетниот и методолошки најпрепорачлив пристап за UAV-LiDAR снимање на објекти е *double-grid* методот. Тој претставува комбинација на класичен *grid pattern* со дополнителен сет на траектории на лет по дијагонала (на пример 45°) во однос на главната мрежа. На овој начин, објектот е снимен барем од три различни ориентации, што создава исклучително густ и геометриски стабилен облак од точки. *Double grid* снимањето е најсоодветно за комплексни објекти, високи фасади и структури со многу архитектонски детали, бидејќи го минимизира ефектот на скриени зони, обезбедува покриеност под наклон и создава најголема можност за реконструкција на веродостојни BIM модели. Оваа техника бара подолго време на лет, но резултатот е висококвалитетен и густ облак од точки.



Слика 6.4. Траектории на снимање со UAV-LiDAR (*grid pattern*, *cross-flight* и *double-grid*)

Методолошки гледано, трите методи на прелет имаат свои специфики и можат да се користат во зависност од условите и потребите. *Grid pattern* создава основен облак од точки, *cross-flight* обезбедува униформност и зголемена густина на точки во однос на *grid pattern*, како и помалку неопфатени делови од објектот, додека *double-grid* ја дава потребната детална покриеност за целосно тридимензионално моделирање на габаритот и фасадите од објектот. Во зависност од архитектурата на објектот, достапноста на просторот, висината на објектот и степенот на деталност што се бара за BIM моделирање, потребно е да се направи соодветен избор на начинот на прелет како би се постигнале посакуваните резултати.

LiDAR сензорите монтирани на UAV овозможуваат генерирање на облак од точки кој уште во моментот на снимање може да биде директно референциран во државниот координатен систем, благодарение на интегрираните GNSS RTK технологии. Овие системи обезбедуваат сантиметарска позициска точност на леталото, што овозможува секој поединечен рефлектиран LiDAR импулс просторно да се лоцира со минимални систематски грешки. Како резултат, добиениот облак од точки веќе е геореференциран и нема потреба од користење на дополнителни операции за негово просторно референцирање. Иако RTK позиционирањето обезбедува висока точност, добрата геодетска практика препорачува контрола на податоците со познати точки на терен (GCP), чии координати се определени со GNSS мерења или со класични тахиметриски снимања. Овие точки служат за проверка, валидација и, доколку е потребно, за фино прилагодување на резултатите. Со споредување на облакот од точки со точно измерени контролни точки се утврдува точноста на геореференцирањето и се коригираат можните отстапувања во вертикална или хоризонтална насока.

Моделите добиени од ваков LiDAR облак од точки се идеално погодни за интеграција со GIS податоците, бидејќи веќе се во ист координатен систем. Тоа овозможува интеграција со катастарските податоци, ортофото снимки, урбанистички планови и други просторни податоци. Оваа интероперабилност е клучна за апликации како BIM-GIS интеграција, 3Д катастар, 3Д модели на урбани средини и слично.

Како резултат на оваа методологија, UAV-LiDAR создава висококвалитетен, детален и метрички стабилен облак од точки кој овозможува целосно моделирање на надворешноста, габаритот и фасадите на објектот.

6.2. Процесирање и интегрирација на облаците од точки

Обработката на облаците од точки е важен чекор во предложената методологија бидејќи овој чекор директно ја определува геометриската цврстина, метричката доверливост и практичната употребливост на конечниот 3Д модел. Клучната идеја е секој од трите сензорски системи (SLAM, TLS, UAV-LiDAR) да се третира како технологија која во зависност од потребите може да се користи самостојно или може да се користат комбинирани. Иако основната логика на обработка е заедничка за сите технологии: филтрирање на шум, регистрација, оптимизација и експорт на податоците, специфичните процедури се разликуваат во зависност од изворот на податоци: SLAM, TLS или UAV-LiDAR. SLAM облаците од точки се карактеризираат со акумулирано отклонување, несакани точки од објекти во движење, нестабилни рефлексии, од друга страна, UAV-LiDAR облаците од точки се карактеризираат со точки од вегетација, варијабилна густина, додека TLS облаците од точки се карактеризираат со висока густина и точност, но и потреба од прецизна регистрација на сеновите (Shan & Toth, 2018; Vosselman & Maas, 2010). Заедничко за сите е потребата од систематско претпроцесирање, стабилна регистрација и геореференцирање во единствен координатен систем погоден за BIM и GIS интеграција.

6.2.1. Карактеристики на обработката за различни извори на податоци

Обработката на SLAM облаците од точки е насочена кон корекција на траекторијата и намалување на шумот. SLAM системите се подложни на акумулација на грешки, точки добиени со рефлексии од објекти кои не се статични и нестабилни

рефлексии со низок интензитет, што наложува потреба од чистење на шумот, стабилизација на хоризонталните рамнини (levelling) и проверка на геометриската конзистентност на структурните елементи (сидови, плочи, скали). Ова е особено значајно бидејќи SLAM податоците најчесто служат како примарна основа за ентериерно BIM моделирање, каде сантиметарска точност е предуслов.

Облаците од точки добиени со UAV-LiDAR се карактеризираат со голема просторна покриеност и можност за истовремено снимање на објекти и околн терен. Притоа, типични карактеристики се појавата на вегетација, скриени зони кои не се опфатени со скенирањето, варијации во густината на точките и можни несогласувања на точките во преклопот од соседните линии на снимање (strip misalignment). Затоа, методологијата за обработка подразбира филтрирање на груби грешки, класификација на облакот од точки (терен, згради, вегетација), корекција на податоците од две соседни линии на снимање и генерирање DTM и DSM модели, кои потоа служат како референтна основа за кровната и фасадната геометрија.

TLS обезбедува највисок квалитет на податоци, со минимален шум и многу висока густина и точност. Главен предизвик овде е регистрацијата на поединечните облаци од точки добиени со скенирање од различни позиции, нивна оптимизација и разумна редукција на густината со цел да се овозможи ефикасна употреба при моделирање во BIM околина. TLS е најсоодветен за детални архитектонски и конструктивни модели, каде се бара точност под 5 mm (Vosselman & Maas, 2010).

И покрај овие разлики, сите три технологии се вклучуваат во унифициран процес на обработка: претпроцесирање, внатрешна регистрација, геореференцирање, интеграција и контрола на квалитетот. Во продолжение, чекорите се структурирани како дел од методологијата за комбинирање на SLAM, UAV-LiDAR и каде што е применливо, TLS облаци од точки во единствен геореференциран модел.

6.2.2. Претпроцесирање и филтрирање на шум

Првата фаза опфаќа претпроцесирање на сите поединечни облаци од точки добиени со SLAM (ентериер и габарит на објектот), UAV-LiDAR и доколку постои, TLS. Целта е да се обезбеди чиста, кохерентна и геометриски стабилна почетна основа за регистрација, бидејќи квалитетот на интегрираниот модел директно зависи од квалитетот на иницијалните податоци.

Претпроцесирањето најпрво подразбира филтрирање на шумот кој е неизбежен производ на секој ласерски систем, но е особено присутен кај SLAM скенирањето поради движењето при скенирањето, променливите услови на осветлување и честите промени во геометријата на просторот. UAV-LiDAR податоците често имаат шум предизвикан од атмосферски фактори (влажност, прашина, магла) или од дифузни одбивања од кровни материјали. Затоа, се применуваат алгоритми преку кои се детектираат таквите точки, а потоа и се отстрануваат, без притоа да ја нарушат геометриската структура.

Интензитетот на точките кај SLAM облаците претставува мерка за јачината на рефлектираниот ласерски сигнал и зависи од материјалот, аголот на инциденца и растојанието. Темни и слабо рефлексивни материјали (текстил, кожа, теписи, облека) често генерираат точки со низок интензитет, кои во комбинација со движење на луѓе, стаклени површини и огледала создаваат т.н. *ghosting*, што во суштина се точки добиени со рефлексивност на ласерскиот зрак од објекти кои се движат во просторот кој се скенира.

Затоа, задолжителен чекор е филтрирање на точки со низок интензитет и комбинирање на овој критериум со статистички филтри како Statistical Outlier Removal и Radius Outlier Removal. На овој начин се минимизира влијанието на хаотичните точки и се подобрува претставувањето на сидови, рабови и конструктивни елементи.

Кај UAV-LiDAR и TLS облаците од точки, шумот најчесто е поврзан со атмосферски услови (влажност, прашина, магла), дифузни одбивања и мултирефлексии од кровни и метални материјали. За нив се применуваат слични статистички филтри, но со фокус на елиминација на изолирани точки и неприродни вертикални структури.

По усогласувањето и почетното чистење на облакот од точки, вообичаено следи фаза на редукција на густината на податоците, со цел да се намали обемот на записот и да се олесни понатамошната обработка, без притоа значително да се наруши геометриската репрезентативност. Во оваа фаза често се применуваат техники како *voxel grid* и *uniform sampling*. *Voxel grid* пристапот го дели просторот на мрежа од тридимензионални ќелии (воксели) и во секоја ќелија задржува една репрезентативна точка, со што се постигнува контролирано проредување и порамномерна просторна распределба на точките. *Uniform sampling*, пак, има за цел да задржи точки на приближно рамномерно меѓусебно растојание, односно да спречи појава на премногу густ и премногу ретки зони во податочниот сет. Целта е да се постигне оптимална густина, доволно детална за BIM моделирање, но без непотребно зголемување на големината на датотеките и времето за обработка.

Во случај кога UAV-LiDAR облакот ги опфаќа и теренот и објектите, а SLAM облакот ги содржи подовите, сидовите и инсталациите, се препорачува класификација (терен, згради, вегетација, други објекти). Ваквата класификација овозможува одвојување на структурните елементи од шумот и неструктурните точки (на пример, крошни од дрва), кои би можеле да ја нарушат регистрацијата помеѓу SLAM и UAV-LiDAR податоците.

6.2.3. Внатрешна регистрација на SLAM облаци (ентериер и габарит)

Следниот критичен чекор е внатрешна регистрација на сите SLAM снимања во единствен локален координатен систем. Во пракса, снимањето често се изведува во повеќе одделни сесии (на пр. ентериер по катови, габарит околу објектот, подрум), кои иако се интерно конзистентни, не се секогаш меѓусебно усогласени.

За поврзување на овие сесии се применува *cloud-to-cloud* регистрација, најчесто со ICP (Iterative Closest Point) или негови подобрени варијанти, кои ја оптимизираат ригидната трансформација (ротација и транслација) помеѓу два облака така што се минимизира грешката помеѓу најблиските парови точки. Клучен предуслов е постоење на преклопни зони (overlaps), скали, ходници, врати, фасадни сегменти, кои се појавуваат во два или повеќе облаци од точки.

Најефикасен начин за овозможување стабилна регистрација е планирано создавање преклопни траектории. Операторот намерно го води SLAM скенерот низ простории што ги поврзуваат ентериерот и екстериерот: главен влез, ходници кон тераса, гаража или покриен двор. Во овие зони се снимаат и ентериерни (внатрешни сидови, рамки на врати, тавани) и екстериерни елементи (фасадни сидови, платформи, столбови), со што облакот од точки опфаќа карактеристични геометриски елементи кои се лесно препознатливи во облаците од точки.

При повторно поминување на операторот низ веќе скениран простор се реализира т.н. *loop closure*, односно препознавање дека два различни сегменти од траекторијата се однесуваат на ист простор. Во рамките на *graph-based SLAM*, околината и движењето на сензорот се опишуваат како граф, каде секоја позиција на скенерот е јазол, а релативните мерења и просторни врски меѓу последователните позиции се моделирани како ограничувања. Кога ќе се воспостави *loop closure*, во графот се додава ново ограничување меѓу позиции што го опишуваат истиот просторен сегмент, со што се овозможува глобална оптимизација на траекторијата. На тој начин се коригираат акумулираните грешки, се намалува акумулираното отклонување и се добива постабилен и поконзистентен локален модел на внатрешноста и надворешниот габарит на објектот.

6.2.4. Геореференцирање на SLAM моделот кон глобален координатен систем

Откако ќе се добие единствен SLAM облак од точки, тој најчесто е во локален координатен систем. Иако актуелни се и системите кои користат RTK/PPK и IMU, во ентериери без GNSS покриеност SLAM не може да гарантира глобална стабилност. Затоа, следната фаза е регистрација на локалниот SLAM модел во однос на глобално референцирани облаци од точки (UAV-LiDAR или TLS) во државен координатен систем (на пр. EPSG:6316).

Во основа постојат три начини за поврзување на SLAM и UAV-LiDAR облаци:

1. Директно поврзување преку RTK/PPK. Кога и SLAM и UAV-LiDAR скенирањето се изведени со RTK/PPK технологија и користат ист датум и координатен систем, облаци од точки веќе се приближно усогласени. Во тој случај може да се примени само фино прилагодување (*fine registration*) за минимизирање на локалните отстапувања.
2. Таргет-базирана регистрација. Во просторот се поставуваат референтни маркери (сфери, маркери) видливи и за SLAM скенерите и за UAV-LiDAR (на кровни тераси, предни платоа, фасадни елементи). На овие маркери им се одредени координати со GNSS или тотална станица, кои потоа се користат за одредување на трансформациони параметри за 3Д трансформација, најчесто седумпараметарска Хелмертова трансформација, помеѓу локалниот координатен систем од TLS или SLAM и државниот координатен систем.
3. *Feature-based* и ICP регистрација. Во отсуство или како дополнување на маркерите, се користат геометриски карактеристики на околината како рабови на фасади, агли, скали, парапети, кои се видливи и во SLAM и во UAV-LiDAR облаци од точки. Софтверите овозможуваат избор на јасно препознатливи точки и површини кај двата облаци од точки, при што се прави пресметка за трансформација со минимизирање на отстапувањата. Често се применува хибриден пристап: таргетите обезбедуваат груба стабилна трансформација, а ICP се користи за фино прилагодување.

По изведување на трансформацијата, целиот SLAM облак од точки станува геореференциран и може да се интегрира со UAV-LiDAR и TLS податоците во единствен глобален модел. На овој начин се воспоставува прецизна и стабилна врска помеѓу ентериерните податоци, екстериерните податоци и глобалниот координатен систем, што е критичен предуслов за изработка на функционален BIM модел кој подоцна ќе може да се интегрира во GIS околина.

6.2.5. Интеграција на SLAM и UAV-LiDAR облаците од точки и контрола на квалитетот

Во фазата на интеграција, комбинираниот SLAM облак (ентериер, екстериер) од точки и UAV-LiDAR облакот од точки (покрив, горни делови од фасадите, терен и околина) се спојуваат во единствен модел. Прво се проверува степенот на согласност во зоните на преклопување, кои најчесто се лоцирани околу приземниот дел од фасадата, терасите и платото пред објектот. Доколку вертикалните и хоризонталните елементи се совпаѓаат во рамки на неколку сантиметри, се пристапува кон финална глобална регистрација со ICP или друга *cloud-to-cloud* оптимизација.

По интеграцијата следи глобална анализа на грешки. Се користат независни контролни точки измерени со високоточни GNSS или тотална станица, кои не биле искористени во регистрацијата. Споредбата на нивните координати со најблиските точки од комбинираниот облак од точки овозможува проценка на хоризонталните и вертикалните отстапувања. Доколку грешките се во рамките на претходно дефинираните толеранции, интегрираниот модел се смета за метрички валидна основа за понатамошно моделирање.

6.3. Креирање на BIM модели

Третата фаза од предложената методолошка рамка ја опфаќа трансформацијата на интегрираниот облак од точки, добиен од SLAM, UAV-LiDAR и TLS технологиите, во прецизен, параметарски и семантички структуриран BIM модел. Оваа фаза претставува важен чекор во процесот на BIM-GIS интеграцијата, бидејќи квалитетот, конзистентноста и стандардизацијата на BIM моделот директно влијаат врз можноста за негово трансформирање и интегрирање со GIS.

Создавањето BIM модел не претставува само визуелна реконструкција на архитектонските и конструктивните елементи, туку комплексна процедура која вклучува импортирање на облакот од точки во BIM околина, параметарско моделирање, дефинирање на семантички информации, воспоставување тополошка логика и подготовка на моделот според IFC стандардот. Прецизно моделираната 3Д геометрија мора да биде проследена со правилно дефинирани параметри, атрибути и хиерархиски релации, кои овозможуваат BIM моделот да прерасне во интероперабилна, машински читлива и аналитички валидна дигитална репрезентација на објектот.

6.3.1. Параметарско моделирање и интелигентни објекти

За разлика од традиционалното CAD моделирање, кое претставува збир од линии, полигони и други основни геометриски ентитети кои не се поврзани со атрибути, BIM се заснова на концептот на параметарско моделирање. Во оваа смисла, секој архитектонски или конструктивен елемент, како ѕид, плоча, врата, прозорец, скала или покрив, е претставен како интелигентен објект со вградена архитектонска логика, конструктивни својства и семантичка информација (Sacks et al., 2018). За разлика од CAD цртежите што го опишуваат објектот само графички, BIM елементите се формално дефинирани преку параметри, атрибути и односи, што им овозможува да реагираат на промени во моделот и да обезбедат високо ниво на конзистентност и интероперабилност.

Параметарските објекти во BIM се карактеризираат со повеќеслојна структура на податоци која ги опфаќа геометриските, материјалните, техничките и просторно-хиерархиските својства. Најчесто користени групи параметри се:

- **геометриски параметри**, како висина, ширина, дебелина, должина или наклон, кои ја дефинираат физичката форма и димензија на елементот,
- **материјални параметри**, кои одредуваат состав, топлински и механички својства (на пример бетон, тула, дрво, алуминиум), важни за структурни и енергетски анализи,
- **просторен контекст**, кој ги опфаќа позицијата, нивото, координатите и релациите со други елементи во рамки на просторно-хиерархиската структура,
- **функционални и технички параметри**, како отпорност на пожар или акустични својства, кои се клучни за процесите на анализа и проектирање,
- **релативски параметри и ограничувања**, како на пример референтни рамнини, оски, правила и зависности, кои гарантираат дека моделот ќе остане логички и тополошки валиден при било каква измена.

Ваквата параметарска структура овозможува моделот да биде динамичен и еволутивен. Промената на еден параметар автоматски влијае на зависните елементи во целото опкружување на моделот. На пример, зголемување на висината на катот предизвикува сите прозорци, врати и висечки елементи поврзани со тој кат автоматски да се прилагодат на новата геометрија. На овој начин се одржува геометриска, релациона и семантичка конзистентност, што е суштинско за точноста на понатамошните фази на анализи и интероперабилност (Borrmann et al., 2018).

Овој принцип на параметарско моделирање е особено важен во контекст на BIM-GIS интеграција. GIS системите работат со структуриран, атрибутно богат и тополошки валиден просторен модел, а параметарскиот карактер на BIM овозможува трансформација на елементите во GIS ентитети, како архитектонски и конструктивни компоненти, површини, простори или тематски слоеви. Поради тоа, параметрите креирани во BIM директно се пренесуваат во GIS преку IFC стандардот, обезбедувајќи автоматизирано поврзување помеѓу геометриската и семантичката структура на моделот (Isikdag & Zlatanova, 2009). На овој начин BIM не претставува само 3D визуелизација, туку станува формализиран, информациски богат и аналитички употреблив дигитален модел што обезбедува основа за прецизно просторно-информациско поврзување и трансформација во GIS.

6.3.2. Инкорпорирање на интегриран облак од точки во BIM околина и подготовка за моделирање

Процесот на моделирање започнува со инкорпорирање на финално интегрираниот облак од точки (SLAM, UAV-LiDAR, TLS) во софтверско опкружување за BIM моделирање. Овој чекор претставува мост помеѓу фазата на обработка на облаците од точки и фазата на параметарско моделирање, при што фокусот се преместува од подготовка на податоците кон нивна структурна и геометриска интерпретација.

Позиционирање во координатен систем

Една од најважните активности пред започнување на моделирањето е прецизно поставување на облакот од точки во соодветен координатен систем. За потребите на BIM-GIS интеграцијата, BIM моделот мора да биде геореференциран во соодветен координатен систем, најчесто државен координатен систем или глобален координатен систем. Ваквата просторна усогласеност е неопходна за да се обезбеди метричка валидност и интероперабилност на податоците во сите последователни фази.

Позиционирањето на облакот од точки во соодветниот координатен систем во BIM платформите, односно во координатниот систем во кој, во процесот на обработка и интеграција е позициониран интегрираниот облак од точки, се реализира преку механизмите за размена на координати, што пак овозможува:

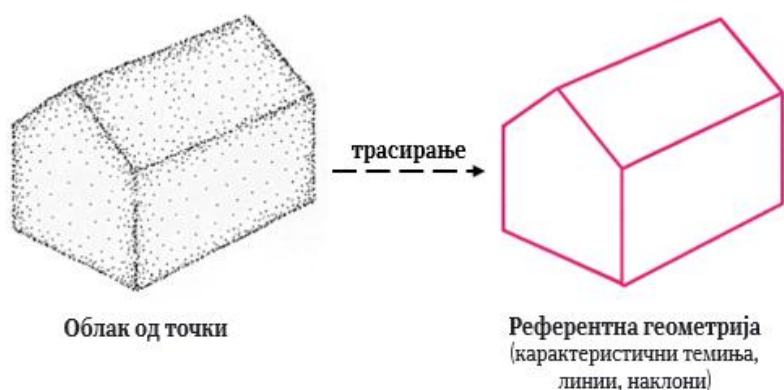
- усогласување на моделот со координатниот систем во кој се реализира проектот,
- коректно просторно интегрирање со GIS податоци (катастарски податоци, ортофото снимки, DTM, DSM итн.),
- конзистентност во трансферот на податоци преку IFC и последователна конверзија во CityGML или други GIS формати.

Со правилно поставување на координатниот систем, BIM моделот станува дел од поголема просторна рамка, што е критично за сите понатамошни GIS анализи, 3Д катастар и просторни симулации.

Подготовка за моделирање и анализа на геометрија

Во фазата на подготовка за моделирање, облакот од точки веќе е темелно исчистен, филтриран и сегментиран, па фокусот се префрла кон негово аналитичко толкување во BIM околина. Наместо дополнителни операции за манипулација на податоците, во оваа фаза доминира процесот на интерпретација, односно препознавање на просторните структури и геометриската логика што ќе послужат како основа за параметарско моделирање. Облакот од точки не се третира како суров визуелен материјал, туку како метрички валидна подлога која овозможува реконструкција на архитектонските и конструктивните својства на објектот со висока прецизност, за трансформација на облаци од точки во параметарски модели.

Првиот аспект на оваа интерпретација се однесува на идентификацијата на носечките и архитектонските елементи. Преку внимателно визуелно читање на облакот од точки, се препознаваат вертикалните и хоризонталните елементи како сидови, столбови, плочи, греди и тавани, како и елементите на фасадата на објектот, односно прозорци, врати и фасадни површини. Паралелно со тоа се идентификуваат и карактеристични рабови, линии и наклони што се употребуваат како референтни за параметарско моделирање според принципот *modelling by tracing the point cloud* (Слика 6.5). Овие чекори се доследни на стратегиите за моделирање што ги опишуваат Macher et al. (2017), каде визуелното препознавање на структурните елементи од облакот претставува основа за автоматизирани и полуавтоматизирани методи на BIM реконструкција.



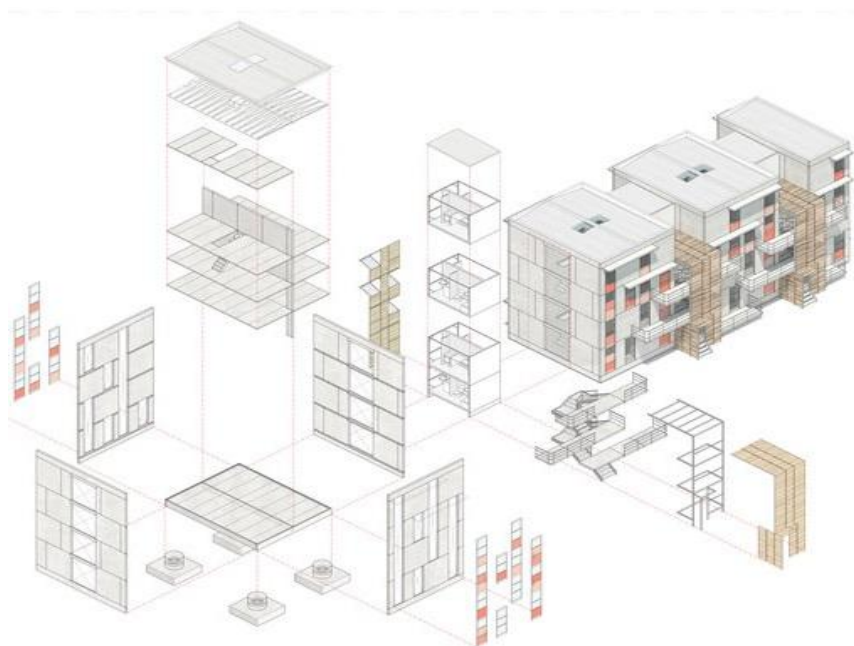
Слика 6.5. Моделирање со трасирање на облакот од точки

Вториот значаен аспект е воспоставувањето структурна и просторна логика, која е клучна за создавање IFC компатибилен модел. Иако облакот од точки обезбедува детална геометриска референца, BIM моделот мора да биде формално структуриран во хиерархиски организации како IfcBuilding, IfcBuildingStorey и IfcSpace, кои ја дефинираат просторната и функционалната распределба на објектот. Во оваа фаза се анализираат бројот и висината на катовите, нивната вертикална организација, позициите на конструктивните оски, како и геометријата и релациите на скалите и вертикалните комуникации. Ова структурирање ја обезбедува основата за стабилен параметарски модел и е во согласност со принципите на тополошка и семантичка организација наведени во ISO 16739-1:2024.

Дел од подготовката е и внимателна анализа на геометриските аномалии кои понекогаш се јавуваат кај SLAM или UAV-LiDAR скенирањето. Иако тие не се резултат на шум, туку на системски ограничувања на технологијата, како на пример благо закривување на облакот од точки кај прави, рамни објекти, најчесто во долги коридори или тунели, мали вертикални отстапувања или локални деформации на површини, кои можат да влијаат врз точноста и стабилноста на BIM моделот. Затоа во оваа фаза се утврдува дали и до кој степен BIM моделот треба да ја одразува реалната состојба или да се идеализира преку поставување референтни рамнини и корисни геометриски ограничувања. Оваа стратегија е во согласност со методолошките препораки на голем број истражувачи, кои нагласуваат дека стабилна параметарска реконструкција е возможна само кога се воспоставуваат референтни рамнини што ја минимизираат акумулираната грешка од сензорските аномалии.

6.3.3. Реконструкција на архитектонски и конструктивни елементи

Реконструкцијата на архитектонските и конструктивните елементи претставува една од најкритичните фази во трансформацијата на облакот од точки во параметарски BIM модел. Таа ја претставува точката каде што метрички прецизни 3D податоци се конвертираат во семантички богата дигитална репрезентација на објектот. Во оваа фаза се применуваат принципите на параметарското моделирање, IFC стандардот и најдобрите практики за Scan-to-BIM, со цел да се постигне модел кој е геометриски прецизен, тополошки комплетен и целосно подготвен за GIS интеграција согласно крајната намена на моделот. Оваа фаза бара балансирање помеѓу реалната сложеност на облакот од точки и логичката структура што ја бараат BIM и GIS платформите.



Слика 6.6. Архитектонски и конструктивни елементи во BIM

Автоматско, полуавтоматско и мануелно моделирање

Методите за реконструкција најчесто се групираат во три категории:

- **автоматско моделирање**, каде алгоритмите препознаваат површини, линии и тела директно од облакот од точки. Овие методи се побрзи, но често произведуваат нерегуларна геометрија која мора да се коригира за да биде компатибилна со IFC,
- **полуавтоматско моделирање**, кое комбинира автоматско детектирање на контури и референтни рамнини со мануелна корекција. Ова е најчесто користениот пристап кај сложени објекти,
- **мануелно моделирање**, кое се применува кога е потребно прецизно моделирање, кога облакот има шум, аномалии или нецелосни сегменти, па во тие случаи е потребна експертска интерпретација за да се создаде параметарски стабилен модел. Овој метод дава највисока точност, но исто така одзема најмногу време.

Баланс меѓу автоматизација и експертска интервенција е неопходен затоа што, на пример, CityGML LOD моделирањето, особено LOD2 и LOD3, бара геометриски чисти и тополошки валидни површини, кои често не можат директно да се добијат од автоматските процеси.

Моделирање на сидови и вертикални елементи

Реконструкцијата започнува со моделирањето на сидовите и другите вертикални носечки компоненти, кои ја формираат базичната структурна рамка. Кога облакот од точки е доволно јасен, може да се користат автоматизирани алатки, кои ја следат контурната линија или рамната површина. Сепак, кај облаци од точки добиени со SLAM скенирање, каде сидовите често имаат мали отклонувања, се применува мануелно извлекување на линии и поставување референтни рамнини за прецизност (Previtali et al.,

2018). Овие сидови се дефинираат како IFC елементи (IfcWall), што е предуслов за нивно правилно претставување во CityGML како WallSurface во LOD2 или LOD3 модели.

Моделирање на плочи, подови и плафони

Хоризонталните елементи се реконструираат преку екстракција на хоризонтални рамнини од облакот од точки. Плочите се дефинираат со параметри како ниво, дебелина, материјал и конструктивна функција. Во случаи на деформирани подови, се применува идеализирање преку референтни рамнини со цел да се добие параметарска стабилност што ја бара IFC стандардот. Овие елементи кореспондираат со CityGML FloorSurface или CeilingSurface, што ја олеснува нивната GIS конверзија и LOD3 реконструкција.

Моделирање на отвори, прозорци и врати

Отворите претставуваат критични елементи за семантичката и тополошката логика на моделот. Тие мораат да се дефинираат со точни димензии, ниво на поставеност, однос со носечките елементи и материјални карактеристики. Во BIM тие се вметнуваат како стандардизирани објекти (IfcWindow, IfcDoor) со релации како IfcRelVoidsElement и IfcRelFillsElement, кои го поврзуваат отворот со сидот што го пробива. Ова е особено важно бидејќи во CityGML отворите мора да бидат изразени како Window или Door објекти, правилно вградени во WallSurface, со што се одржува LOD3 семантиката и топологијата (Kolbe, 2009).

Моделирање на покривни конструкции

Покривот претставува една од најсложените компоненти за реконструкција, особено кога се користат UAV-LiDAR податоци. Покривите можат да содржат комплексни наклони, испусти, мансарди и решетки кои мора да се разложат на параметарски стабилни рамнини. Прецизното моделирање овозможува создавање IFC елементи како IfcRoof, или комбинација на IfcSlab и IfcRoof, што подоцна овозможува генерирање CityGML RoofSurface со LOD2 или LOD3 ниво на деталност.

Моделирање на скали и вертикални комуникации

Скалите и вертикалните комуникации, како скалишни јадра, лифтови и шахти, се моделираат преку препознавање на контури и параметарска реконструкција преку профили. Облакот од точки најчесто дава доволно информација за број на скалила, одморалишта и наклони, но BIM моделот мора да ги дефинира овие елементи функционално: број на скалила, висина, ширина, наклон, релации со нивоа и заштитни елементи (огради). Скалите се вметнуваат како IfcStair или IfcStairFlight, што овозможува нивна употреба во IndoorGML како дел од патни мрежи и LOD4 модели на внатрешни простори (Isikdag & Zlatanova, 2009).

6.3.4. Геометриска валидација и тополошка конзистентност

По реконструкцијата на архитектонските и конструктивните елементи, неопходно е да се спроведе систематска геометриска и тополошка валидација на BIM моделот за да се обезбеди неговата точност, конзистентност и интероперабилност. Овој чекор е многу важен во процесот на BIM-GIS интеграција, бидејќи најмалите геометриски отстапувања или тополошки неправилности можат да резултираат со сериозни грешки при конверзија

во IFC, CityGML, IndoorGML, просторни бази на податоци или други формати потребни за 3Д катастар и напредни просторни анализи. Валидна BIM геометрија е предуслов за успешна трансформација на моделот во просторни стандарди, при што топологијата претставува мост меѓу параметарски моделираните елементи и семантичките структури на GIS системите. Во параметарски BIM модел, односите меѓу елементите најчесто се дефинирани преку правила на моделирање (пример „сидот е носител“, „отворот е вметнат“, „просторот е ограничен“), но тие врски не се секогаш директно интерпретабилни во GIS. Топологијата ја извршува улогата на „преведувач“ затоа што ги формализира просторните односи како експлицитни релации: поврзаност, непрекинатост и ограниченост и дефинираност, врз кои потоа се гради семантиката во GIS. Пример, за 3Д катастар во зграда со повеќе станovi, BIM моделот содржи IfcZone (станбени единици), IfcWall/IfcSlab (граници) и IfcDoor (премини). Преку тополошка проверка се утврдува дали волуменот на посебниот дел (стан) е целосно затворен, дали неговите граници се составени од конкретни конструктивни елементи и дека не се преклопува со соседниот стан или со заедничките делови (ходник, скали). На овој начин, во интегриран BIM-GIS систем за 3Д катастар може да се дефинираат границите на простирање на правата на сопственост, како и да се воспостават релации „стан-граница-заеднички делови“, што е клучно за регистрирање на правата врз недвижностите.

Геометриска валидација

Геометриската валидација се состои од споредување на моделираните BIM елементи со оригиналниот облак од точки, со цел да се процени нивната метричка прецизност. Овој процес најчесто подразбира визуелно и аналитичко преклопување на BIM геометријата со облакот од точки, користејќи алатки за спроведување на анализи на отстапување кои ги прикажуваат отстапувањата преку бои, градиенти или квантитативни статистички индикатори. Овие методи овозможуваат рана детекција на грешки како изместени сидови, неправилно поставени отвори, недоволно прецизни наклони или неусогласени кровни рамнини.

При валидацијата се утврдува максимално дозволено отстапување (праг на толеранција), кое обично се движи меѓу 1–3 cm, во зависност од прецизноста на сензорите и потребите на проектот. За згради наменети за 3Д катастар, праговите често се построги, бидејќи CityGML LOD3 и LADM бараат геометриски валидни и целосно затворени објекти (ISO 19152-1:2024; Kolbe, 2019). Дополнително, се проверува правилноста на вертикалноста и паралелноста на структурните елементи, стабилноста на референтните рамнини и усогласеноста на отвори и фасадни елементи со површините што ги содржат.

Тополошка конзистентност

Тополошката валидација е подеднакво значајна како и геометриската, бидејќи GIS системите работат со формални тополошки структури, а IFC стандардот дефинира релации што ја опишуваат меѓусебната поврзаност на елементите. Топологијата вклучува својства на *поврзаност*, *непрекинатост* и *ограниченост* и *дефинираност* на елементите, кои се критични за конверзија во CityGML и за усогласување со LADM.

Во BIM околината, тополошката логика најчесто се воспоставува и проверува преку релации како:

- IfcRelContainedInSpatialStructure – служи за доделување на градежни елементи

на соодветно ниво од просторната структура, додека самата хиерархија меѓу просторните единици во IFC се воспоставува преку IfcRelAggregates. Конзистентната просторна организација е важна за трансформација кон CityGML, каде може да се воспостави мапирање кон Building, BuildingPart, BuildingStorey и BuildingRoom,

- IfcRelSpaceBoundary – ги опишува физичките и виртуелните граници на просториите и нивната релација со околните елементи, поради што претставува важна основа за изведување на просторни граници и внатрешна топологија при трансформација кон IndoorGML (CellSpaceBoundary),
- IfcRelVoidsElement – ја дефинира врската меѓу отворите (прозорци, врати) и нивните носечки елементи. Правилната дефиниција е неопходна за да не се појават „отвори кои лебдат“ во GIS моделите,
- IfcRelAggregates – се користи за групирање на објекти во просторни единици, што е релевантно за 3Д катастарски единици и LADM (LA_BAUnit).

Тополошката конзистентност претставува основен предуслов за валидна размена на BIM модели, особено кога моделот се користи за GIS, 3Д катастар или трансформација во CityGML. За да се обезбеди оваа валидност, неопходно е секој градежен елемент да биде геометриски затворен, логички поврзан и без грешки што би го нарушиле просторниот интегритет.

Најпрво, се проверува дали геометријата е составена од затворени полиедарни обвивки (closed shells). Тоа значи дека секој сид, плоча или покривна конструкција мора да формира целосно затворен волумен без отвори или процепи помеѓу рамнините од кои е создаден. Ова е особено важно при LOD2 и LOD3 модели, затоа што CityGML и IFC стандардите бараат геометријата да биде тополошки чиста и дефинирана како затворен волумен. Следно, се проверува дали постојат пресекувања сами со себе (self-intersections), односно дали некоја геометриска површина се сече сама со себе. Ваквите пресекувања создаваат нелогични и неисправни форми, што доведува до грешки при визуелизација, трансформација или автоматизирана анализа. Понатаму, се бараат случаи на преклопување на површини кои не треба да се поклопуваат (overlapping faces). На пример, два зида со истата положба или двапати внесена плоча. Ова создава дупликати кои го искривуваат волуменот и можат да предизвикаат погрешни пресметки на површина, волумен или пресек. Следно, потребно е да се елиминираат празнини (voids) или непланирани отвори меѓу површините. Доколку моделот има микропукнатини меѓу обвивките, алгоритмите за конверзија кон CityGML многу често не го распознаваат како валиден податок. На крај, се проверува дали има неправилни пресекувања (invalid intersections), односно нерегуларни пресекувања меѓу различни елементи, пример, греда што „влегува“ во сид на начин што тополошки не е дозволено. Овие грешки го нарушуваат логичкиот интегритет, па со нивно откривање се спречува формирање на нерегуларни 3Д модели на објекти.

Овие проверки се задолжителни бидејќи IFC и CityGML строго пропишуваат дека LOD2 и LOD3 моделите мора да бидат геометриски и тополошки исправни за да може да се користат во урбанистички, катастарски и инженерски апликации (Kolbe, 2019). Само тополошки чисти модели може сигурно да се трансформираат во CityGML, да се интегрираат со GIS или да се користат во 3Д катастарски системи.

Геометриската и тополошката валидација претставуваат основен предуслов за создавање модел кој може успешно да се користи како дигитален близнак во GIS системи. Неконзистентностите што на визуелно ниво може да изгледаат минорни, како неспоеени рабови меѓу сид и плоча, микропразнини кај отвори или мали тополошки аномалии, можат да го нарушат процесот на генерирање 3Д волумени во GIS или да создадат неправилни LADM просторни единици (LA_SpatialUnit). Затоа, валидираниот BIM модел обезбедува сигурна основа за понатамошни GIS анализи, урбани симулации, 3Д катастар, енергетско моделирање и следење на животниот циклус на објектите.

6.3.5. Подготовка на BIM моделот за GIS трансформација

Во фазата на подготовка на BIM моделот за GIS трансформација веќе реконструираниот, геометриски валидиран и семантички структуриран BIM модел се оптимизира за експорт во IFC и последователно за конверзија во CityGML, IndoorGML или други просторни формати. Целта е да се обезбеди модел кој е чист, тополошки стабилен, стандардизиран во однос на нивоата на деталност и целосно усогласен со просторниот референтен систем. Како што истакнуваат повеќе автори, фазата на подготовка најчесто претставува „тесно грло“ во конверзијата, бидејќи GIS системите се многу построги во барањата за тополошка валидност и атрибутна конзистентност отколку традиционалните BIM платформи.

Првиот чекор е систематско отстранување на сите непотребни елементи кои не се релевантни за GIS трансформацијата. Тука спаѓаат:

- линиски помошни елементи што се користени само за моделирање,
- референтни рамнини и линии, точки и линии за конструкција,
- привремени елементи создадени за моделирање, но не и за финална анализа.

Овие ситуации не само што го зголемуваат обемот на податоците, туку можат да предизвикаат грешки при IFC експортирањето и да доведат до невалидни 3Д волумени при генерирање GIS модели (Stouffs et al., 2018). Затоа моделот мора да биде исчистен од сите елементи кои не ја носат примарната геометриска или семантичка информација.

Следниот чекор е проверка и усогласување на нивото на деталност (Level of Development – LOD) на BIM моделот со целните LOD структури во GIS. Вообичаено:

- BIM LOD 300 е најкомпатибилен за конверзија, бидејќи содржи прецизна геометрија и доволно семантика, но без прекумерни детали кои се непотребни или проблематични за GIS,
- CityGML LOD2 и LOD3 најчесто се генерира од LOD 300 BIM модел, каде LOD2 обезбедува волуменска репрезентација со основни архитектонски површини, а LOD3 вклучува прозорци, врати, кровни структури и делови од ентериерот.

Премногу детализирани елементи (LOD 350 или LOD 400) може да предизвикаат тополошки грешки или прекумерно тежок модел, додека недоволно детализирани модели (LOD 200) не содржат доволно површини дефинирани со граници за создавање валидни 3Д волумени. Затоа, хармонизацијата на LOD е суштинска за компатибилност.

Бидејќи GIS системите функционираат во апсолутни координати и бараат дефиниран референтен координатен систем, неопходно е BIM моделот да биде:

- поставен во истиот координатен систем како GIS проектот,
- геореференциран преку механизмите за размена на координати,
- усогласен со референтен координатен систем.

Неправилното или непотполно геореференцирање е една од најчестите причини за неуспешни BIM–GIS конверзии. GIS системите не можат да интегрираат модел кој не содржи апсолутни координати.

Последниот чекор е експортирање на моделот во IFC4, верзија што е препорачана од ISO и OGC за сите процеси на BIM–GIS интеграција. IFC4 овозможува:

- подобрена поддршка за геореференцирање преку IfcProjectedCRS и IfcMapConversion,
- појасни тополошки релации,
- посигурна геометриска репрезентација,
- подобро мапирање на простори и затворени површини.

IFC4 е наполно компатибилен со CityGML 3.0, ESRI BIM-to-GIS работни текови и со IndoorGML, што го прави во моментот најстабилна верзија за интероперабилни системи (ISO 16739-1:2024).

6.4. Интеграција на BIM и GIS

Последната фаза од предложената методологија е суштински сегмент во воспоставувањето на интероперабилен BIM–GIS систем, бидејќи во оваа фаза се овозможува преминот на инженерските модели на објекти во просторна околина. Интеграцијата на BIM моделот во GIS не подразбира само технички трансфер на датотеки, туку претставува комплексен процес на трансформација, стандардизација и семантичко структурирање, со цел да се обезбеди нивна функционална употребливост во просторни анализи и системи за управување со недвижности. Преку стандардизирани формати (IFC, CityGML), геореференцирање, раслојување на елементи и нивно семантичко структурирање, BIM моделите се трансформираат во просторни објекти што можат да се анализираат, визуелизираат и интегрираат со други просторни податоци. Крајниот резултат е напреден тридимензионален просторен модел со вградени инженерски и семантички својства, кој служи како основа за развој на 3Д катастар, дигитални близнаци и паметни градови.

6.4.1. Трансформација на BIM во GIS

Конверзијата на IFC датотеката во формат соодветен за употреба во GIS претставува една од најкритичните фази во процесот на трансформација на BIM моделот во просторен модел. Овој чекор е сложен по својата природа бидејќи спојува два фундаментално различни концептуални света: BIM како инженерски, објектно-ориентиран модел со нагласена параметарска логика и богата семантика, и GIS како просторна информативна платформа со строга тополошка структура, слоевитост, просторна референцираност и ориентација кон анализи и управување со просторот. Додека BIM ги опишува елементите на објектот како поединечни, интелигентни компоненти со материјали, функции, системски врски и хиерархии, GIS ги третира истите

елементи како просторни ентитети: полигони, површини, линии или волумени, кои мора да бидат тополошки валидни, геореференцирани и интегрирани со останатите податочни слоеви.

Токму поради овие структурни разлики, конверзијата од IFC кон GIS не претставува само технички трансфер на формати, туку суштински процес на репараметаризација, реинтерпретација и симплификација на податоците. Во зависност од целната употреба, дали се работи за урбанистичко планирање, катастар, администрирање со недвижности, дигитални близнаци или анализа на инфраструктурни системи, изборот на соодветен формат и методологија е важен фактор за успешно интегрирање на BIM моделот во GIS околина.

6.4.2. Раслојување, структурирање и семантичка трансформација

Процесот на трансформација на IFC моделот во GIS компатибилен формат (Geodatabase, CityGML, 3D Tiles, GeoJSON) се состои од три последователни фази: **раслојување, структурирање и семантичка трансформација**.

Раслојувањето е прв и неопходен чекор бидејќи GIS платформите бараат тематска организација, а не инженерска хиерархија. Архитектонските елементи, како ѕидови, покриви и плочи, се трансформираат во површини (surfaces) или тела (solids). Тие се носители на основната обвивка на објектот. Просторните единици, односно просториите и зоните, се конвертираат во 3Д полиедри и имаат клучна улога во 3Д катастар и во моделирање на функционалната внатрешна организација на објектите (Stoter et al., 2017). Структурните елементи, греди, столбови и плочи, се обработуваат како посебни слоеви, бидејќи нивната улога во GIS најчесто е аналитичка (сеизмички анализи, статички симулации), а не визуелна. Овие елементи можат да се генерализираат заради подобри перформанси на моделот (Zlatanova et al., 2020). Инсталациите (MEP системите) најчесто се претвораат во линии или мрежни структури, бидејќи GIS работи со мрежно базирани аналитички модели. Нивната правилна класификација е клучна за управување со инфраструктурата и оптимизација на системите.

Геометријата мора да биде адаптирана во форма што GIS ја поддржува, при што се користат три основни типови елементарни форми. 3Д тела се користат за волуменски пресметки, 3Д катастар и тополошки анализи. Тие претставуваат најцелосна форма на 3Д геометриска репрезентација и се важни за правно-технички апликации. Површинските модели, како фасади и кровни рамнини, се користат за анализи на соларен потенцијал или за урбанистичко планирање и моделирање (Biljecki et al., 2015). Линиските и мрежните структури се неизбежни за претставување на MEP системите, подземните инсталации и инфраструктурните мрежи. Овозможуваат напредни мрежни GIS анализи како проток, отпор и оптимизација (Sun et al., 2019).

Покрај геометријата, BIM моделот содржи богата семантичка структура која треба да биде задржана и прилагодена за интегрирање со GIS. Атрибутите за материјали, намени и типови на елементите стануваат дел од GIS атрибутните полиња и поддржуваат анализи како енергетска ефикасност, симулации на пожари и слично. Податоците за нивоа и висини се критични за тридимензионално позиционирање и овозможуваат тополошка сегментација и коректно поврзување на елементите во 3Д координатен систем.

Дополнителните технички параметри како топлинска изолација, носивост или акустички својства, иако не се секогаш потребни за GIS, стануваат значајни во специјализирани апликации како пожарни и енергетски симулации или одржување на објекти. Колку повеќе BIM атрибути се зачуваат, толку поголем е аналитичкиот капацитет на интегрираниот BIM-GIS модел.

6.4.3. Пристапи на конверзија од IFC во GIS

При конверзијата на IFC во GIS, главно се издвојуваат три пристапи:

- IFC → CityGML/CityJSON,
- IFC → Просторна база на податоци (FileGDB, PostGIS, GeoPackage),
- IFC → Mesh формати (OBJ, glTF, 3D Tiles).

Секој пристап носи свои методолошки, технички и концептуални предности и ограничувања.

Конверзија IFC → CityGML/ CityJSON

Конверзијата на IFC кон CityGML или неговиот еквивалент заснован на JSON-формат, CityJSON, е методолошки најсоодветна кога целта е формирање на тридимензионални модели на урбани средини, дигитални близнаци на урбани средини или 3Д катастарски системи. CityGML, развиен од OGC, претставува најшироко прифатен меѓународен стандард за 3Д модели на згради и урбани средини. Неговата структура овозможува репрезентација на објекти во различни нивоа на деталност (LOD0–LOD4) и бара тополошки валидни граници, јасно дефинирани односи меѓу објектите и стандардизирани семантички категории.

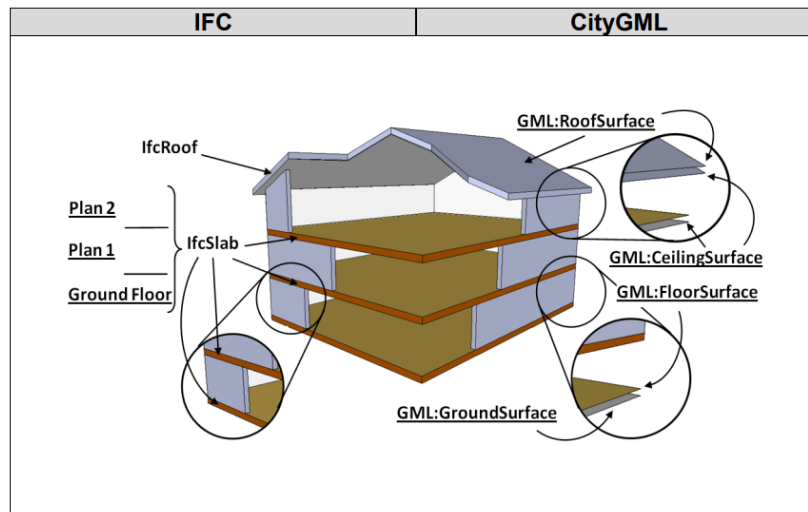
Конверзијата IFC→CityGML обично се врши со алатки како FME, 3DCityDB Importer/Exporter, IfcConvert или решенија базирани на IfcOpenShell, каде процесот се состои од неколку критични чекори. Прво, се одредува нивото на деталност (LOD), што најчесто е LOD2 (архитектонски облик без интерна структура) или LOD3 (детален модел со отвори, фасадни елементи и покривни структури). Изборот на LOD директно зависи од целите: LOD2 е доволен за урбана анализа, додека LOD3 е потребен за 3Д катастар, интероперабилност и дигитални близнаци.

Втората задача е мапирање на IFC ентитетите со CityGML класите, што подразбира трансформација на:

- IfcWall → WallSurface,
- IfcRoof → RoofSurface,
- IfcDoor → Door,
- IfcSpace → BuildingRoom.

Овој процес е комплексен бидејќи IFC е објектно-ориентиран и често содржи семантички податоци што немаат директен еквивалент во CityGML. Критична точка на конверзијата е создавањето волуметриски конзистентни полиедри, што е задолжителен предуслов за валиден CityGML модел. Од таа причина, CityGML не толерира отворени

полиедри, преклопени површини или фасадни површини чија геометрија и топологија не се меѓусебно усогласени за да формираат валидна надворешна обвивка на објектот.



Слика 6.7. Мапирање на IFC елементи во CityGML класи (Извор: El-Mekawy et al., 2012)

CityGML има и неколку ограничувања:

- не поддржува детални MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) системи, па тие најчесто се исклучуваат или поедноставуваат,
- бара строга тополошка валидност, што го ограничува директниот трансфер на комплексни BIM геометрии,
- семантички богатата структура на IFC често се редуцира поради разликите во концептуалните модели.

Во рамките на истражувањето, конверзијата од BIM и IFC кон GIS и CityGML е поставена како контролирана и селективна постапка чија примарна цел е формирање на просторен модел применлив во катастарските системи. Овој пристап се разликува од целосна трансплантација на BIM содржината, бидејќи катастарската регистрација бара пред сè стабилни идентификатори, геореференцирање во државен координатен систем, тополошки валидни 3Д просторни единици и јасно дефинирани граници меѓу посебните делови од зграда. Оттука, методологијата е насочена кон пренос на оние класи и атрибути што имаат директна правна и просторна релевантност: габарит на зградата, организација по катови и 3Д волумени на посебните делови (станови, деловни единици, гаражи, подруми), како и простори (волумени) што се третираат како заеднички делови (ходници, скали и комуникации).

Првата фаза опфаќа подготовка на изворниот IFC модел и воспоставување просторна усогласеност со GIS околината. Класата IfcProject се користи како извор на метаподатоци (единици, контекст на репрезентација, верзија на моделот), но не се мапира во посебна CityGML класа, туку се задржува како опис на изворот на податоците. IfcSite се разгледува како просторен контекст кој, зависно од содржината на IFC, може да обезбеди референтна точка, ориентација или груба теренска репрезентација. Сепак, клучниот чекор во оваа фаза е геореференцирањето, бидејќи примената на овие податоци во катастарските системи подразбира компатибилност со просторните податоци кои се веќе дел од катастарските системи. Дефиницијата на координатниот референтен систем се

презема од класата `IfcProjectedCRS`, додека параметрите за трансформација од локалниот BIM координатен систем кон официјалниот државен координатен систем се преземаат од класата `IfcMapConversion`. Со ова се обезбедува сите геометрии кои ќе се генерираат во CityGML да можат да се интегрираат со катастарските податоци (парцели, административни единици итн.) и да се користат за просторни анализи.

Во втората фаза се конвертира зградата како една инженерска целина. `IfcBuilding` се мапира во `bldg:Building`, при што се поставува барање излезната геометрија да биде валидно 3Д тело (*solid*) секогаш кога тоа е технички возможно. Затворената волуметриска репрезентација е особено важна за претставувањето на недвижностите во катастарските системи, бидејќи овозможува недвосмислено дефинирање на границата на градбата и изведување анализи како пресметка на волумен и детекција на преклопи со други просторни единици. Доколку IFC моделот содржи „отворени“ обвивки или геометриски неконзистентности, се експортира мултиповршинска репрезентација како привремено решение, со дополнителна постапка за чистење и затворање на обвивката. Паралелно, се пренесуваат и основните идентификатори и описни атрибути потребни за понатамошно поврзување со други податоци, како што е IFC `GlobalId` на соодветниот BIM ентитет како уникатна референца кон изворниот запис, како и неговото именување, класификација или намена. На тој начин CityGML објектот останува логички поврзан со изворниот BIM модел.

Третата фаза ја воспоставува вертикалната и функционалната поделба која е суштинска за модел на недвижности применлив во системите за администрирање со недвижности. Како прва класа за трансформација може да се посочи `IfcBuildingStorey` која се конвертира во `bldg:Storey` и се користи за дефинирање на нивоата преку зададени надморски висина и тип на кат (подземен, приземен и сл.). Во CityGML 3.0, `Storey` најчесто функционира како семантичка единица без потреба од сопствена геометрија, но обезбедува податок за катот на кој се наоѓаат просториите или посебните делови од зграда. Централниот објект за примена во катастарскиот систем е посебниот дел во рамките на зградата. Методологијата применува приоритетно правило: доколку IFC моделот содржи `IfcSpatialZone`, таа се користи како примарен носител за конверзија во `bldg:BuildingUnit`, бидејќи `IfcSpatialZone` може да поседува сопствена геометрија и просторна позиција, што овозможува директно добивање на волумен на посебниот дел. Во случаи кога `IfcSpatialZone` не е присутна, а постои `IfcZone`, зоната се користи како логичко групирање на `IfcSpace` објекти и се пристапува кон изведување на `bldg:BuildingUnit` преку обединување на геометриите на просториите што ја сочинуваат просторната единица. `IfcSpace` се конвертира во `bldg:BuildingRoom` кога е потребна детална внатрешна репрезентација, при што просториите се третираат како 3Д волумени кои служат како основа за границите на единиците и за издвојување на заедничките делови. Заедничките делови од зграда се идентификуваат преку намената (ходник, ходник со скали, лифт, влезни ветробрани итн.), со цел да се разликуваат од индивидуалните единици.

Четвртата фаза е насочена кон дефинирање на границите на просторните единици, што е клучна разлика меѓу BIM и GIS кој се користи како дел од катастарскиот систем. Во IFC, `IfcWall`, `IfcSlab` и `IfcRoof` се појавуваат како волуменски конструктивни елементи, додека во CityGML 3.0, се трансформираат во семантички површини: `con:WallSurface` и `con:InteriorWallSurface` за вертикални граници, `con:FloorSurface` и `con:CeilingSurface` за хоризонтални граници меѓу катови, `con:GroundSurface` за контакт со теренот и `con:RoofSurface` за кровна покривка. Овие објекти се претставуваат како

полигонални површини (multi surfaces) кои ја формираат обвивката на зградата и на посебните делови од зграда. Пресудна улога во оваа фаза има IfcRelSpaceBoundary. Иако оваа релација нема сопствена геометрија, таа ја обезбедува формалната врска помеѓу посебниот дел од зграда презентираан на пример преку IfcZone и елементите кои ги дефинираат границите, со што се овозможува правилно задавање на гранични површини на посебниот дел од зградата и конструирање тополошки конзистентни затворени простори. Дополнително, преку идентификација на заеднички гранични површини, може да се изведат соседства меѓу посебните делови од зграда што е суштинско при администрирање со недвижности.

Петтата фаза опфаќа обработка на отвори и комуникациски елементи, доколку примената на моделот подразбира моделирање на ентериерот со неговите функционалности. IfcOpeningElement се користи за дефинирање на отворите, додека IfcRelVoidsElement и IfcRelFillsElement ја обезбедуваат тополошката логика на врската меѓу елементот во кој е направен отворот и елементот со кој се пополнува самиот отвор, пример врата или прозорец. Вратите и прозорците (IfcDoor, IfcWindow) се конвертираат во con:Door и con:Window со соодветни површини и се поврзуваат со сидните површини.

Со вакво фазно поставување, конечниот CityGML 3.0 модел ја задржува семантичката структура неопходна за системите за администрирање со недвижности: bldg:Building го претставува габаритот на градбата, bldg:Storey ја обезбедува вертикалната организација, bldg:BuildingUnit ги репрезентира посебните делови од зграда, а Construction површините ја дефинираат нивната обвивка и соседства. На тој начин, BIM податоците се трансформираат во GIS репрезентација која е тополошки стабилна, геореференцирана и употреблива во администрирањето со недвижности и просторните анализи.

Конверзија IFC → Просторна база на податоци (FileGDB)

Конверзијата од IFC во 3Д просторна база на податоци претставува најфлексибилен и најшироко применуван пристап, особено кога целта е да се овозможат просторни анализи, катастарски апликации, урбано моделирање, инфраструктурни анализи или управување со недвижности во рамките на ArcGIS Pro. Просторните бази на податоци обезбедуваат стабилна просторна инфраструктура со поддршка за 3Д тела, линии, полигони, облаци од точки и атрибутни податоци.

Во овој пристап, BIM елементите се претвораат во 3Д тела, што овозможува напредни аналитички операции како интерсекции, тополошка анализа, пресметување на волумени и симулации. Просторните елементи, односно IfcSpace, се конвертираат во 3Д полиедри кои овозможуваат просторни и функционални анализи, а MEP системите се репрезентираат како линиски или мрежни структури, при што дури и комплексни инженерски мрежи можат да се интегрираат во GIS преку мрежна топологија. Главната предност на овој пристап е неговата толерантност кон BIM геометриски варијации. За разлика од CityGML, кој бара строго дефинирани полиедри, PostGIS и FileGDB можат да обработат дури и делумно неконзистентни полиедри преку автоматизирани алатки за поправка, валидација или реконструкција на геометријата. Дополнително, сите атрибути од BIM моделот можат да се вметнат како GIS атрибути, со што се задржува висок степен на атрибутна корелација.

За катастарски, инженерски и инфраструктурни цели, просторните бази на податоци претставуваат идеална рамнотежа меѓу геометрија, атрибути и аналитичка моќ.

Конверзијата на IFC стандардизирани податоци во File Geodatabase (FileGDB) во ArcGIS Pro треба да се разбере како промена на концепцијата на моделот на податоци: од BIM, кој е објектно-ориентиран и со воспоставени релации помеѓу објектите во моделот (со експлицитни ентитети и врски), кон GIS, кој е организиран преку тематски слоеви (feature classes), објекти (features) и атрибути (fields). Оттука, процесот не претставува едноставно пресликување на IFC шемата во сооднос 1:1, туку структурирана трансформација што резултира со податоци подготвени за просторна анализа, управување и едитирање во GIS. Процесот е претставен преку пет фази, секоја со сопствена цел и специфика, која го прикажува процесот на конверзија нагласувајќи ги суштинските елементи на истиот.

Првата фаза е насочена кон проверка на квалитетот и структурната подготвеност на IFC моделот пред неговото интегрирање во GIS околина. Во оваа фаза се спроведува систематска проверка на:

- просторната хиерархија на моделот (project-site-building-storey-space) со цел да се потврди дека објектите се правилно организирани и дека постои јасна врска меѓу локацијата, зградата, катовите и просториите,
- присуството на клучни ентитети како IfcBuildingStorey и IfcSpace, кои се неопходни доколку конверзијата треба да поддржи внатрешно моделирање, анализа на простории или формирање катастарски единици, и
- атрибутната конзистентност на елементите, односно унифицираност на именувањето, типизацијата и применетите класификации, бидејќи токму овие атрибути подоцна се пресликуваат во табеларни полиња во базата и се користат за филтрирање и тематско раслојување.

Посебен акцент се става на верификација на стабилен и уникатен идентификатор (GlobalId) за секој BIM елемент, бидејќи тој претставува примарен клуч за следливост и референцирање меѓу изворниот BIM објект и неговата GIS репрезентација, како и основа за понатамошно поврзување со надворешни табели (на пр. катастарски записи). Како дополнителна мерка за оптимизација, се препорачува прочистување на моделот преку отстранување на дупликатите и елементи без аналитичка вредност за целната GIS примена (помошна геометрија, линиски објекти користени само за моделирање, привремени или тест елементи). Со ова се намалува непотребниот обем на податоци во излезните слоеви и се подобруваат перформансите при 3Д визуелизација и просторна обработка во GIS.

Втората фаза се однесува на тоа каде и како е позициониран моделот во просторот и во кој координатен систем ќе се прикаже во GIS. Во пракса, BIM моделите многу често се изработуваат во локален координатен систем, поставен според потребите на проектирањето, без релација со државниот координатен систем. Затоа, пред самата конверзија во FileGDB, најпрво се определува координатниот систем во кој ќе се користи во GIS, најчесто државен координатен систем или можеби некој друг во кој се прикажани останатите просторни податоци што ќе се користат во проектот.

Доколку IFC веќе содржи податоци за геореференцирање, тие се пренесуваат преку IfcMapConversion (транслација, ротација, размер) класата која носи параметри за трансформација од локалниот во посакуваниот или државниот координатен систем или

се посочува EPSG кодот на координатниот систем во кој се сместени податоците преку класата `IfcCoordinateReferenceSystem`. Во таков случај, моделот може да се позиционира конзистентно во избраниот координатен систем и да се прикаже правилно уште во BIM околина.

Третата фаза опфаќа преглед на содржината на податоците структурирани според IFC стандардот, така што IFC не се конвертира веднаш, туку најпрво се вчитува како BIM формат, што во суштина значи само едноставен преглед на содржината во *read-only* начин на работа. Тоа значи дека ArcGIS Pro автоматски го „распакува“ моделот на начин разбирлив за GIS и моделот се прикажува како да е база со податочни групи (datasets) и слоеви (feature classes), каде ќе бидат прикажани елементи од различни фази како архитектура, статика, машинство, а во нив тематски слоеви како Walls, Slabs, Doors, Windows, Stairs, Spaces. Овие слоеви може да бидат додадени во 3Д визуелизацијата, да им се додаде симболика, да бидат селектирани и врз нив да се реализираат просторни анализи, но геометријата и атрибутните податоци не може да се менуваат директно, затоа што IFC останува оригинална изворна датотека, додека ArcGIS Pro само ја чита и визуелизира.

Овој чекор е суштински бидејќи овозможува интерпретација на IFC моделот во GIS логика без интервенција врз изворните податоци. При разгледување на IFC како BIM формат, моделот се прикажува како збир на тематски слоеви (feature classes) што може да се користат за визуелизација и основни анализи, но без да се модифицира геометријата или да се наруши оригиналната структура на IFC датотеката. На тој начин без ризик по оригиналните податоци се обезбедува контрола и верификација, во која може да се утврди дали се присутни клучни ентитети како `IfcSpace`, дали елементите се логички групирани во тематски категории и дали атрибутната содржина е доволна за идентификација и следливост (на пр. преку стабилни идентификатори). Дополнително, во оваа фаза се оценува и квалитетот на 3Д геометријата, што е важно за понатамошната обработка и употреба во GIS.

Четвртата фаза во процесот е реалната конверзија во оперативен GIS формат, која во ArcGIS Pro се реализира со процедурата `BIM File To Geodatabase`. Со оваа постапка, *read-only* структурата од BIM моделот се материјализира во FileGDB преку создавање на сет од просторни податоци и регистрирање на тематски слоеви. Од овој момент слоевите повеќе не се виртуелни репрезентации на IFC, туку стануваат објекти во просторната база на податоци кои може да бидат едитирани, што овозможува додавање или отстранување полиња, пресметка на нови атрибути, креирање идентификатори и интеграција со други модели. Ова е особено значајно во BIM-GIS интеграции насочени кон 3Д катастар, каде што често е неопходна дополнителна обработка: прочистување и нормализација на атрибутите, воспоставување клучеви за поврзување со записи од други бази, како и поврзување на податоците со други просторни податоци, како на пример катастарски парцели.

Во рамки на истата процедура, ArcGIS Pro поддржува и логика на дополнување и спојување (`append/merge`). Доколку се внесуваат повеќе BIM/IFC извори кои содржат објекти со исто име и ист геометриски тип, тие можат да се спојат во единствен тематски слој во базата. На пример, при импортирање на два IFC модели што содржат слој Walls со `multipatch` геометрија, може да се добие еден консолидиран тематски слој Walls кој ги опфаќа сидовите од двата извори, притоа задржувајќи ја и геометријата и атрибутите. Ова овозможува понатамошно филтрирање и анализа според записот за изворот на

податоците, на пример преку поле што го евидентира проектот или името на IFC датотеката.

Откако содржината од IFC ќе се материјализира во File Geodatabase (FileGDB), базата повеќе не претставува само складиште на регистрирани 3Д елементи, туку станува оперативна во која BIM податоците можат систематски да се обработуваат, валидираат и интегрираат со други просторни и административни извори. За разлика од *read-only* BIM форматот, каде слоевите се виртуелни прегледи на изворниот IFC и имаат ограничени можности за уредување, FileGDB обезбедува полн капацитет за структурно уредување на атрибутите, изведување аналитички пресметки и моделирање на релации, што е суштинско за апликации како 3Д катастар.

Просторната база на податоци овозможува пресметка на геометриски деривати (површини, волумени) и спроведување просторни проверки, како што се детекција на преклопи, интерсекции и несакани конфликти меѓу 3Д тела. Ваквите проверки се методолошки значајни, бидејќи кај 3Д катастар се очекува просторните единици (на пр. станови, заеднички делови) да бидат геометриски конзистентни и да не се преклопуваат на начин што би создавале правни нелогичности.

Дополнително, во FileGDB импортираните BIM слоеви можат да се интегрираат со катастарски, но и други тематски слоеви, како што се парцели, адресни регистри, инфраструктура итн. Ова овозможува директно воспоставување на просторни односи (пресек, припадност итн.) помеѓу 3Д моделот и останатите просторни податоци, што е неопходно за административна употреба.

Петтата фаза се реализира по извршеното импортирање на податоците во FileGDB и претставува постпроцесна фаза во која импортираните тематски слоеви од BIM моделот се трансформираат во оперативна, доменски структурирана база подготвена за конкретна примена (на пр. 3Д катастар, просторна анализа итн.). Иако алатките за импортирање на BIM модели обезбедуваат основна поделба на елементите во тематски нивоа и пренос на дел од атрибутите, резултатот најчесто е ориентиран кон визуелизација во GIS околина. За да добие можност за аналитички операции, содржината мора да се нормализира, стандардизира и семантички реорганизира.

Во првиот чекор се спроведува нормализација на атрибутите, односно дефинирање на јасен и стабилен атрибутен минимум што ќе служи како основа за следливост, пребарување и поврзување со други надворешни бази на податоци. Типично, се воведуваат или потврдуваат задолжителни полиња како:

- единствен идентификатор на елементот (најчесто GlobalId како надворешен клуч од IFC),
- поле за извор на податоците (име на IFC датотеката, верзија на моделот итн.),
- категорија, класа (IFC класа или стандардизирана тематска категорија),
- кат (storey, level) и
- намена (на пр. станбена, деловна, заедничка, комуникациска).

Во оваа етапа се елиминираат непотребните или неконзистентни полиња, се усогласуваат називи и типови на податоци (текст, број, датум), и се формираат и пополнуваат сите потребни атрибутни полиња со релевантни записи. Ваквата нормализација е неопходна за да се избегне ситуација во која истата информација се

појавува во повеќе варијанти (различно именување или различни кодови), што подоцна би го нарушило функционирањето на системот.

Следно, се воспоставуваат домени и поттипови како механизми за стандардизација и контрола на квалитет. Домените овозможуваат однапред дефинирани листи на дозволени вредности (на пр. тип на простор: стан, деловен простор, ходник, ходник со скали, подрум итн., статус на сопственост: индивидуална, заедничка итн., функционална група: хоризонтална, вертикална комуникација), со што се намалуваат грешките при внесување и се обезбедува конзистентност во целата база. Поттиповите, пак, овозможуваат логичка категоризација во рамки на еден тематски слој (на пример, во слој „Units“ да постојат поттипови стан, деловна просторија, помошна просторија), што е корисно за доделување симболија, правила и различни атрибутни сетови по групи. Паралелно со ова се додаваат индекси (атрибутни и просторни) на клучните полиња, идентификатор, ниво, категорија, извор, а се со цел да се овозможи ефикасно пребарување и побрзо извршување на просторни операции над големи 3Д сетови.

Доколку целната примена е 3Д катастар, во оваа фаза се изведува и најзначајната семантичка надградба: се формираат наменски тематски слоеви (target schema) што подобро го одразуваат административниот и функционалниот концепт на просторот. Наместо да се работи исклучиво со „градежни елементи“ (Walls, Slabs, Doors), се креираат слоеви кои кореспондираат со катастарските ентитети, како што се: зграда, просторни единици, заеднички делови и граници. Овие слоеви може да се добијат преку селекција и трансформација на импортираните IfcSpace, преку агрегирање на простории во единици IfcZone (стан како група простории), или преку изведување на граници од 3Д геометријата.

Клучен дел од петтата фаза е поставувањето на релации, преку кои се реконструираат хиерархиите и функционалните врски што во IFC постојат како објектни релации, но во GIS треба да бидат експлицитно моделирани. Типично се дефинира структура Building→Storey→Unit→Room, како и врски меѓу единици и нивни компоненти (на пр. стан–соба), или меѓу единици и објекти или парцели согласно логиката на катастарските системи. Со овие врски се обезбедува дека GIS моделот не е само збир на 3Д геометрии, туку структуриран систем што поддржува пребарување по административна логика (на пример: покажи ги сите простории што припаѓаат на стан X на кат Y), како и проверки за интегритет (на пример: дали секоја единица има дефиниран кат и припадност кон зграда).

На крај, резултатот од петтата фаза е просторна база во која податоците се:

- атрибутно конзистентни и стандардизирани,
- организирани според намената на моделот, и
- поврзани преку релации што ја поддржуваат намената на системот.

На тој начин, FileGDB престанува да биде само простор за чување на BIM моделот и станува функционална основа за аналитички и административни операции, особено во контекст на 3Д катастар и генерално администрирање со недвижности.

Завршната фаза опфаќа проверки на геометриската и атрибутната конзистентност при што одговара на следните поставени прашања:

- дали 3Д објектите се тополошки валидни и правилно позиционирани,

- дали идентификаторите се уникатни и еднозначни,
- дали нема дупликати по аплицирањето на append/merge функциите,
- дали слоевите се подготвени за просторни анализи и интеграција со катастарски податоци.

Ако одговорите на поставените прашања се позитивни, може да се каже дека конверзијата од IFC во FileGDB се третира како целосен затворен процес кој резултира со оперативни податоци во GIS околина.

Конверзија IFC → Mesh формати (OBJ, glTF, 3D Tiles)

Третиот пристап се заснова на трансформација на IFC моделот во mesh-формати, како OBJ, glTF, glb или 3D Tiles, кои се оптимизирани за визуелизација, рендерирање во реално време и веб-базирани апликации. Овој пристап е особено важен во контекст на развој на дигитални близнаци на урбани средини, публикување на 3Д јавно достапни податоци, презентации и системи за планирање кои бараат брза, интерактивна визуелизација (CesiumJS, Terria, Unreal Engine, Unity).

Меѓутоа, овој метод има суштински недостаток: mesh-форматите се геометриски ориентирани, а не семантички ориентирани. За разлика од IFC, CityGML или FileGDB, во mesh-моделите:

- BIM параметрите се губат или сведуваат на минимум,
- хиерархијата на елементите исчезнува,
- сидовите, прозорците и плочите стануваат само „површини“ без функционално значење,
- нема поддршка за атрибутни табели или релации со други системи.

И покрај тоа, mesh-моделите се исклучително корисни кај визуелни презентации и веб-визуелизации, каде приоритет е брзото прикажување, а не аналитичките можности.

6.4.4. Интеграција на BIM, GIS и LADM

Интеграцијата на BIM, GIS и LADM претставува технолошки и концептуален чекор кон воспоставување на целосно функционален 3Д катастар. Овие технологии, иако се традиционално развивани во различни дисциплинарни контексти, имаат комплементарни карактеристики кои овозможуваат прецизно моделирање, просторна анализа, правна репрезентација и управување со недвижности на повеќекратно повисоко ниво. Интеграцијата се јавува како потреба бидејќи ниту една од трите технологии самостојно не ги опфаќа сите аспекти на катастарот. BIM ја обезбедува деталната физичка структура, GIS ја дава просторната локација и контекст, а LADM ја дефинира правната компонента. Тројната синергија создава можност за автоматизирани трансформации: од параметарска BIM геометрија кон тополошки валидни GIS објекти, а потоа кон правни LADM класи како LA_SpatialUnit, LA_BAUnit и LA_RRR.

LADM функционира како апстрактен правен модел кој дефинира четири групи објекти: простори (LA_SpatialUnit), правно-административни единици (LA_BAUnit), права, ограничувања, одговорности (LA_RRR) и носители на права (LA_Party) (ISO 19152-2:2025). Во

интегрираниот BIM-GIS систем, LADM ги презема трансформираниите 3Д простори од GIS и ги опишува со правни атрибути.

Клучни чекори:

- Екстракција на 3Д просторни единици од BIM модели,
- Мапирање на IFC елементи кон LADM класи (IfcSpace → LA_SpatialUnit),
- Поврзување со сопственичките односи (LA_Party, LA_RRR).

Во оваа фаза, GIS игра критична улога како посредничка платформа што генерира тополошки чисти 3Д полиедри, потребни за валидни LADM записи.

Со интеграцијата на BIM, GIS и LADM се заокружува методолошката рамка во која податоците добиени преку современи аквизициски пристапи и пристапи за моделирање, се трансформираат во интероперабилен, семантички структуриран и правно употреблив 3Д информациски систем. На овој начин, BIM моделот не останува само инженерска репрезентација на физичката структура на објектот, туку преку GIS добива просторен контекст, а преку LADM и формална врска со правните и административните аспекти на недвижностите. Ваквиот пристап овозможува воспоставување на тополошки конзистентни 3Д просторни единици, нивно поврзување со правата, ограничувањата и носителите на тие права, како и нивна примена во катастарски, урбанистички и управувачки системи.

Во целина, предложената методолошка рамка воспоставува логички, технички и семантички кохерентен работен тек за интегрирање на ласерското скенирање, BIM и GIS во единствен просторен систем. Нејзината суштинска вредност е во тоа што ги поврзува сите клучни фази, од аквизиција на просторни податоци, преку нивна обработка, регистрација и геореференцирање, до параметарско BIM моделирање, валидација и трансформација во GIS околина. Со ваков пристап се обезбедува не само геометриска точност и тополошка конзистентност, туку и зачувување на семантичките и атрибутните својства на моделот, што е неопходно за неговата интероперабилност и аналитичка употребливост. Оттука, методологијата не треба да се разбере како низа изолирани технички операции, туку како интегриран концепт во кој секоја фаза директно влијае врз сигурноста, валидноста и применливоста на крајниот модел.

Воедно, предложениот пристап ја потврдува тезата дека BIM-GIS интеграцијата претставува основа за развој на современи системи за 3Д катастар, дигитални близнаци и напредно управување со недвижностите и просторот. Преку внимателно структурирана трансформација на облаците од точки во параметарски и геореференцирани BIM модели, а потоа и во GIS компатибилни просторни единици, се создава рамка во која физичката, просторната и правната димензија на објектот можат да се разгледуваат како единствен и меѓусебно поврзан систем. На тој начин, ова поглавје претставува методолошка основа за понатамошните практични анализи и апликативни модели во истражувањето, при што предложената методологија овозможува не само верификација на концептот, туку и негова реална примена.

7. СТУДИИ НА СЛУЧАЈ

За да се утврди практичната применливост на предложената методологија и нејзината способност да функционира во реални услови, истата е имплементирана на конкретни објекти и ситуации кои меѓусебно се разликуваат по геометрија, комплексност и просторен контекст и како такви се од специфично значење за сеопфатно тестирање на предложената методологија. Во рамки на ова поглавје, за секој модел систематски се презентирани сите последователни чекори од предложената методологија, почнувајќи од процесот на аквизиција на просторни податоци, преку креирање на BIM модел, па сè до негово трансформирање и имплементација во GIS околина. Дополнително, за сите модели е спроведена евалуација на геометриската точност, атрибутната конзистентност и семантичката целосност, со цел да се обезбеди објективна и споредлива оцена на квалитетот на моделите и нивната погодност за понатамошна употреба во контекст на BIM-GIS интеграција и 3Д катастар.

7.1. Модел 1 - 3Д модел на стан во станбено-деловна зграда

Како прв модел за тестирање и валидација на предложената методологија во рамките на експерименталните анализи на докторскиот труд, е избран стан во станбено-деловна зграда. Станот се состои од простории со претежно правилна геометриска форма, но истовремено се присутни специфични карактеристични градбени елементи како столбови и греди, кои треба да бидат земени предвид при моделирање и одредување на различни геометриски карактеристики (должина, површина, волумен). Преку првиот модел е предвидено да се направи тестирање и валидација на првите две фази од предложената методологија, односно да се направи анализа на можностите за примена на ласерската технологија за аквизицијата на просторни податоци во затворен простор со примена на рачен LiDAR-скенер кој користи SLAM-технологија, како и да се направи контрола на квалитетот на BIM модел формиран врз основа на просторни податоци добиени со ласерско скенирање.

Изборот на стан како почетен модел за тестирање и валидација е методолошки значаен од две причини. Прво, станбената единица претставува контролирана средина за проверка на клучните чекори во Scan-to-BIM процесот, без дополнителни влијанија од сложени надворешни услови. Второ, иако геометријата на просториите е претежно правилна, присуството на столбови и греди создава реален инженерски контекст во кој треба да се демонстрира дека предложениот пристап не резултира само со „визуелно точен“ модел, туку со геометриски и метрички валидна дигитална репрезентација, погодна за извлекување мерливи карактеристики и нивна понатамошна семантичка организација. Аквизицијата во рамки на овој модел е реализирана без користење на GNSS-базиран режим на скенирање (RTK, PPK), поради што облакот од точки е дефиниран во локален координатен систем. Ваквиот пристап овозможува валидација на релативната геометриска стабилност на реконструкцијата и проверка на способноста за прецизно репродуцирање на димензиите и просторните односи меѓу елементите во рамки на истиот објект. На тој начин, се минимизира влијанието на глобалното позиционирање и се обезбедува „чиста“ експериментална евалуација на ефектите од геометриската реконструкција врз квалитетот на BIM моделот. Истовремено, така формираната геометриска конструкција останува отворена за понатамошни GIS и катастарски сценарија.

7.1.1. Аквизиција на просторни податоци

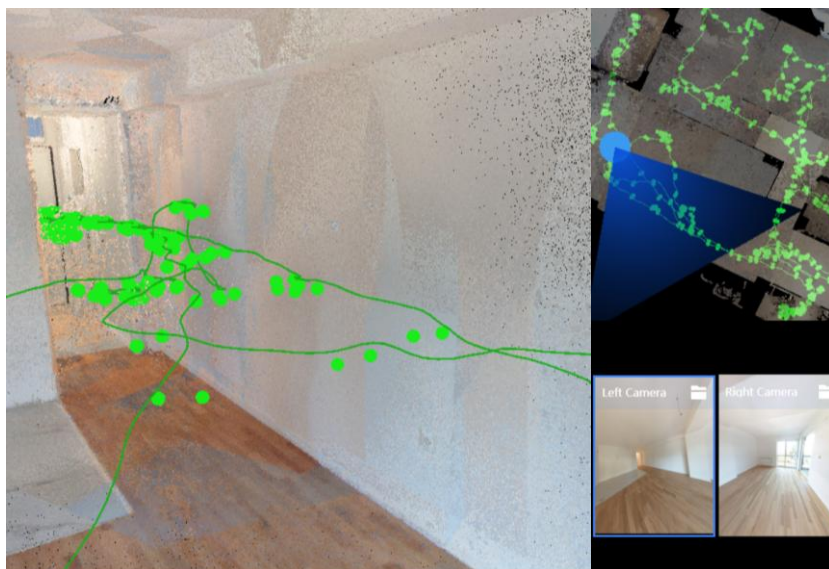
Ласерското скенирање на внатрешниот простор на станот е реализирано со примена на рачен LiDAR-скенер базиран на SLAM-технологија од компанијата Geosun, модел GS-200G. Уредот претставува интегрирана платформа за прецизно просторно снимање, при што во единствен компактен систем се комбинирани LiDAR-сензор (Livox Mid-360), GNSS/INS (POS) модул и две ултраширокоаголни камери со ефективна резолуција 2×20 MP и видно поле од 200° . Камерите работат во режим на временски синхронизирано снимање со LiDAR-аквизицијата, што овозможува визуелно документирање на сцената и поддршка за колоризација на облакот од точки во рамки на софтверската обработка. Според техничките спецификации, системот обезбедува релативна точност ≤ 1 cm и апсолутна точност ≤ 5 cm, што го позиционира уредот меѓу високо-прецизните мобилни SLAM-системи и го прави применлив во широк спектар на професионални домени, вклучувајќи архитектонско проектирање, градежништво, геодетски мерења, мониторинг и документирање на објекти. Дополнително, можноста за брза аквизиција на 3Д просторни податоци е особено значајна при работа во урбани, затворени и динамични средини, каде се бара ефикасно снимање со задржување на потребното ниво на просторна точност и деталност.

LiDAR-сензорот работи со брзина од 200 000 точки во секунда, што овозможува континуирана и густа аквизиција на просторни податоци при мобилно снимање. Работниот опсег изнесува до 40 m при 10% рефлексивност, а достигнува до 70 m при 80% рефлексивност, што го прави погоден за снимање на површини со различни материјални својства и во различни амбиентални услови. Видното поле на LiDAR сензорот е 360° хоризонтално и -7° до 52° вертикално, со што се обезбедува обемно покривање на просторот при рачно движење низ објектот. Во однос на прецизноста на далечина, во спецификацијата е наведена точност од ≤ 2 cm на 10 m, односно ≤ 3 cm на 0,2 m. Што се однесува до POS модулот (точноста на позиционирање), уредот е опремен со систем gSpin 210 со фреквенција на ажурирање 200 Hz, при што е наведена позициска точност од $\pm 0,02$ m хоризонтално и $\pm 0,03$ m вертикално, како и аголна точност од $0,015^\circ$ (pitch/roll) и $0,040^\circ$ (heading).

Системот поддржува повеќе GNSS сигнали и констелации (вклучувајќи GPS, GLONASS, Galileo и BeiDou), како и работни режими на скенирање SLAM, RTK-SLAM и PPK-SLAM, зависно од условите и барањата на проектот. Бидејќи главната цел кај првиот модел е тестирање и валидација на геометриските карактеристики на BIM моделот (форма, димензии и деталност) формиран врз основа на добиениот облак од точки, скенирањето е спроведено без активирање на GNSS-базираните режими (RTK-SLAM, PPK-SLAM). Поради тоа, облакот од точки е регистриран во локален координатен систем, а следствено на тоа и BIM моделот е формиран во истиот локален координатен систем.

Ласерското скенирање на станот е спроведено во рамки на една работна сесија со оптимална брзина на движење од 0,5–1,0 m/s, што овозможува соодветна густина на податоци и минимизирање на геометриски деформации во траекторијата. Траекторијата на движење ги покрива сите простории во станот. Поради присуство на повеќе преградни ѕидови и тесни премини, особено внимание е посветено на одржување на визуелна и геометриска поврзаност на скенерот со веќе скенираните области, со цел да се избегне губење на SLAM-решението. Скенерот автоматски генерира траекторија во реално време, а податоците се чуваат во соодветен формат за понатамошна обработка. На Слика 7.1 се дадени: првичниот необработен облак од точки, траекторијата на движење и позициите

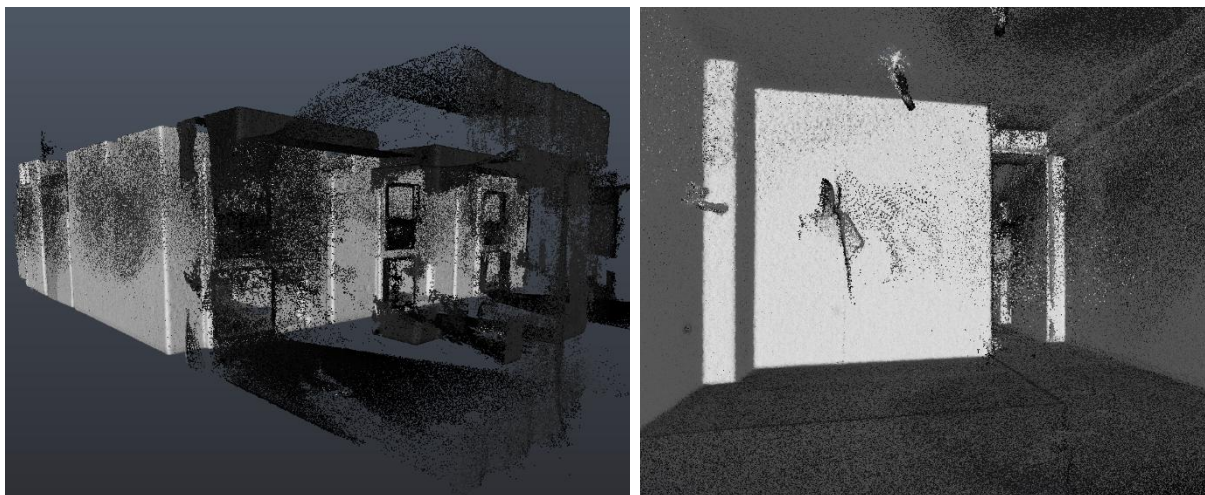
на скенирање, како и фотографии направени во позицијата на скенирање од двете камери. Средната густина на добиениот облак од точки изнесува околу 30 000 pt/m², што е многу висока резолуција и е повеќе од доволна за моделирање на сидови, плочи, отвори, прозорски профили, греди, столбови и слично и формирање на BIM модел со ниво на деталност LOD 300–350 („as-built“, односно модел на изведена состојба со архитектонски и конструктивни детали).



Слика 7.1. Облак од точки добиен со SLAM скенирање, траекторија на движење, позиции на скенирање и фотографии од позицијата на скенирање

7.1.2. Процесирање на облаци од точки

Процесирањето на облаците од точки претставува подготовка на податоците за понатамошно тридимензионално моделирање и се состои од регистрација, отстранување на шум и груби грешки, како и сегментација на податоците. Облакот од точки добиен со ласерското скенирање на станот е регистриран во локален координатен систем. Понатаму, согласно воспоставената методологија спроведена е елиминација на шум и нерегуларни точки, како што се точките создадени од подвижни објекти (врати и луѓе во движење), точки кои визуелно „продираат“ низ прозорците, точки кои се резултат од рефлексija на стаклени и сјајни материјали или случаи кога ласерскиот зрак привремено изгубил стабилност. Ваквите точки го нарушуваат интегритетот на облакот и го отежнуваат точното визуелно препознавање на просторно дефинираните елементи. На Слика 7.2 е прикажан необработен облак од точки добиен со ласерското скенирање на станот, визуелизиран според интензитетот на рефлексijата на ласерскиот импулс. Посветлите точки означуваат повисок интензитет, додека потемните соодветствуваат на понизок интензитет на рефлексija. Јасно се забележуваат точки со поголемо распрснување и шум, кои претставуваат груби грешки и се предмет на отстранување во фазата на обработка на облакот од точки. Најчесто точките кои претставуваат груби грешки имаат низок интензитет на рефлексija.



Слика 7.2. Необработен облак од точки визуелизиран според интензитет на рефлексија на ласерски импулс (Опсег на бои: од црна, низок интензитет до бела, висок интензитет)

На левата страна на Слика 7.2, шумот во облик на точки што „излегуваат“ од рамнината на прозорецот е резултат на специфичните својства на стаклото како транспарентна и делумно рефлексивна површина, при што доаѓа до погрешни или повеќекратни рефлексии на ласерскиот зрак. Овие ефекти предизвикуваат неправилно позиционирање на точките зад или пред реалната геометрија на прозорецот. На десната страна на Слика 7.2, шумот се јавува заради присуство и движење на човек за време на скенирањето, што резултира со појава на контури од човечка силуета и дисперзирани точки. Ваквите динамички објекти не се дел од статичната геометрија на просторот и претставуваат типичен извор на шум кој треба да се отстрани во фазата на прочистување на облакот од точки.

Со примена на статистичко филтрирање, кластеризација и рачна интервенција, облакот е прочистен од груби грешки со што се сведува на метрички и визуелно конзистентен податочен сет. Дополнително, направена е сегментацијата на облакот од точки за распределба на точките во структурни целини (под, сид, таван и слично), издвојувајќи ги клучните архитектонски и конструктивни компоненти од околниот шум и објекти кои не се предмет на моделирање. Сегментацијата претставува постапка на тематско групирање на точките според нивната просторна припадност и геометриски карактеристики, при што се обезбедува појасна организација на податочниот сет и полесна интерпретација на доминантните површини. Во практична примена, оваа постапка може да се третира како опционален чекор, односно да се применува кога е потребно да се олесни препознавањето на елементите и да се намали сложеноста при моделирање, особено кај простори со повеќе архитектонски детали или присутни конструктивни елементи. Покрај тоа, во случаи кога облакот од точки има многу висока густина во одделни делови, можно е да се примени контролирана редукција на густината (downsampling или decimation), со цел да се подобри ефикасноста на обработката и работата во BIM околина, без суштинско нарушување на геометриската репрезентативност. Исто така, и овој чекор не е задолжителен, а се применува зависно од обемот на податоците, расположливите компјутерски ресурси и бараното ниво на деталност.

По реализација на фазата на процесирање на облакот од точки, моделот е подготвен за следната фаза – BIM моделирање. На Слика 7.3 е прикажан обработениот облак од точки на станот, подготвен за креирање на BIM модел.



Слика 7.3. Обработен облак од точки добиен со ласерско скенирање на станот со рачен SLAM скенер

7.1.3. Креирање на BIM модел

Постапката на креирање на BIM модел врз основа на облакот од точки претставува систематски и итеративен процес кој започнува со анализа и интерпретација на геометриските и просторните податоци содржани во скенираниот облак од точки. Во оваа фаза се поставуваат основните конструктивни и архитектонски елементи, како што се сидови, подови, тавани, врати, прозорци и носечки столбови, при што точноста на нивното позиционирање директно зависи од квалитетот и прегледноста на облакот од точки. За успешно препознавање и моделирање на овие карактеристични елементи, неопходно е изведување на повеќе хоризонтални и вертикални пресеци низ облакот од точки. Овие пресеци овозможуваат издвојување на релевантни геометриски карактеристики и појасна визуелна интерпретација на просторната организација на објектот. На Слика 7.4 е прикажан хоризонтален пресек на облакот од точки на висинско ниво од 2,0 до 2,3 m од подот. Ваквиот хоризонтален пресек овозможува јасна и континуирана детекција на контурите на сидовите, столбовите, како и отворите за врати и прозорци, при што нивната дебелина, позиција и меѓусебна поврзаност стануваат лесно препознатливи. Како резултат, овој поглед наликува на речиси целосно подготвена скица на етажен премер на станот, која може директно да се искористи како основа за понатамошно BIM моделирање.

Следејќи ги јасно изразените контури и геометриски карактеристики во облакот од точки, се врши постепено и контролирано поставување на конструктивните и архитектонските елементи на станот во BIM околина. Во овој чекор врз основа на обработениот облак од точки е направена интерпретација на скенираните просторни податоци и нивна трансформација во параметарски елементи со дефинирана геометрија, димензии и семантика. Облакот од точки, всушност, служи како референтна геометриска подлога врз основа на која се моделирани сидовите, подовите, таваните, отворите и другите елементи, со постојана проверка на усогласеноста помеѓу моделот и реалната состојба.



Слика 74. Хоризонтален пресек на облакот од точки во ВІМ околина

За целосно и прецизно оформување на тридимензионалниот модел, покрај анализата преку хоризонтални пресеци, неопходно е изведување и на повеќе вертикални пресеци низ облакот од точки. Вертикалните пресеци овозможуваат јасна детекција на висинските карактеристики на просторот, како што се висината на таваните, положбата и димензиите на гредите, како и висината и вертикалната распределба на прозорците и вратите. Дополнително, тие се важни за точно дефинирање на рамнините на подот и таванот, односно за одредување на висината на сидовите. Кај објекти со повеќе нивоа, вертикалните пресеци имаат особено значајна улога, бидејќи овозможуваат прецизно утврдување на висините на катовите, меѓукатните конструкции и нивната меѓусебна поврзаност.



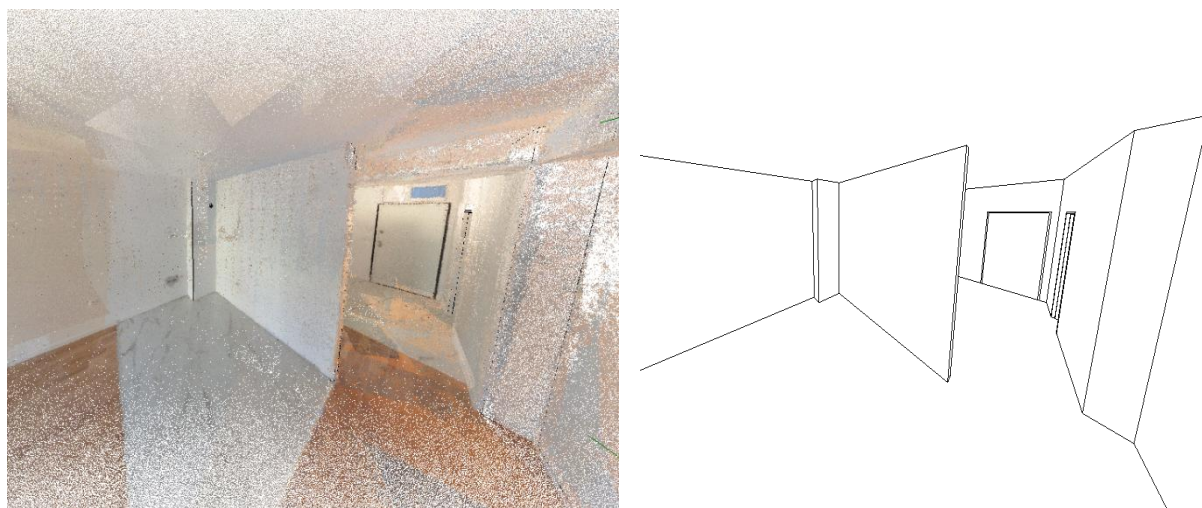
Слика 75. Вертикален пресек на облакот од точки добиен со ласерско скенирање на станот



Слика 7.6. Вертикален пресек на облак од точки и BIM модел на станот

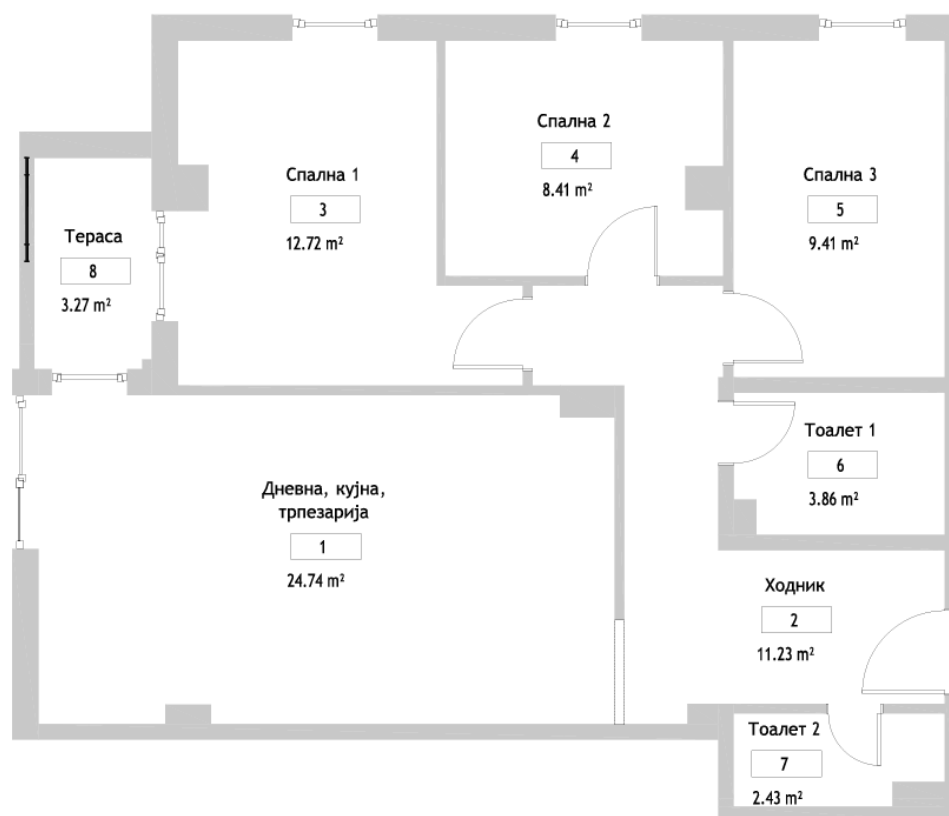
На Слика 7.5 е прикажан вертикален пресек на облакот од точки добиен со ласерско скенирање, кој овозможува јасна визуелизација на висинските карактеристики на просторот, вклучително положбата на подот, таванот и вертикалните конструктивни елементи. На Слика 7.6 е прикажан вертикален пресек на облакот од точки преклопен со BIM моделот, при што јасно се согледува усогласеноста помеѓу моделираната геометрија и скенираните податоци, што ја потврдува геометриската точност и квалитетот на изработениот модел.

Во текот на моделирањето дополнително може да се направи и виртуелен поглед во внатрешноста на моделот. Ваков поглед е прикажан на Слика 7.7, каде на левата страна е даден деталниот облак од точки добиен со ласерското скенирање, кој обезбедува фотореалистична репрезентација на внатрешниот простор, вклучувајќи ги површините на сидовите, подовите и вратите, додека на десната страна е прикажан BIM моделот кој го репрезентира истиот тој простор. Овој приказ овозможува прецизна валидација на моделот, идентификација на отстапувања, како и навремено коригирање на потенцијални грешки во моделирањето.



Слика 7.7. 3Д поглед во моделот (лево – облак од точки преклопен со BIM модел, десно – BIM модел)

По целосното формирање на BIM моделот, основата на добиениот модел (Слика 7.8) целосно е усогласена со основата од облакот од точки добиен со ласерското скенирање (Слика 7.4), што потврдува дека процесот на моделирање е изведен со високо ниво на просторна точност. Ваквото совпаѓање претставува индикатор за успешна интерпретација на скенираните податоци и коректно позиционирање на сите конструктивни и архитектонски елементи во BIM околина.



Слика 7.8. 2Д основа на BIM модел на станот

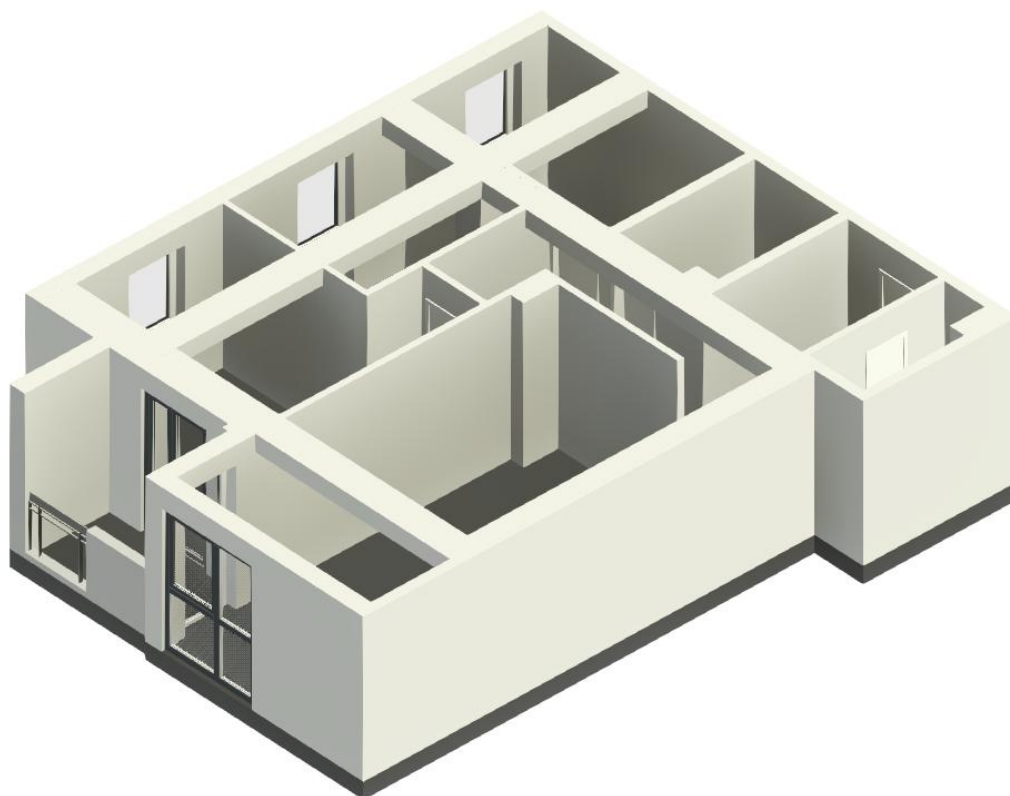
Секоја просторија во BIM моделот, согласно IFC стандардот, е дефинирана како посебен простор, односно *IfcSpace*, со јасно утврдени геометриски граници и придружни атрибутни и семантички податоци. Овие простори претставуваат основна единица за просторна анализа и овозможуваат структурирано управување со податоци поврзани со намената, површината, волуменот и функционалните карактеристики на поединечните простори. Повеќе *IfcSpace* ентитети можат логички да се групираат во повисоко ниво на просторна организација, дефинирано како *IfcZone*, што овозможува поврзување на простори според функционална, правна или оперативна логика. Во рамките на оваа студија на случај, каде што се разгледува една станбена единица, сите поединечни простории се логички поврзани во една заедничка зона (*IfcZone*), со што се овозможува интегрално разгледување на станот како единствена функционална и просторна целина.

По целосното формирање на BIM моделот и дефинирањето на просторната структура преку *IfcSpace* и *IfcZone*, можно е автоматски да се генерираат детални просторни извештаи. Овие извештаи содржат информации за бројот на простории, нивната површина, волумен, намена и други релевантни параметри, што претставува значајна предност во однос на традиционалните методи на документирање. Во Табела 7.1 е прикажан преглед на сите формирани простори во моделот (*IfcSpace*), кои служат како основа за понатамошни анализи и примена во контекст на 3Д катастар и управување со недвижности.

Табела 7.1. Формирани простори во моделот (IfcSpace)

Број на простор/просторија (IfcSpace)	Име на просторија	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
1	Дневна, кујна, трпезарија	24,7	66,8
2	Ходник	11,2	30,3
3	Спална 1	12,7	34,3
4	Спална 2	8,4	22,7
5	Спална 3	9,4	25,4
6	Тоалет 1	3,9	10,4
7	Тоалет 2	2,4	6,6
8	Тераса	3,3	8,8

По спроведување на фазата на BIM моделирање, се добива модел на станот кој претставува веродостојна и геометриски прецизна дигитална репрезентација на фактичката состојба на објектот. Финалниот BIM модел ги инкорпорира сите релевантни конструктивни и архитектонски елементи, вклучително сидови, подови, тавани, врати, прозорци, како и внатрешната просторна организација. Финалниот BIM модел е прикажан во тридимензионален приказ на Слика 7.9.



Слика 7.9. 3Д визуализација на BIM модел на станот

7.1.4. Евалуација и валидација на моделот

Со цел да се изврши евалуација и валидација и да се оцени геометриската точност и доверливоста на BIM моделот формиран преку Scan-to-BIM процесот, спроведена е компаративна статистичка анализа со независни референтни мерења на должини измерени со ласерски уред за мерење должини (класичен геодетски етажен премер). Ваквиот премер, согласно *Законой за катџасџар на недвижности*, претставува стандардна постапка при регистрација на внатрешната површина на објекти со намена – стан. Етажниот премер е реализиран со примена на ласерски уред за мерење должини со декларирана точност од ± 2 mm, што обезбедува високо ниво на доверливост на референтните податоци. Компаративната анализа е извршена за сите релевантни должини измерени во хоризонтална рамнина, со што се овозможува директна споредба помеѓу димензиите добиени од BIM моделот и оние од класичниот геодетски премер. Дополнително, извршени се и мерења во вертикална рамнина, за сеопфатно тестирање на тридимензионалната точност на моделот, вклучително висината на просториите, положбата на подот и таванот. Иако согласно важечките прописи етажниот премер на стан се спроведува како дводимензионален премер, без мерење на висините и пресметување на волумен, во рамките на овој докторски труд е направен проширен пристап кон евалуација во сите три димензии. Ваквиот пристап е значаен со оглед на тоа што една од клучните цели на истражувањето е формирање на детални и геометриски релевантни 3Д модели на објекти, кои ќе претставуваат основа за воспоставување и понатамошен развој на 3Д катастарски системи.



Слика 7.10. Должини [m] извлечени од BIM модел

Табела 7.2. Компаративна анализа на должини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветниите должини извлечени од BIM модел

Број на просторија	Име на просторија	Класичен премер [m]	BIM модел [m]	Разлика [m]
1	Дневна, кујна, трпезарија	2,01	2,01	0,00
		1,77	1,77	0,00
		1,44	1,46	-0,02
		0,22	0,23	-0,01
		0,53	0,53	0,00
		0,23	0,23	0,00
		5,49	5,47	0,02
		2,33	2,33	0,00
		0,62	0,63	-0,01
		0,27	0,25	0,02
		4,97	4,97	0,00
		0,88	0,87	0,01
		0,11	0,11	0,00
2	Ходник	0,25	0,24	0,01
		2,69	2,69	0,00
		2,96	2,96	0,00
		1,76	1,76	0,00
		2,61	2,60	0,01
		2,00	1,99	0,01
		0,07	0,06	0,01
		1,04	1,05	-0,01
		2,19	2,19	0,00
		1,15	1,15	0,00
		1,07	1,05	0,02
3	Спална 1	1,32	1,31	0,01
		0,96	0,98	-0,02
		0,70	0,68	0,02
		2,83	2,81	0,02
		1,01	0,99	0,02
		1,15	1,15	0,00
		3,96	3,96	0,00
		0,75	0,74	0,01
		1,27	1,27	0,00
		0,33	0,35	-0,02
		0,55	0,53	0,02
		0,35	0,35	0,00
4	Спална 2	1,42	1,43	-0,01
		1,28	1,27	0,01
		0,98	0,99	-0,01
		0,96	0,94	0,02
		2,72	2,70	0,02
		3,20	3,19	0,01
		0,75	0,76	-0,01
		0,42	0,44	-0,02
		0,52	0,51	0,01
		0,44	0,44	0,00
		1,44	1,44	0,00

5	Спална 3	0,99	0,98	0,01
		0,99	1,00	-0,01
		0,46	0,45	0,01
		3,88	3,87	0,01
		2,44	2,43	0,01
		3,85	3,87	-0,02
6	Тоалет 1	1,21	1,23	-0,02
		0,25	0,26	-0,01
		0,41	0,41	0,00
		2,16	2,17	-0,01
		1,62	1,64	-0,02
		2,40	2,42	-0,02
7	Тоалет 2	2,41	2,43	-0,02
		1,83	1,82	0,01
		0,27	0,28	-0,01
		0,59	0,61	-0,02
		0,79	0,79	0,00
		1,07	1,07	0,00
8	Тераса	0,10	0,11	-0,01
		0,10	0,11	-0,01
		2,30	2,32	-0,02
		1,33	1,35	-0,02
		2,41	2,43	-0,02
		1,22	1,24	-0,02
Должина од Спална 1 до Спална 3		8,79	8,80	-0,01
Должина од Спална 2 до Ходник		7,86	7,85	0,01

Табела 7.3. Компаративна анализа на висини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветниите висини извлечени од BIM модел

Број на просторија	Име на просторија	Висина	Класичен премер [m]	BIM модел [m]	Разлика [m]
1	Дневна, кујна, трпезарија	до таван	2,68	2,68	0,00
		до греда	2,38	2,38	0,00
2	Ходник	до таван	2,68	2,68	0,00
		до греда	2,39	2,38	0,01
3	Спална 1	до таван	2,68	2,68	0,00
		до греда	2,38	2,38	0,00
4	Спална 2	до таван	2,68	2,68	0,00
		до греда	2,38	2,38	0,00
5	Спална 3	до таван	2,68	2,68	0,00
		до греда	2,38	2,38	0,00
6	Тоалет 1	до таван	2,35	2,35	0,00
7	Тоалет 2	до таван	2,37	2,36	0,01
8	Тераса	до таван	2,66	2,65	0,01

Анализата е базирана на 86 парови мерења дадени во Табела 7.2 и Табела 7.3, при што за секоја должина е достапна: класично измерена вредност и соодветна вредност извлечена од BIM моделот (Слика 7.10). Опсегот на набљудуваните растојанија е широк ($\approx 0,07\text{--}8,79\text{ m}$ за класичните мерења, односно $\approx 0,06\text{--}8,80\text{ m}$ во BIM моделот), што овозможува проверка на конзистентноста на моделот и кај кратки и кај подолги растојанија во внатрешниот простор.

Оцената на геометриската точност и доверливоста на BIM моделот е базирана врз статистичка анализа на растојанијата добиени со класично мерење со ласерски уред за мерење должини и соодветните растојанија во BIM моделот. За секое мерено растојание е дефинирана разликата помеѓу класичното мерење (референтна вредност) и соодветната вредност од BIM моделот, како:

$$\Delta L_i = L_{\text{ref},i} - L_{\text{BIM},i}$$

каде, ΔL_i е отстапувањето на i -тото растојание, $L_{\text{ref},i}$ е растојанието од класичниот премер (референтна вредност), а $L_{\text{BIM},i}$ е растојанието извлечено од BIM моделот. Негативен предзнак на ΔL означува дека BIM дава поголема вредност во однос на референтната, додека позитивен предзнак означува дека растојанието во BIM моделот е пократко во однос на класичното мерење.

Клучен индикатор за постоење на систематска грешка е просечната разлика:

$$\overline{\Delta L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta L_i$$

каде n е бројот на споредени растојанија. Добиената вредност $\overline{\Delta L} \approx -0,00047\text{ m}$ ($\approx -0,47\text{ mm}$) укажува дека растојанијата во BIM моделот се речиси идентични со класично измерените, со занемарлива тенденција растојанијата во BIM моделот да бидат минимално подолги.

Интервалот на доверба од 95% (CI – Confidence Interval) за $\overline{\Delta L}$, кој се пресметува како:

$$\overline{\Delta L} \pm t_{0.975, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

во овој случај ја опфаќа нулата ($\approx [-3,05\text{ mm}, +2,12\text{ mm}]$), што статистички значи дека не се потврдува постоење на систематско „скратување“ или „продолжување“ на BIM моделот. Практично, ова значи дека нема статистички значајна систематска пристрасност и тоа претставува силен аргумент дека методологијата на моделирање, скалирање и екстракција на мерките од облакот од точки е стабилна и конзистентна.

За да се опише варијабилноста или дисперзијата на отстапувањата, се користи стандардната девијација:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}{n - 1}}$$

каде s ја опишува варијабилноста на отстапувањата околу средната разлика. Добиената вредност $s \approx 0,01207 \text{ m}$ ($\approx 1,21 \text{ cm}$) покажува дека отстапувањата се концентрирани на сантиметарско ниво.

За практична интерпретација користени се средната апсолутна грешка – MAE (Mean Absolute Error) и корен од средната квадратна грешка – RMSE (Root Mean Square Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta L_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta L_i)^2}$$

за кои се добиени вредностите $MAE \approx 0,91 \text{ cm}$, додека $RMSE \approx 1,20 \text{ cm}$. Фактот дека RMSE е блиску до стандардната девијација е очекуван кога просечната разлика $\overline{\Delta L}$ е близу нула, што дополнително ја потврдува оцената дека доминантна компонента е случајната варијабилност, а не систематска грешка.

Покрај средната апсолутна и коренот од средната квадратна грешка, важно е да се знае и најлошото сценарио, односно максимално апсолутно отстапување:

$$\max |\Delta L| \approx 2 \text{ cm}$$

Од аспект на практична примена, значајно е што разликите кај сите споредени растојанија се во рамки на $\pm 2 \text{ cm}$. Дополнително, праговите покажуваат дека околу 73% од растојанијата се во $\pm 1 \text{ cm}$, а околу 36% се во $\pm 5 \text{ mm}$, што е добар индикатор за висока конзистентност на BIM моделот во однос на референтните мерења.

За да се процени во кои граници може да се очекува да бидат најголем дел од отстапувањата, се користи интервалот на согласност од 95% (LoA - Limits of Agreement):

$$\overline{\Delta L} \pm 1.96 s \approx [-2,41 \text{ cm}, +2,32 \text{ cm}]$$

Овој резултат означува дека при слични услови на скенирање и моделирање, кај околу 95% од растојанијата, BIM ќе отстапува од класичниот премер приближно $\pm 2,3$ - $2,4 \text{ cm}$. Важно е што интервалот е концентриран близу нула, па отстапувањата се симетрични и не покажуваат насочена деформација.

Спроведената компаративна анализа покажува дека точноста на BIM моделот, добиен врз основа на ласерско скенирање, е споредлива со точноста на класичниот геодеТСки премер, при што отстапувањата се во рамки на прифатливи толеранции. Ова укажува дека добиените 3Д модели ги задоволуваат основните критериуми за форма, геометрија, димензии и просторен однос, што се клучни предуслови за нивна практична примена. Со оглед на ваквите карактеристики, ласерското скенирање и BIM моделите имаат значителен потенцијал за примена во процесите на регистрација на правата врз недвижностите и солидна основа за воспоставување и развој на 3Д катастарски системи. Во Табела 7.4 се дадени прегледно статистичките параметри од компаративната анализа на растојанија мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните растојанија од BIM моделот.

Табела 7.4. Статистички параметри од компаративната анализа на растојанија мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветниите растојанија од BIM модел

Статистички параметар	ΔL
Број на мерења – n	86
Средна разлика – $\overline{\Delta L}$	-0,47 mm
Интервал на доверба од 95%	[-3,05 mm, +2,12 mm]
Стандардна девијација – s	1,21 cm
Средна апсолутна грешка – MAE	0,91 cm
Средна квадратна грешка – $RMSE$	1,20 cm
Максимално апсолутно отстапување – $\max \Delta L $	2 cm
Интервал на согласност од 95%	[-2,41 cm, +2,32 cm]

Спроведените експериментални анализи укажуваат дека примената на ласерското скенирање во комбинација со BIM моделирање претставува ефикасен, брз и технички оправдан пристап за дигитално документирање на внатрешни простори. Во споредба со класичниот геодетски премер, ласерското скенирање овозможува значително побрза аквизиција на просторни податоци, особено кај поголеми и покомплексни објекти, каде што традиционалните методи се временски пообемни.

Дополнителна предност на овој пристап е можноста за формирање фотореалистична и геометриски детална документација на внатрешниот простор, при што се опфаќаат сите релевантни конструктивни и архитектонски елементи. Облакот од точки обезбедува богати просторни податоци кои овозможуваат моделирање на сложени геометрии, јасно дефинирање на формата, димензиите и меѓусебните просторни односи помеѓу елементите. Ваквото ниво на деталност не само што го олеснува процесот на BIM моделирање, туку и овозможува дополнителни анализи кои не се изводливи со класичен геодетски премер.

7.2. Модел 2 - 3Д модел на пешачки мост „Влајко“

Како втор модел за тестирање и валидација на предложената методологија е избран пешачкиот мост „Влајко“ во Скопје. Станува збор за специфичен објект од повеќе аспекти на управување со недвижностите, а особено во доменот на регистрација на правата врз недвижностите, заради сложената 3Д ситуација. Во однос на првиот модел, овој модел претставува методолошки повисоко и покомплексно ниво за анализа. Додека првиот модел беше насочен кон верификација на основната функционалност на предложениот пристап (геометриска конзистентност, моделирање и трансформација на облаците од точки во конзистентен BIM модел), вториот модел ја проширува рамката преку воведување објект со поголема структурна сложеност, со повеќе функционално издвоени делови во рамки на една целина и тестирање на методологијата во услови поблиски до реални урбани сценарија, каде BIM моделот се интегрира во GIS околина со јасно дефинирана просторна поставеност. Вториот модел е насочен кон воспоставување меѓурелативски односи помеѓу локалната содржина на посебните делови и нивната

просторна и функционална поврзаност со надворешни недвижности и инфраструктурни елементи. Ова е особено значајно во контекст на 3Д катастарските системи, каде не е доволна само геометриската репрезентација на објектот, туку е неопходно и моделирање на релациите (припадност, поврзаност, пресек, контакт) што ја поддржуваат правната и административната димензија на недвижностите. Следствено, вториот модел не служи само за проверка на точноста и интероперабилноста, туку и за потврда на семантичката структура на интегрираниот модел и неговата применливост за анализа и администрирање во 3Д просторот.

Пешачкиот мост „Влајко“ (Слика 7.11) претставува комплексен надземен пешачки премин лоциран над булеварот „Партизански одреди“ во населбата Влае, во близина на мостот „Обединети нации“. Објектот е карактеристичен по својата комбинирана функција, при што покрај примарната намена за пешачко поврзување, содржи и 16 деловни простори, по осум од двете страни на затворениот премин, со централен коридор за движење. Мостот „Влајко“ е изведен како челична носечка конструкција со изразена просторна решетка, комбинирана со стаклени коси сидови, фасадни панели, бетонски столбови и декоративни архитектонски профили на столбовите. Вертикалната достапност е обезбедена преку лифтови интегрирани во носечките столбови на мостот, како и преку надворешни скали и ескалатори поставени од двете страни на објектот. Оваа комбинација на конструктивни, архитектонски и функционални елементи го прави мостот „Влајко“ особено репрезентативен пример за тестирање и валидација на предложената методологија кај комплексни објекти.



Слика 7.11. Фотографија од пешачки мост „Влајко“

Од аспект на регистрација на правата на недвижностите, заради ограничувањето на 2Д катастарските системи, каде објектите се регистрираат според границите на нивната основа проектирана во 2Д рамнина, речиси е невозможна реална регистрација на самиот објект, бидејќи постои вертикално преклопување на повеќе недвижности со различна намена, односно сообраќајница, пешачки мост и деловни простори. Моменталната регистрација на мостот „Влајко“ во Геодетско-катастарскиот

информационен систем е заснована на четири полигони, кои ги репрезентираат четирите столба, а истите, регистрирани на овој начин, би се толкувале како четири посебни објекти, па според тоа и се нумерирани како посебни објекти со редни броеви од 1 до 4. Ваквиот пристап имплицира дека столбовите се третираат како независни објекти, без јасна врска со надземната конструкција која тие ја носат, што од правен и функционален аспект не ја одразува реалната состојба. Дополнително, деловните простори кои се наоѓаат во телото на пешачкиот премин не се дефинирани според нивната реална просторна позиција. Наместо тоа, тие се регистрирани на сосема друга локација, односно во рамките на границите на објектот број 1, еден од четирите столба на мостот. Со ова, нивната вистинска просторна поставеност и однос со останатите делови на објектот целосно се губат во катастарската регистрација. Уште поизразен проблем претставува фактот дека затворениот пешачки коридор, како функционално и конструктивно значаен простор, воопшто не постои како регистрирана просторна единица во системот.

На Слика 7.12 е прикажана ортофотото снимка преклопена со 2Д катастарска содржина на локацијата на пешачкиот мост „Влајко“. Со жолта боја се означени четирите полигони кои одговараат на основите на носечките столбови на мостот. Овие полигони ја претставуваат единствената катастарска репрезентација на објектот во актуелниот катастарски систем. Регистрираните полигони ја опфаќаат само контактната површина на столбовите со теренот, додека целиот надземен дел од мостот, односно пешачкиот коридор и деловните простори, не се опфатени со никаква просторна репрезентација. Истовремено, сообраќајницата под мостот е регистрирана како посебна површина, без информација за надземниот преклоп и ограничувањата кои произлегуваат од постоењето на мостот.



Слика 7.12. Ортофотото снимка и регистрирани катастарски парцели и објекти (жолти полигони – регистрирани објекти (столбови) на мост „Влајко“)

Овој објект јасно ја илустрира суштинската слабост на 2Д катастарските системи: неможнoста да се прикажат вертикалните просторни односи и комплексните преклопувања на недвижности со различна намена. Оваа ситуација претставува силен аргумент за потребата од 3Д катастарски модели базирани на BIM и GIS интеграција, каде

што мостот, деловните простори, пешачкиот коридор и сообраќајницата би биле регистрирани како јасно дефинирани 3Д просторни единици со недвосмислени правни и просторни односи.

7.2.1. Аквизиција на просторни податоци

Првиот чекор во рамки на предложената методологија опфаќа аквизиција на просторни податоци со висока геометриска резолуција и точност, кои претставуваат предуслов за изработка на квалитетен и веродостоен BIM модел на објектот. Имајќи ја предвид сложената геометрија на мостот „Влајко“, големиот број конструктивни елементи и присуството на бројни архитектонски детали, примената на класичен геодетски премер би била временски неефикасна, а воедно и методолошки ограничувачка во поглед на сеопфатноста и деталноста на регистрираните податоци. Со примената на ласерско скенирање овој проблем се надминува, бидејќи ласерското скенирање овозможува брза, систематска и детална регистрација на реалната состојба на објектот преку генерирање густ облак од точки.

Ласерското скенирање на мостот „Влајко“ е реализирано со примена на рачен SLAM-базиран 3D LiDAR скенер RobotSLAM на компанијата South Surveying & Mapping Technology (Слика 7.13). Уредот претставува целосно интегрирана платформа која комбинира LiDAR-сензор, IMU-модул, панорамска камера, контролна електроника и вградено напојување во единствен компактен систем. Овој дизајн овозможува мобилно, брзо и ефикасно снимање во затворени и конструктивно комплексни простори. Овој ласерски скенер овозможува визуелизација на облакот од точки и траекторијата на движење во реално време, што значително го подобрува контролирањето на покриеноста и квалитетот на податоците. Дополнително, бојата на облакот од точки се додава директно на терен, што резултира со конзистентни и висококвалитетни колоризирани облаци од точки.

Според техничката спецификација, LiDAR-сензорот работи со брзина од 200 000 точки во секунда и фреквенција на скенирање од 10 Hz, при што обезбедува густо и континуирано снимање со минимални празнини во просторната репрезентација. Видното поле е 360° хоризонтално и -7° до 52° вертикално, што овозможува целосна просторна покриеност при рачно движење низ објектите. Работниот опсег е 0.1–70 m, со наведен капацитет за снимање на објекти со 10% и 80% рефлексивност, што го прави уредот применлив во широк спектар материјали и осветлувачки услови. Прецизноста на системот е на ниво на релативна точност до приближно 1 cm, што е особено релевантно за инженерски, архитектонски и геодетски апликации кои бараат високо ниво на геометриска веродостојност. Вградената IMU со фреквенција од 200 Hz овозможува стабилна траекторија, а механизмите за анти-интерференција придонесуваат за робустност на податоците дури и во услови со рефлексивни или структурно комплексни површини. Уредот користи две CMOS камери, со поддршка за 6K видео и 21 MP фотографии, што овозможува висококвалитетна текстура на облакот од точки. Панорамската камера Rapo360 II дополнително обезбедува 360° визуелно документирање на околината. Благодарение на неговата техничка робустност, геометриска прецизност и напредна интеграција на сензори, овој уред претставува оптимално решение за бројни професионални апликации: архитектонско и инженерско снимање, документирање на фасади, контрола на тунели, геодетски мерења, реконструкција на простори, форензичко документирање и итни интервенции. Со можноста за брза аквизиција на 3Д податоци и

автоматско моделирање на траекторијата, системот овозможува ефикасно снимање на сложени урбани и ентериерни амбиенти, каде традиционалните TLS системи би биле побавни или непрактични.

Поради релативно малата висина на објектот и неговата пристапност, сите просторни податоци од надворешноста и внатрешноста на објектот се успешно собрани со примена на рачниот LiDAR скенер RobotSLAM. Дополнително, со цел да се спроведе евалуација и валидација на добиениот модел, односно да се тестира можноста за примена на ласерското скенирање при регистрација на габаритот на објектите во катастарските системи, реализиран е и контролен (референтен) класичен геодетски премер со тотална станица (Слика 7.13). За селектирани 58 карактеристични точки од објектот одредени се X, Y и Z координати во државен координатен систем со цел да се направи компаративна анализа на вредностите добиени со снимање со тотална станица и координатите за истите точки извлечени од BIM моделот формиран врз основа на облакот од точки добиен со ласерското скенирање со LiDAR-SLAM рачен скенер.



Слика 7.13. Снимање на мост „Влајко“, лево – рачен скенер, десно – тотална станица

Ласерското скенирање на мостот Влајко со рачен SLAM-скенер бара внимателно планирање на траекторијата на движење и организацијата на работните сесии за да се обезбеди целосна покриеност и минимизирање на акумулираното отклонување (drift). Кај објекти од овој тип, рационален пристап е скенирањето да се подели во повеќе пократки сесии со јасно дефинирани јазли (loop closures), наместо една долга непрекината траса. Секој сегмент треба да обезбеди доволно преклопување меѓу соседните траектории, како и повеќекратни минувања покрај геометриски „стабилни“ структури (столбови, огради, рабови на коловозната плоча), со цел SLAM алгоритмот да има доволно карактеристики за робусна локализација. Брзината на движење директно влијае на квалитетот на регистрацијата, односно умерено, континуирано темпо со минимални нагли забрзувања и

ротации го намалува ризикот од деформации, додека кратки задржувања на критични делови овозможуваат поголема густина и подобра дефинираност на деталите.

Во отсуство на RTK поддршка кај применетиот рачен ласерски скенер, геореференцирањето на облакот од точки се изведува преку познати точки, при што клучна е конзистентната поврзаност меѓу локалниот координатен систем на SLAM-скенерот и државниот координатен систем. Во овој случај се користени четири референтни точки распоредени од двете страни на мостот, чии координати се определени со GNSS-уред и служат како референтна рамка за трансформација на конечниот облак од точки. Практично, скенирањето започнува на позната точка и завршува на позната точка (по можност повторно на почетната или на друга референтна точка), со што се создава силна геометриска врска за корекција на акумулираното отстапување и стабилизирање на решението. Овој процес овозможува облакот од точки да биде директно употреблив за понатамошна обработка (филтрирање, редукција на густината на облакот од точки, сегментација и чистење на груби грешки), како и за понатамошно BIM моделирање и интеграција со GIS.

За добивање на комплетни и детални просторни податоци за мостот „Влајко“, ласерското скенирање е спроведено опфаќајќи ги сите релевантни делови од внатрешноста и надворешноста на објектот, вклучувајќи ги внатрешниот пешачки коридор, деловните простори, челичната конструкција, столбовите, скалите и ескалаторите. Ласерското скенирање на објектот е спроведено со оптимална брзина на движење од 0,5–1,0 m/s, додека средната густина на добиениот облак од точки изнесува околу 6 000 pt/m², што овозможува формирање на квалитетен BIM модел со ниво на деталност LOD 300–350. Ласерското скенирање на објектот е реализирано во две работни сесии при што се формирани два сета просторни податоци кои во фазата на обработка на податоците се регистрирани и интегрирани во единствен, конзистентен облак од точки, кој служи како основа за понатамошно моделирање и развој на BIM моделот.

7.2.2. Процесирање на облаци од точки

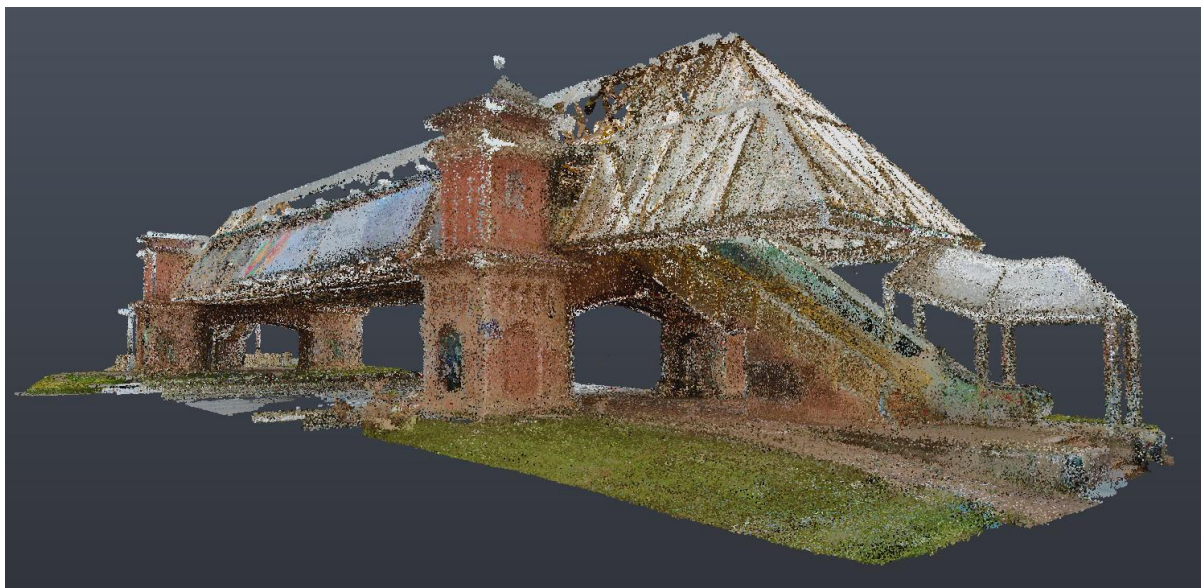
Согласно воспоставената методологија, следен чекор е процесирање на облаците од точки добиени со ласерско скенирање од првиот чекор. Овој чекор ги опфаќа процесите на интеграција на податоците добиени од различните скенирања, регистрација во државен координатен систем, отстранување на шум и груби грешки, како и селективна редукција на густината и сегментација на податоците. За разлика од првиот модел, каде скенирањето е извршено на внатрешен станбен простор и регистрацијата е реализирана во локален координатен систем, во вториот модел е применет пристап на геореференцирање и позиционирање на моделот во државен координатен систем. Имено, облаците од точки добиени од надворешното и внатрешното скенирање со рачен SLAM скенер, првично се формирани во локалниот координатен систем на уредот, по што е извршена трансформација и усогласување во државниот координатен систем врз основа на четири претходно дефинирани и измерени референтни точки со GNSS-уред, поставени од двете страни на мостот. Во практична смисла, референтните точки служат како стабилна референтна рамка преку која се пресметува просторна трансформација, со што се обезбедува апсолутна позициона конзистентност на целиот податочен сет. Дополнително, интеграцијата на облаците од точки од двете работни сесии е реализирана преку преклопни делови и карактеристични конструктивни елементи (столбови, рабови на конструкции и пристапни отвори), при што е постигнат единствен, континуиран облак

од точки што ја опфаќа надворешната геометрија и внатрешните површини на мостот. На Слика 7.14 е прикажан интегриран облак од точки добиен со ласерското скенирање на мостот „Влајко“, визуелизиран според бојата на точките.



Слика 7.14. Интегриран облак од точки добиен со ласерско скенирање на мост „Влајко“

Понатаму, спроведена е елиминација на шумови и нерегуларни точки кои се типични за SLAM-скенирање во урбана средина. Отстранети се точки создадени од динамични објекти (возила, пешаци), точки од вегетација и нејзиното движење, како и точки со низок интензитет и нестабилни рефлексии што се јавуваат на површини со различни материјални својства (метални делови, влажни или затемнети површини, потенцијално рефлексивни елементи). Ваквите точки визуелно се манифестираат како распрснати кластери по должината на траекторијата или локални двојни површини, кои го нарушуваат интегритетот на облакот и го отежнуваат препознавањето на реалните конструктивни линии и рамнини. Прочистувањето е извршено со комбиниран пристап што вклучува статистичко филтрирање (отстранување на изолирани точки), кластеризација и селективна рачна интервенција во критични зони (околу отвори, споеви, скали и рабови на конструкцијата). Поради високата густина на податоците и нееднаквата распределба на точки (поголема густина во зони на побавно движење и преклопување), дополнително е применета редукција на густината (decimation) со контролирани параметри, со цел да се намали редундантноста на точки на големи рамни површини, без губење на геометриски значајните детали. На крај, извршена е сегментација на облакот од точки во структурни целини релевантни за објектот (главни носечки елементи, сидни површини и кули, скали и платформи, терен и околни објекти), со што е добиен метрички и визуелно конзистентен податочен сет подготвен за следната фаза, односно 3Д моделирање и формирање на BIM модел.



Слика 7.15. Обработен облак од точки од надворешноста на мост „Влајко“



Слика 7.16. Обработен облак од точки од внатрешноста на мост „Влајко“

На Слика 7.15 и Слика 7.16 е прикажан конечниот обработен облак од точки од надворешноста и внатрешноста на мостот „Влајко“, по завршената интеграција и обработка, кои претставуваат основа за следната фаза – BIM моделирање.

7.2.3. Креирање на BIM модел

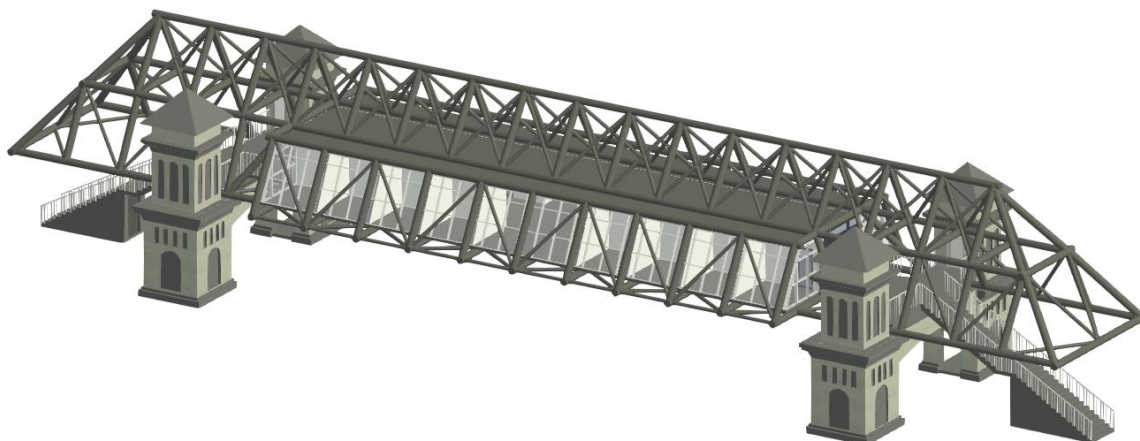
Постапката за формирање на BIM модел за пешачкиот мост „Влајко“ врз основа на обработениот облак од точки започнува со систематска анализа и интерпретација на геометриските и просторните податоци содржани во скенираниот сет на податоци. За разлика од станбени објекти, каде доминираат рамни, ортогонални површини (сидови, подови и тавани), кај мостовска конструкција како „Влајко“ морфологијата е пред сè дефинирана со линеарни и просторни конструктивни компоненти (главни решетки, горен и долен појас, дијагонали, вертикали и сл.), надополнети со волуменски елементи на

пристапните кули и површински елементи на пешачкиот коридор. Во оваа фаза, точноста на позиционирањето и димензионирањето на елементите директно зависи од квалитетот на претходната обработка на облакот од точки, неговата прегледност и просторна конзистентност, особено имајќи предвид дека податоците се прибрани во две работни сесии и дополнително се геореференцирани во државен координатен систем преку референтни точки. Ваквото геореференцирање обезбедува моделот да претставува *as-is* репрезентација со дефинирана просторна референца, што е клучно за понатамошна интеграција со GIS.

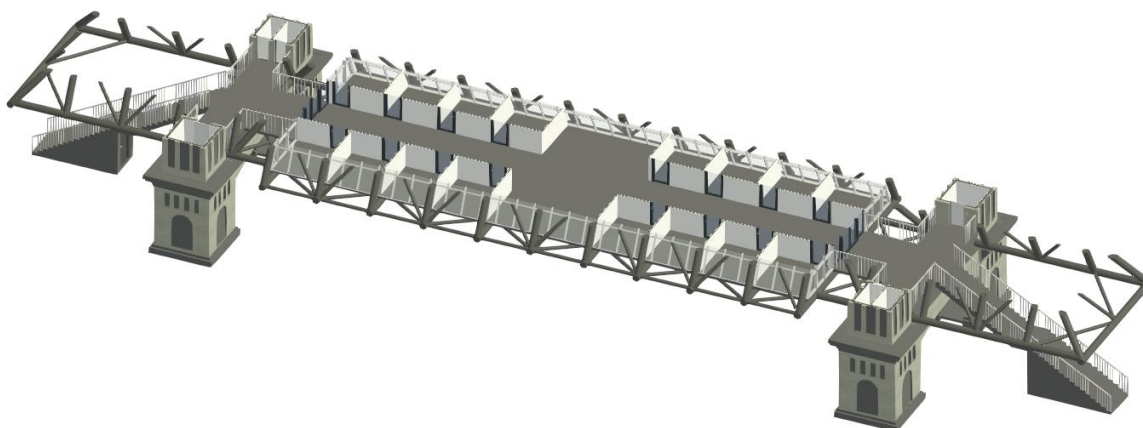
За прецизно препознавање и моделирање на карактеристичните носечки елементи, облакот од точки се анализира преку серија попречни и надолжни пресеци, како и локални пресечни рамнини во зони со сложени споеви и промени на геометријата. Попречните пресеци овозможуваат јасно препознавање на висинската распределба и меѓусебната поставеност на главните носечки компоненти (горен и долен појас, попречни врски и носачи на пешачкиот коридор), додека надолжните пресеци обезбедуваат континуирана визуелизација на геометријата по должината на распонот и помагаат при моделирање на повторливоста и ритмот на решетката. Во зоните на премин кон кулите, пристапните платформи и скалите се применуваат дополнителни вертикални пресеци со цел да се утврди габаритот, положбата и димензиите на отворите, нивоата на платформите и дебелината на сидовите.

Моделирањето во BIM околина се изведува постепено, од глобална кон детална геометрија. Најпрво се дефинираат главните референтни оски и карактеристични рамнини (оска на пешачкиот коридор, клучни наклонети рамнини и контролни пресеци), по што се моделира примарниот носечки систем (главните решетки и нивните елементи). Потоа се додаваат секундарните компоненти и архитектонските елементи како конструкцијата и површината на пешачкиот коридор, внатрешните сидови на деловните простори, стаклените фасадни елементи, пристапните кули, огради и скали. Секој елемент се внесува како параметарски објект со јасно дефинирана геометрија, димензии и семантичка класификација, со што моделот добива не само визуелна, туку и информациска вредност, релевантна за понатамошни анализи и размена на податоци.

Во текот на целата постапка се спроведува континуирана контрола на усогласеноста помеѓу BIM моделот и облакот од точки преку споредба во карактеристични пресеци и визуелна инспекција во критичните зони (споеви, рабови, отвори и области со промена на геометрија). Овој итеративен пристап овозможува навремено откривање и корекција на отстапувања, како и одржување на конзистентна геометрија низ целиот модел. Конечниот резултат е BIM модел кој ја репрезентира реалната состојба на мостот „Влајко“ со соодветно ниво на деталност и точност за инженерски потреби и за понатамошни просторни анализи. Финалниот BIM модел на мостот „Влајко“ е прикажан во тридимензионален приказ на сликите 7.17 и 7.18.



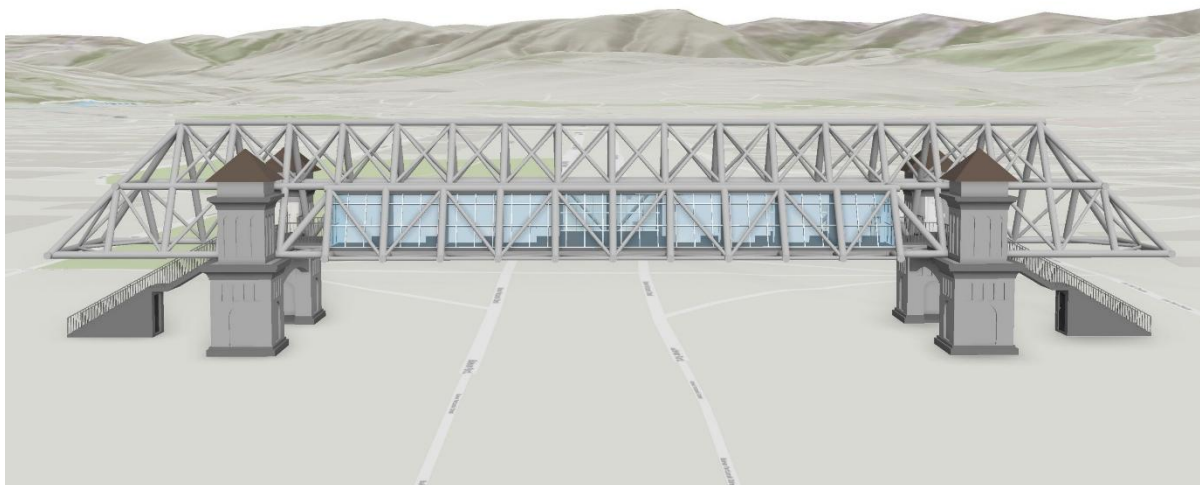
Слика 7.17. 3Д поглед на BIM моделот на мост „Влајко“



Слика 7.18. Хоризонтален пресек на BIM модел на мост „Влајко“

7.2.4. Интеграција на BIM и GIS

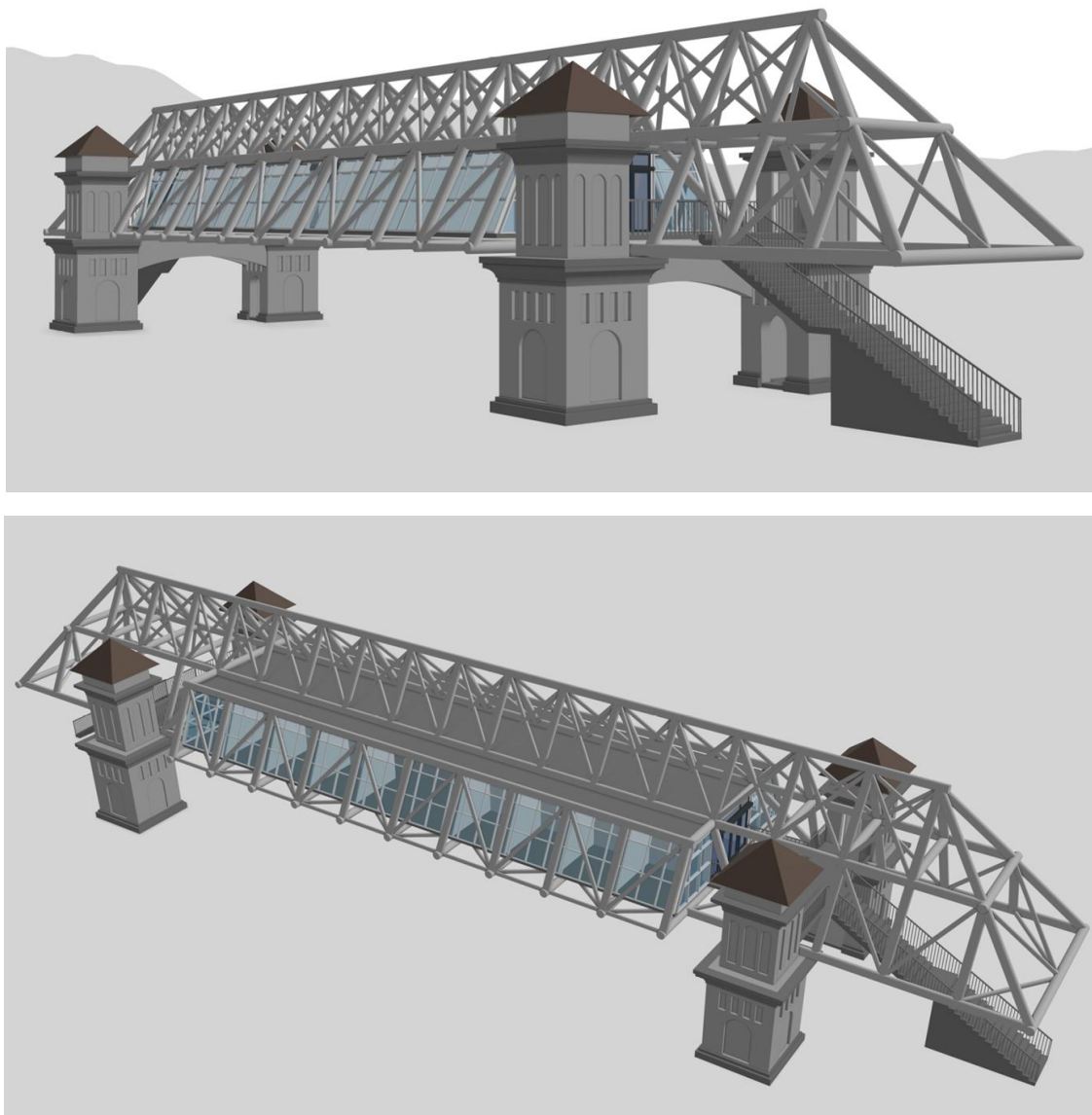
Интеграцијата на BIM моделот на пешачкиот мост „Влајко“ во GIS околина е последниот чекор од предложената методологија и претставува трансформација на објектно-ориентиран инженерски модел во просторен информациски модел подготвен за 3Д анализа и катастарски сценарија. За разлика од вообичаените BIM работни процеси, каде моделот често останува „затворен“ во околината на проектот, овде интеграцијата се поставува како методолошки чекор за да се обезбеди интероперабилност, просторна конзистентност и можност за поврзување со останати просторни и административно-правни податоци.



Слика 7.19. 3Д поглед на интегриран BIM модел на мост „Влајко“ во GIS околина

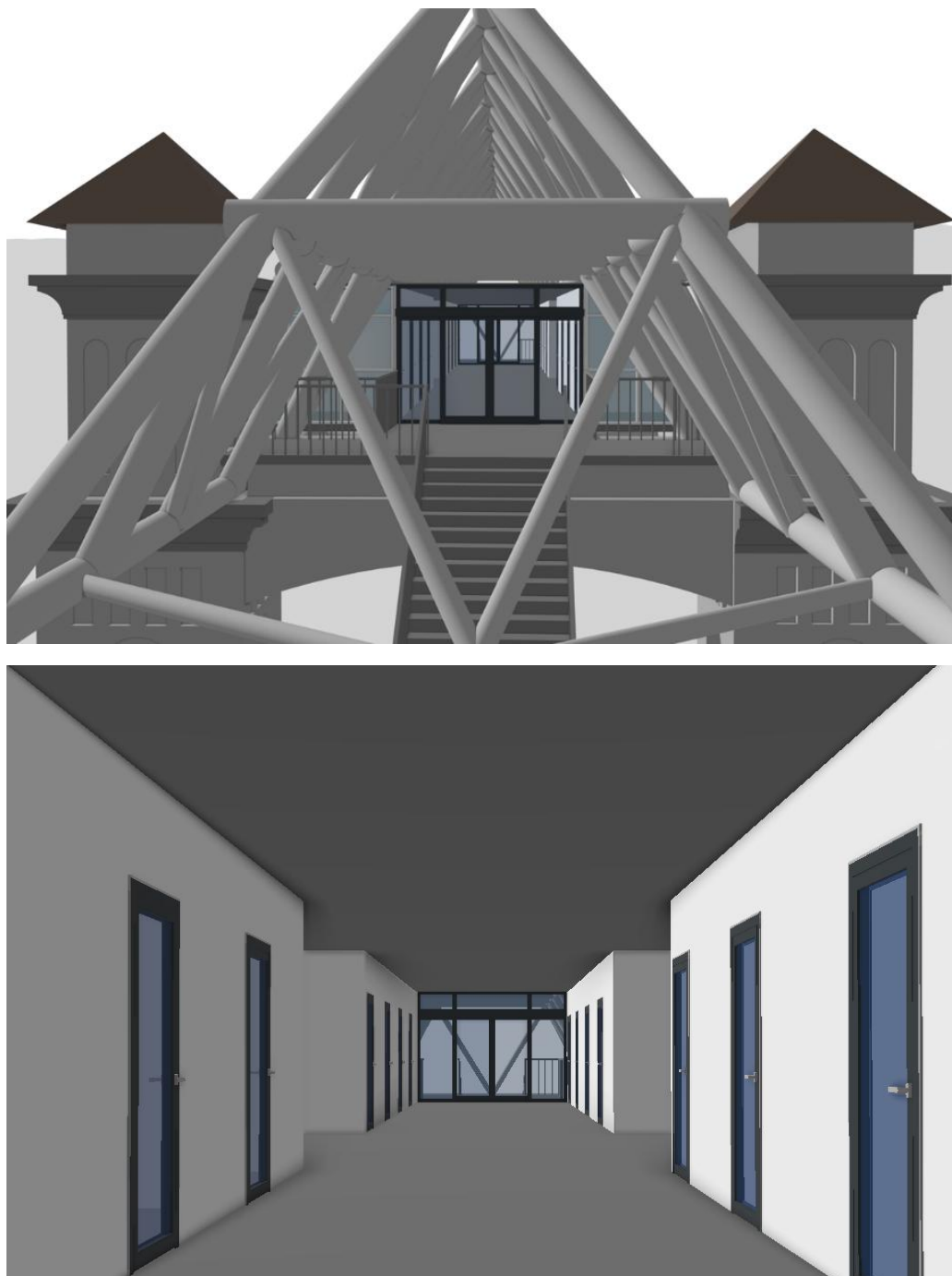
Интеграцијата на BIM моделот на пешачкиот мост „Влајко“ во GIS околина се изведува без потреба од дополнително геореференцирање, бидејќи истиот веќе е формиран врз основа на геореференциран облак од точки. Во процесот на моделирање, геометриската основа, односно облакот од точки е веќе поставен во државен координатен референтен систем, па и BIM елементите се креирани и позиционирани во истиот просторен контекст. Дополнително, при трансформација во IFC4 стандардот, моделот има можност да задржи информации за координатниот референтен систем преку стандардните механизми за просторно референцирање (ProjectedCRS), при што е наведен и EPSG кодот на системот. Во конкретниот случај се користи EPSG:6316, односно државниот координатен референтен систем, што овозможува препознавање на дефинираниот координатен систем и директна и конзистентна интеграција со останатите просторни слоеви во GIS. Следствено на ова, BIM моделот се трансформира и се интегрира во GIS околина во соодветниот координатен референтен систем, без поместувања и без дополнителни постапки за усогласување на координатите. На сликите 7.19, 7.20 и 7.21 се дадени повеќе погледи кон интегрираниот BIM-GIS модел на мостот „Влајко“.

Во практична смисла, интеграцијата е реализирана преку трансформација на BIM моделот во просторна база на податоци (File Geodatabase), при што BIM елементите се конвертираат во GIS објекти со геометрија и атрибути, во структурирани слоеви. Овој чекор е суштински, затоа што ја менува природата на податокот: од „модел во датотека“ (file-based BIM) во „просторна база“ (database-driven GIS), каде што секој конструктивен или архитектонски елемент станува просторен ентитет (feature) во соодветна класа, односно слој (feature class, layer). На тој начин, мостот „Влајко“ станува аналитички објект, достапен за просторни пребарувања, селекции, статистики, тополошки проверки и најразлични просторни анализи.



Слика 7.20. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед од надвор)

Клучен аспект на оваа трансформација е претставувањето на геометријата. Во GIS, BIM елементите се складираат како волуметриски и површински геометрии (multipatch), со што се задржува нивната тридимензионалност и се овозможуваат реални 3Д просторни анализи (волумен, површина, просторни пресекувања, видливост, сенчење, конфликтни зони и сл.). Истовремено, слоевите може да се организираат според конструктивна логика (примарни носачи, секундарни елементи, фасадни и застаклени површини, огради, скали, платформи), или според IFC класификација (IfcBeam, IfcColumn, IfcSlab, IfcWall, IfcStair, IfcRailing, IfcCurtainWall). Во ваква организација, GIS добива можност за филтрирање и анализа по тип на елемент, материјал, ниво или функционална припадност, што е особено важно за инфраструктурни објекти со комбинирана конструктивна и функционална содржина.



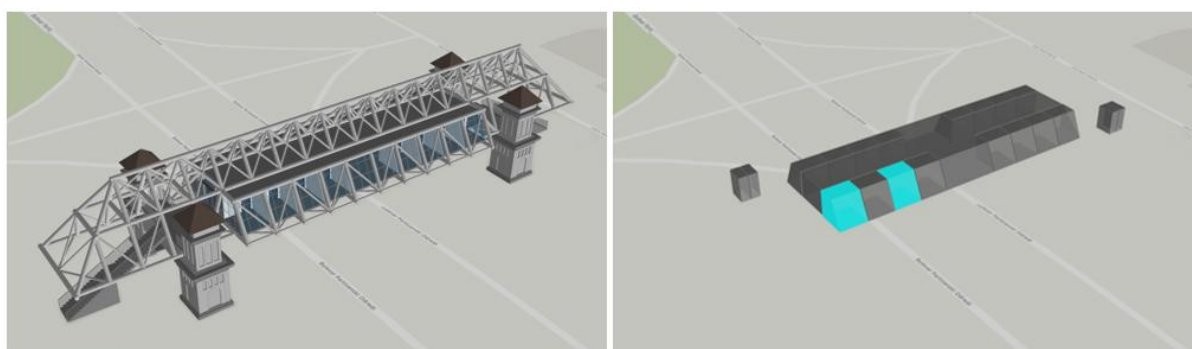
Слика 7.21. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед кон внатре)

Трансформацијата во просторна база на податоци и слоевита GIS структура овозможува и технички проверки кои се тешко изводливи во чиста BIM околина: тополошки контроли на просторни единици (преклопувања, празнини, неконзистентни граници), просторни пресекувања со надворешни слоеви (терен, пристапни коридори, урбана инфраструктура), како и 3Д просторни анализи релевантни за управување со објектот. Во исто време, задржаната IFC хиерархија (објект-простор-зона) обезбедува логична организација погодна за поврзување со LADM и понатамошна изградба на 3Д катастарски системи. Ваквата поставеност го потврдува потенцијалот на BIM-GIS интеграцијата како оперативна основа за современо администрирање на комплексни

недвижности, каде што просторот се дефинира тридимензионално, а правата врз недвижностите се поврзуваат со реални, мерливи 3Д единици.

Покрај геометријата, во просторната база на податоци се пренесуваат и атрибутите од BIM моделот, како што се GlobalId, Name, класа, ниво, параметри на елементот и други метаподатоци. Ваквите атрибути во GIS стануваат основа за: семантичка селекција (пример избор само на носечки елементи или само на стаклени панели), статистичка обработка (број и распределба на елементи по тип, должина, површина, волумен), и поврзување со надворешни бази на податоци (одржување, мониторинг, катастарска регистрација). Дополнително, важна предност е можноста за воспоставување врски помеѓу слоевите, со што се задржува дел од хиерархијата и логиката на IFC моделот во GIS околина.

Во контекст на катастарска регистрација, посебно важна е трансформацијата на просторните единици. Затворениот пешачки коридор и деловните простори се моделирани како IfcSpace, а нивната логичка групација е реализирана преку IfcZone. По интеграцијата, овие просторни единици се трансформираат во GIS околина како 3Д објекти со јасно дефинирани граници и волумени, што овозможува нивно третирање како просторни единици (spatial units) во смисла на 3Д катастар. На пример, деловните простори може да се анализираат според: волумен, површина на под, контактни површини со конструкцијата, просторна позиција во однос на околниот терен и инфраструктура, или просторни пресекувања со зони на ограничувања (пример заштитни коридори, регулациски линии, режими на користење). IfcZone, пак, во GIS може да функционира како „просторна група“, корисна за поврзување на повеќе простори во функционална целина (пример цел коридор како една единица за управување, или група деловни простори како посебен административен пакет). На Слика 7.22 се прикажани формирани 3Д волумени во интегрираниот BIM-GIS модел на објектот „Влајко“ и соодветно нивните атрибутни податоци, при што селектираните просторни единици се прикажани со светло сина боја и како геометриски ентитети и како атрибутни записи. Во Табела 7.5 е дадена целосната атрибутна табела на дефинираните просторни единици во објектот „Влајко“.



	OBJECTID *	Shape *	BaseCategory	ID_Objekt	ID_Edinica	ID_Prostor	Namena	Kat	Povrshina	Volumen
1	1	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_1	1	Деловен простор	Кат 1	9	21
2	2	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_2	2	Деловен простор	Кат 1	9	21
3	3	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_3	3	Деловен простор	Кат 1	9	20
4	4	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_4	4	Деловен простор	Кат 1	9	20
5	5	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_5	5	Деловен простор	Кат 1	9	20
6	6	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_6	6	Деловен простор	Кат 1	9	20
7	7	MultiPatch	Spaces	7640_1	1_7	7	Деловен простор	Кат 1	9	20

Слика 7.22. Формирани 3Д просторни единици во интегрираниот BIM-GIS модел на објект „Влајко“

Табела 7.5. Атрибутивна табела на дефинирањето просторни единици во објект „Влајко“ од интегрираниот BIM-GIS модел

Единствен идентификатор на објект	Единствен идентификатор на просторна единица	Просторна единица (IfcZone)	Намена на просторна единица	Кат (Level)	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
7640_1	1_1	1	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_2	2	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_3	3	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_4	4	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_5	5	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_6	6	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_7	7	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_8	8	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_9	9	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_10	10	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_11	11	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_12	12	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_13	13	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_14	14	Деловен простор	Кат 1	9	20
7640_1	1_15	15	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_16	16	Деловен простор	Кат 1	9	21
7640_1	1_17	17	Тоалет	Кат 1	2	5
7640_1	1_18	18	Тоалет	Кат 1	2	5
7640_1	1_19	19	Тоалет	Кат 1	2	5
7640_1	1_20	20	Тоалет	Кат 1	2	5
7640_1	1_21	21	Пешачки коридор	Кат 1	152	405

Оттука произлегува и директната врска со LADM, каде основната цел е да се обезбеди стандардизиран модел за поврзување на просторните единици со правата, ограничувањата и одговорностите (RRR), носителите на правата и релевантните правни основи. Во предложената поставеност, BIM-GIS моделот на мостот „Влајко“ може да се третира како геометриско-семантичка основа за дефинирање на LA_SpatialUnit во 3Д смисла. Притоа, IfcSpace објектите (пешачки коридор, деловни простори) природно кореспондираат со индивидуални LA_SpatialUnit единици (3Д волумени), додека IfcZone може да се претстави како LA_SpatialUnitGroup, односно група на просторни единици кои функционално и административно се разгледуваат заедно. Секоја посебно дефинирана единица административно се поврзува со LA_BAUnit, која ги поврзува просторните единици со нивните права. Во таа смисла, BIM елементите обезбедуваат детална конструктивна и функционална репрезентација, додека GIS и LADM обезбедуваат рамка за административна интерпретација и поврзување со регистри и процедури.

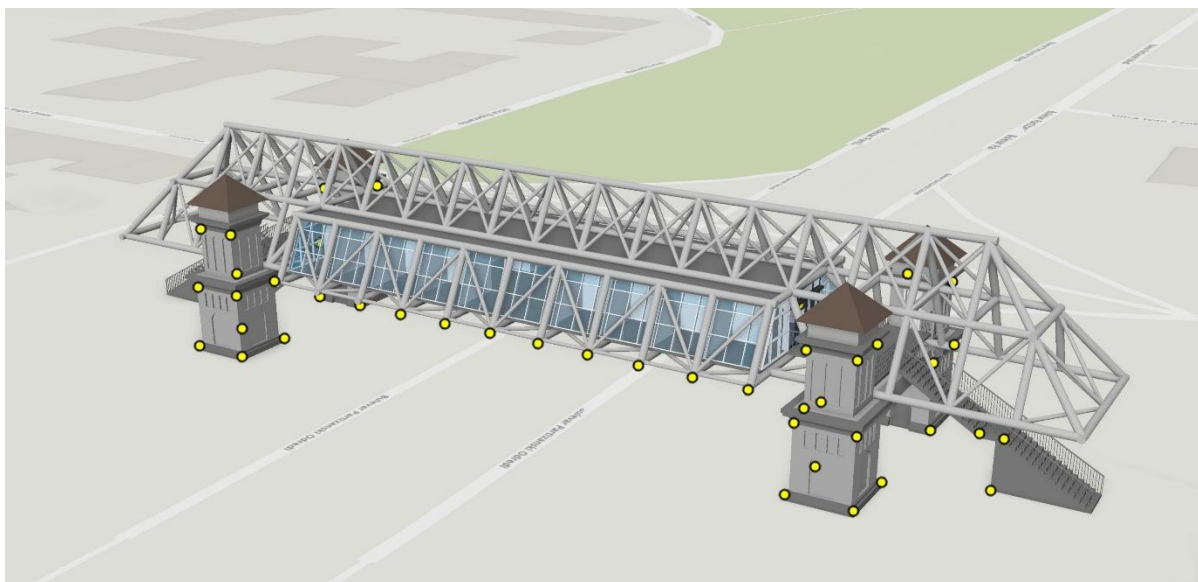
Практичната интероперабилност се реализира преку идентификатори и врски. IFC GlobalId, како стабилен и уникатен идентификатор на елемент или простор, може да се користи како надворешен клуч во LADM-ориентирана база, преку кој се поврзуваат LA_SpatialUnit записи со конкретни 3Д геометрии во просторната база на податоци. На овој начин, правата (LA_RRR), како сопственост, користење, закуп, службеност или други облици на права, може да се референцираат кон конкретен 3Д волумен (простор) во објектот, наместо кон апстрактен опис. Дополнително, LA_Party може да ги претстави носителите на правата, додека LA_Source може да ги евидентира изворните документи и правни основи (проектна документација, геодетски премер, инженерски елаборати, одобренија, договори).

7.2.5. Евалуација и валидација на моделот

Со цел да се потврди дека интегрираниот модел на пешачкиот мост „Влајко“ е геометриски точен, семантички конзистентен и интероперабилен за понатамошна примена во просторни анализи и 3Д катастарски сценарија, спроведени се евалуација и валидација на BIM моделот по неговата интеграција во GIS околина. Мостот „Влајко“ е избран како втор модел за тестирање и валидација на предложената методологија од неколку комплементарни причини. Од една страна, тој претставува репрезентативен пример за целосен објект составен од повеќе функционално издвоени просторни единици, што овозможува методологијата да се провери не само на изолирани просторни единици, туку и на нивната меѓусебна организација и просторна кохерентност во рамки на една целина. Дополнително, објектот се карактеризира со изразена структурна сложеност за моделирање, присуство на бројни архитектонски и конструктивни детали, како и геометриски варијации кои ја зголемуваат тежината на Scan-to-BIM постапката и ја прават евалуацијата порелевантна за реални урбани сценарија. Од друга страна, изборот е мотивиран и од потребата да се тестира последниот чекор од методологијата, интеграцијата на BIM моделот во GIS околина, неговата просторна поставеност (геореференцирање, просторна референцираност) и практичната примена на габаритната карактеристика како фундамент за понатамошни 3Д катастарски интерпретации. Во тој контекст, преку моделот се испитува можноста за регистрација на габаритот како релевантен 3Д катастарски објект, но и потребата од утврдување на меѓурелативски односи помеѓу локалната содржина на посебните делови во рамки на објектот и нивната интерконекција со надворешни недвижности. Овој принцип, поврзување на просторната

геометрија со правно-просторниот контекст и соседните просторни единици, претставува суштински сегмент на филозофијата на современите 3Д катастарски системи.

Оцената на геометриската точност и просторната позиционираност на интегрираниот BIM-GIS модел се темели на компаративна статистичка анализа на координатите на избрани карактеристични точки од објектот, при што како референтен извор се користени независни теренски мерења реализирани со тотална станица. За вкупно 58 карактеристични точки од објектот (Слика 7.23) се извлечени координати по оските Y, X и Z од интегрираниот BIM-GIS модел и е извршена нивна директна споредба со соодветните координати добиени со класичен геодетски премер. Во Табела 7.6 се систематизирани координатите од премерот, координатите извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел, како и пресметаните разлики по сите три оски X, Y и Z. Прикажаните отстапувања обезбедуваат квантитативна основа за оценување на нивото на усогласеност помеѓу моделот и класичните мерења, односно за верификација на точноста, стабилноста на просторната референцираност и целокупната доверливост на интегрираниот модел за понатамошна употреба во GIS-базирани просторни анализи и 3Д катастарски апликации.



Слика 7.23. Снимени точки за валидација на интегрираниот BIM-GIS модел на мост „Влајко“

Табела 7.6. Компаративна анализа на координатите по оските Y, X и Z, за карактеристични точки определени со класичен геодетски премер и извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел

Класичен геодетски премер			Интегриран BIM модел			Разлика		
Y [m]	X [m]	Z [m]	Y [m]	X [m]	Z [m]	ΔY [m]	ΔX [m]	ΔZ [m]
7531548,12	4651457,68	260,42	7531548,02	4651457,65	260,43	0,08	0,04	-0,06
7531551,49	4651456,52	260,44	7531551,39	4651456,49	260,45	0,05	0,08	-0,04
7531552,62	4651459,74	260,43	7531552,52	4651459,71	260,44	0,02	-0,01	-0,05
7531558,23	4651454,11	260,43	7531558,13	4651454,08	260,44	0,05	0,03	-0,05
7531559,33	4651457,39	260,43	7531559,23	4651457,36	260,44	0,02	0,01	-0,05
7531561,57	4651452,93	260,45	7531561,47	4651452,90	260,46	-0,02	0,05	-0,04
7531562,69	4651456,18	260,43	7531562,59	4651456,15	260,44	-0,04	-0,03	-0,05
7531574,35	4651489,11	260,46	7531574,25	4651489,08	260,47	-0,04	0,04	-0,02

7531575,47	4651492,38	260,49	7531575,37	4651492,35	260,50	-0,06	-0,04	0,00
7531570,99	4651490,32	260,45	7531570,89	4651490,29	260,46	0,02	0,00	-0,04
7531564,23	4651492,67	260,46	7531564,13	4651492,64	260,47	-0,02	0,02	-0,03
7531560,95	4651493,83	260,45	7531560,85	4651493,80	260,46	0,06	-0,04	-0,03
7531562,07	4651497,11	260,45	7531561,97	4651497,08	260,46	-0,01	-0,05	-0,03
7531565,43	4651495,92	260,46	7531565,33	4651495,89	260,47	-0,03	0,00	-0,02
7531571,34	4651498,74	260,16	7531571,24	4651498,71	260,17	-0,02	0,00	0,01
7531572,10	4651493,58	260,45	7531572,00	4651493,55	260,46	0,00	-0,03	-0,03
7531571,44	4651499,09	262,96	7531571,34	4651499,06	262,97	-0,04	-0,01	0,03
7531571,05	4651497,98	262,97	7531570,95	4651497,95	262,98	-0,04	0,00	0,04
7531550,86	4651463,03	264,95	7531550,76	4651463,00	264,96	-0,06	0,01	0,06
7531553,88	4651471,47	264,91	7531553,78	4651471,44	264,92	0,04	-0,05	0,03
7531558,88	4651485,64	264,94	7531558,78	4651485,61	264,95	-0,04	0,02	0,05
7531559,89	4651488,47	264,96	7531559,79	4651488,44	264,97	-0,02	0,01	0,07
7531560,88	4651491,31	264,96	7531560,78	4651491,28	264,97	-0,05	0,00	0,07
7531565,72	4651467,29	264,91	7531565,62	4651467,26	264,92	0,00	0,04	0,02
7531566,73	4651470,11	264,94	7531566,63	4651470,08	264,95	0,02	0,03	0,05
7531567,73	4651472,9	264,98	7531567,63	4651472,87	264,99	0,03	-0,02	0,10
7531568,72	4651475,74	264,97	7531568,62	4651475,71	264,98	0,00	0,01	0,08
7531569,72	4651478,57	264,97	7531569,62	4651478,54	264,98	-0,02	0,00	0,08
7531570,72	4651481,38	264,98	7531570,62	4651481,35	264,99	0,01	-0,04	0,09
7531571,73	4651484,21	264,98	7531571,63	4651484,18	264,99	0,02	-0,03	0,09
7531572,73	4651487,04	264,98	7531572,63	4651487,01	264,99	0,01	-0,04	0,10
7531552,23	4651450,98	262,89	7531552,13	4651450,95	262,9	0,03	0,01	-0,04
7531552,63	4651452,09	262,92	7531552,53	4651452,06	262,93	0,04	0,02	-0,01
7531549,26	4651460,93	260,45	7531549,16	4651460,90	260,46	0,03	-0,03	-0,03
7531549,40	4651460,68	264,11	7531549,30	4651460,65	264,12	0,07	-0,07	0,00
7531551,36	4651456,74	264,09	7531551,26	4651456,71	264,1	0,02	0,10	-0,02
7531549,62	4651460,25	267,65	7531549,52	4651460,22	267,66	0,06	-0,07	-0,01
7531549,63	4651460,25	264,81	7531549,53	4651460,22	264,82	0,04	-0,02	-0,07
7531551,06	4651457,18	267,67	7531550,96	4651457,15	267,68	0,01	0,10	0,01
7531551,79	4651459,47	264,82	7531551,69	4651459,44	264,83	-0,05	0,00	-0,07
7531552,38	4651459,63	264,11	7531552,28	4651459,60	264,12	-0,01	-0,02	0,00
7531561,47	4651453,19	264,12	7531561,37	4651453,16	264,13	-0,03	0,11	0,01
7531562,45	4651456,07	264,11	7531562,35	4651456,04	264,12	-0,08	-0,05	0,00
7531558,47	4651454,25	264,08	7531558,37	4651454,22	264,09	0,04	0,08	-0,03
7531561,23	4651453,63	267,66	7531561,13	4651453,60	267,67	0,00	0,08	-0,01
7531562,02	4651455,85	267,65	7531561,92	4651455,82	267,66	-0,07	-0,04	-0,02
7531559,46	4651457,12	264,11	7531559,36	4651457,09	264,12	0,02	-0,04	0,00
7531574,25	4651489,37	264,13	7531574,15	4651489,34	264,14	-0,04	0,09	0,02
7531575,23	4651492,30	264,13	7531575,13	4651492,27	264,14	-0,10	-0,02	0,02
7531571,24	4651490,44	264,02	7531571,14	4651490,41	264,03	0,04	0,04	-0,09
7531574,04	4651489,78	264,82	7531573,94	4651489,75	264,83	0,00	-0,01	-0,07
7531574,05	4651489,75	267,70	7531573,95	4651489,72	267,71	-0,01	0,02	0,03
7531574,86	4651492,10	267,69	7531574,76	4651492,07	267,7	-0,04	-0,01	0,03
7531572,58	4651492,91	267,68	7531572,48	4651492,88	267,69	0,02	-0,05	0,01
7531562,25	4651496,88	264,12	7531562,15	4651496,85	264,13	0,08	-0,08	0,01
7531565,18	4651495,77	264,13	7531565,08	4651495,74	264,14	-0,07	-0,04	0,01

7531562,42	4651496,48	267,66	7531562,32	4651496,45	267,67	0,05	-0,10	-0,01
7531561,55	4651494,18	267,66	7531561,45	4651494,15	267,67	0,07	0,00	-0,01

За секоја од контролните точки се разгледуваат разликите помеѓу координатите добиени со класично геодетско мерење (референтни вредности) и координатите извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел. Отстапувањата по трите оски се дефинираат како:

$$\Delta Y_i = Y_{\text{ref},i} - Y_{\text{BIM},i}, \quad \Delta X_i = X_{\text{ref},i} - X_{\text{BIM},i}, \quad \Delta Z_i = Z_{\text{ref},i} - Z_{\text{BIM},i}$$

каде, ΔY_i , ΔX_i , ΔZ_i се отстапувањата на координатите по трите оски на i -тата контролна точка, $Y_{\text{ref},i}$, $X_{\text{ref},i}$, $Z_{\text{ref},i}$ се координатите добиени од класичниот премер (референтна вредност), а $Y_{\text{BIM},i}$, $X_{\text{BIM},i}$, $Z_{\text{BIM},i}$ се координатите извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел. Оваа формализација е важна затоа што дозволува одделно да се проценат систематската грешка и случајната варијабилност (дисперзија) по секоја координатна оска.

Клучен индикатор за постоење на систематска грешка е просечната разлика:

$$\overline{\Delta Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Y_i, \quad \overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i, \quad \overline{\Delta Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i$$

каде n е бројот на контролни точки. Добиените просечни разлики се на милиметарско ниво ($\overline{\Delta Y} \approx 0,69 \text{ mm}$, $\overline{\Delta X} \approx 0,00 \text{ mm}$, $\overline{\Delta Z} \approx 1,55 \text{ mm}$), што укажува на тоа дека не постои изразена тенденција BIM моделот да биде конзистентно „поместен“ во одредена насока по некоја оска.

За статистичка проверка се разгледува и интервал на доверба (CI) од 95% за $\overline{\Delta}$, кој се пресметува како:

$$\overline{\Delta} \pm t_{0.975, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

при што $t_{0.975, n-1}$ е критична t -вредност, s е стандардна варијација, а n е бројот на контролни точки. Добиените CI од 95% за $\overline{\Delta}$ ја опфаќаат нулата за сите три координатни компоненти:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Y} &\approx [-10,60 \text{ mm}, 11,98 \text{ mm}], \\ \overline{\Delta X} &\approx [-12,32 \text{ mm}, 12,32 \text{ mm}], \\ \overline{\Delta Z} &\approx [-10,74 \text{ mm}, 13,84 \text{ mm}]. \end{aligned}$$

Овие вредности покажуваат дека не се потврдува статистички значајна систематска пристрасност.

За да се опише варијабилноста или дисперзијата на отстапувањата, се користи стандардната девијација:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \overline{\Delta})^2}{n - 1}}$$

каде s ја опишува варијабилноста на отстапувањата околу средната разлика. Добиените вредности се:

$$\begin{aligned}s_{\Delta Y} &\approx 4,30 \text{ cm}, \\ s_{\Delta X} &\approx 4,69 \text{ cm}, \\ s_{\Delta Z} &\approx 4,67 \text{ cm}.\end{aligned}$$

Овие вредности покажуваат дека отстапувањата се концентрирани на сантиметарско ниво. Овие резултати укажуваат дека доминантната компонента на грешката не е систематска, туку претежно случајна и локално условена.

За практична интерпретација користени се средната апсолутна грешка – MAE (Mean Absolute Error) и корен од средната квадратна грешка – RMSE (Root Mean Square Error):

$$\begin{aligned}MAE &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \\ RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}\end{aligned}$$

Добиените вредности се:

$$\begin{aligned}\Delta Y: MAE &\approx 3,55 \text{ cm}, RMSE \approx 4,26 \text{ cm}, \\ \Delta X: MAE &\approx 3,59 \text{ cm}, RMSE \approx 4,65 \text{ cm}, \\ \Delta Z: MAE &\approx 3,71 \text{ cm}, RMSE \approx 4,64 \text{ cm}.\end{aligned}$$

Резултатите покажуваат дека RMSE е приближно 4–5 cm по оска, што ја позиционира „типичната“ координатна грешка на неколку сантиметри. Со оглед дека $\bar{\Delta}$ е практично нула, RMSE ја рефлектира пред сè случајната компонента (шум или варијабилност), а не систематско поместување. Ваквата дистрибуција е очекувана кај SLAM-LiDAR работни текови и *as-build* моделирање, каде точноста се формира како резултат на повеќе фактори: услови на скенирање, акумулација на грешки во траекторија, како и субјективност при избор и интерпретација на „карактеристични точки“ (на пр. агли, рабови, пресек на елементи) во процесот на моделирање и екстракција.

Покрај просечните мерки, за инженерска и катастарска примена важно е да се знае и „најлошото сценарио“, односно максималните апсолутни отстапувања:

$$\max|\Delta Y|, \max|\Delta X|, \max|\Delta Z|$$

Добиените максимални апсолутни отстапувања се:

$$\begin{aligned}\max|\Delta Y| &\approx 10 \text{ cm}, \\ \max|\Delta X| &\approx 11 \text{ cm}, \\ \max|\Delta Z| &\approx 10 \text{ cm}.\end{aligned}$$

За појасна слика корисно е да се разгледа уделот на точки што се во одредени прагови. На пример, уделот на точки со $|\Delta| \leq 5 \text{ cm}$ е:

$$\begin{aligned}&\text{околу } 79,3\% \text{ за } Y, \\ &\text{околу } 81,0\% \text{ за } X, \\ &\text{околу } 75,9\% \text{ за } Z.\end{aligned}$$

Овие прагови не се „стандард“ сами по себе, туку се инструмент за интерпретација: тие покажуваат дека поголемиот дел од точките се со отстапување до ~ 5 cm по оска, додека мал број точки генерираат отстапување до $\sim 10 - 11$ cm. Во контекст на BIM-моделирање, ваквите поголеми отстапувања најчесто се поврзуваат со локални ефекти (точка на сложен детал, различно толкување на „истата“ точка во BIM и во реалноста, или специфични услови на мерење), а не со глобална деформација на моделот.

За да се процени во кои граници може да се очекува да бидат најголем дел од отстапувањата, се користи интервалот на согласност од 95% (LoA - Limits of Agreement):

$$\overline{\Delta L} \pm 1.96 s$$

Добиените интервали се:

$$\begin{aligned}\Delta Y: & [-8,35 \text{ cm}, +8,49 \text{ cm}], \\ \Delta X: & [-9,19 \text{ cm}, +9,19 \text{ cm}], \\ \Delta Z: & [-9,01 \text{ cm}, +9,32 \text{ cm}].\end{aligned}$$

Овие резултати се интерпретираат на следниот начин: ако се повтори истата постапка на моделирање и екстракција на координати при слични услови, тогаш кај приближно 95% од контролните точки може да се очекуваат отстапувања по компонента од ред ± 9 cm, концентрирани околу нула. Клучно е што интервалите се приближно симетрични и центрирани близу нула, што е дополнителен аргумент дека нема насочена деформација, туку претежно случајни локални разлики.

Бидејќи координатите се тридимензионални, за практична и интуитивна оценка на позиционата точност, се користат комбинирани мерки, кои го претставуваат вкупното просторно отстапување на точката независно од насоката на грешката.

Првата мерка е планиметриското (хоризонтално) отстапување дефинирано како Евклидово растојание меѓу BIM и референтната позиција во хоризонталната рамнина:

$$\Delta P_i = \sqrt{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2}$$

Оваа големина одговара на „колку е поместена точката во рамнина“ и е особено значајна во BIM-GIS интеграција, каде што позиционирањето во рамнина (планиметрија) директно влијае врз преклопувањето со други слоеви, просторни анализи, мерење на растојанија и тополошки релации во урбан контекст.

Втората мерка е вкупно 3Д отстапување, кое ја зема предвид и вертикалната компонента:

$$\Delta 3D_i = \sqrt{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2}$$

Оваа мерка дава единствена оценка за вкупната просторна разлика меѓу BIM и референтните координати. Таа е особено релевантна за 3Д сценарија (3Д катастар, волуметриски интерпретации, висински односи, пресекување на волумени), каде што грешката по Z-оската може значајно да влијае врз анализите.

Добиените вредности покажуваат просечно хоризонтално отстапување околу 5–6 cm и вкупно 3Д отстапување околу 7–8 cm, со тоа што $\sim 95\%$ од точките имаат 3Д отстапување помало од 11 cm. Ова е важен практичен заклучок: дури и кога поединечните координатни компоненти варираат на сантиметарско ниво, комбинираната просторна

грешка останува во граници што се релевантни за габаритно позиционирање, просторна идентификација и стабилен просторен опфат во GIS контекст.

Во Табела 7.7 и Табела 7.8 се дадени прегледно статистичките индикатори од компаративната анализа на координати на карактеристични точки определени со класичен геодетски премер и извлечени од интегрираниот BIM-GIS модел.

Табела 7.7. Статистички параметри од компаративна анализа на координати на контролни точки (класичен премер vs. BIM-GIS модел)

Статистички параметар	ΔY	ΔX	ΔZ
Број на мерења - n	58	58	58
Средна разлика - $\bar{\Delta}$	0,69 mm	0,00 mm	1,55 mm
Интервал на доверба од 95%	[-10,60 mm, +11,98 mm]	[-12,32 mm, +12,32 mm]	[-10,74 mm, +13,84 mm]
Стандардна девијација - s	4,30 cm	4,69 cm	4,67 cm
Средна апсолутна грешка - MAE	3,55 cm	3,59 cm	3,71 cm
Корен од средна квадратна грешка - $RMSE$	4,26 cm	4,65 cm	4,64 cm
Максимално апсолутно отстапување - $\max \Delta $	10 cm	11 cm	10 cm
Интервал на согласност од 95%	[-8,35 cm, +8,49 cm]	[-9,19 cm, +9,19 cm]	[-9,01 cm, +9,32 cm]

Табела 7.8. Комбинирани индикатори за позициска точност (рамнина и 3Д простор)

Статистички параметар	$\Delta P = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)}$	$\Delta 3D = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)}$
Број на мерења - n	58	58
Средна разлика - $\bar{\Delta}$	5,60 cm	7,43 cm
Корен од средна квадратна грешка - $RMSE$	6,30 cm	7,82 cm
95-ти перцентил	10,35 cm	10,88 cm
Максимално апсолутно отстапување - $\max \Delta $	11,40 cm	11,45 cm

Со добиените резултати статистички се потврдува дека интегрираниот BIM-GIS модел не е систематски поместен во однос на референтниот геодетски премер. Практично, тоа значи дека применетото геореференцирање, трансформација и организација на податоците во просторна база на податоци (вклучително и усогласување на координатните системи) се реализирани конзистентно и без насочена грешка. Фактот што не се детектира систематско поместување, а притоа постои сантиметарска дисперзија, укажува на тоа дека доминантните отстапувања се резултат на случајни и локални влијанија, а не на погрешна трансформација или неконзистентно геореференцирање. Во пракса, ваквата „случајна“ компонента може да произлегува од локална геометрија и видливост на точките во облакот од точки, точност на SLAM-регистрацијата во конкретни делови од објектот, различно толкување на референтна

точка (дали се зема точка на раб, на средина на елемент) и степен на генерализација при BIM моделирање (идеализација на линии, рамнини и агли).

Во контекст на 3Д катастар и интегрирани просторни модели, резултатите го поддржуваат заклучокот дека интегрираниот BIM-GIS модел обезбедува стабилна и конзистентна 3Д позиционираност, доволна за сценарија каде е критично просторното усогласување на објектот во GIS, просторно пребарување и идентификација, како и воспоставување на просторни врски со други слоеви (парцели, инфраструктура, урбани ограничувања). Истовремено, регистрираната сантиметарска дисперзија дава реалистична рамка за очекуваната точност и претставува основа за дефинирање на прагови и толеранции во понатамошните чекори (валидирање на топологија, проверка на конфликти, дефинирање на правни единици и слично).

Дополнително, во рамки на тестирањето и валидацијата на геометријата на моделот, направена е и компаративна анализа на внатрешната површина на посебните делови (просторни единици) во моделот со површините регистрирани во Геодетско-катастарскиот информативен систем на АКН и утврдено е нивно целосно совпаѓање. Во Табела 7.5 се дадени површините на посебните делови од интегрираниот BIM-GIS модел, додека во Табела 7.9 површините на посебните делови регистрирани во ГКИС на АКН.

Компаративната анализа на внатрешната површина на посебните делови, која покажува целосно усогласување на површините на посебните делови добиени од интегрираниот BIM-GIS модел со површините регистрирани во ГКИС на АКН, дополнително ја потврдува валидноста на применетата Scan-to-BIM процедура за внатрешни простори. Врз таа основа, предложената методологија може директно да се примени и за 2Д катастарска регистрација на внатрешна површина, согласно постојната концепција на катастарскиот систем. Истовремено, структурираниот 3Д модел обезбедува јасна перспектива за надградба на катастарските системи со висинска компонента и дефинирање на волуменски просторни единици, како предуслов за воспоставување 3Д катастар и прецизно просторно-правно дефинирање на посебните делови во рамки на недвижностите, како и на недвижностите во просторот.

Табела 7.9. Регистрирани внатрешни простори на мост Влајко во ГКИС на АКН

Имотен лист	Катастарска парцела	Објект	Површина	Место	Влез	Кат	Стан	Право
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	1	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	2	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	3	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	4	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	5	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	6	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	7	Сопственост

100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	8	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	9	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	10	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	11	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	12	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	13	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	14	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	15	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	16	Сопственост
100797	7640	1	2	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	17	Сопственост
100797	7640	1	2	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	18	Сопственост
100797	7640	1	2	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	19	Сопственост
100797	7640	1	2	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	K1	20	Сопственост

Покрај оцената на геометриската точност и просторната позиционираност на интегрираниот BIM-GIS модел, евалуацијата е проширена и на проверка на семантичката организираност, тополошката валидност и интероперабилноста, бидејќи токму овие аспекти ја определуваат реалната употребливост на моделот за просторни анализи и за правно-административни интерпретации во контекст на 3Д катастар. Во практична смисла, модел кој е геометриски прецизен, но семантички неконзистентен или тополошки некоректен, не може доверливо да се трансформира во GIS и да послужи како основа за поврзување со регистри и податоци за права врз недвижностите.

Во рамки на семантичко-тополошката проверка верификувано е дека конструктивните елементи се класифицирани во соодветни IFC класи, а моделот ја следи логичната хиерархија, со јасна припадност и следливост на компонентите. Посебно внимание е посветено на просторните единици кои имаат потенцијална правна релевантност. Затворениот пешачки коридор и деловните простори се коректно дефинирани како IfcSpace и претставуваат затворени волумени кои располагаат со коректно дефинирани просторни граници. Дополнително, истите се функционално групирани преку IfcZone, со што се обезбедува повисоко ниво на семантичка структура (простори што припаѓаат на ист функционален дел од објектот). Тополошката валидност е потврдена преку контроли за отворени или неконзистентни волумени, непосакувани преклопувања и празнини меѓу соседни просторни единици, како и несакани пресекувања со конструктивните елементи, бидејќи ваквите појави директно го нарушуваат квалитетот на просторните пресметки и анализа на просторни односи. Исто така направена е анализа на конзистентноста на атрибутните податоци и нивната стабилност во процесот на

трансформацијата и размена помеѓу различните софтверски околии. Проверено е присуството и исправноста на клучните идентификатори (GlobalId), како и основните описни атрибути поврзани со намена, ниво (кат), површина и волумен.

Интероперабилноста се евалуира преку трансформација на IFC моделот во просторна база на податоци и тестирање на функционалноста во GIS околина: пребарување и филтрирање по атрибути, просторни селекции, пресметки на површини и волумени, тематско визуелизирање и анализа на просторни односи (просторна припадност, преклопување со парцели, близина до инфраструктура). Успешна валидација во оваа фаза подразбира дека геометријата останува валидна и тополошки коректна, семантиката се пренесува со минимални загуби и просторните единици (IfcSpace и IfcZone) можат да се третираат како GIS објекти со јасни атрибути и можност за аналитичка обработка.

Во контекст на 3Д катастар, дополнителна вредност на оваа евалуација дава проверката на потенцијалот за поврзување со податоци за права врз недвижностите и моделирање во согласност со принципите на LADM. Концептуално, IfcSpace и IfcZone може да се интерпретира како кандидат-репрезентација на просторна единица (LA_SpatialUnit), додека уникатните идентификатори (GlobalId или некој друг интересен идентификатор) обезбедуваат основа за воспоставување релации кон административни единици и носители на права (LA_BAUnit, LA_RRR). Притоа, клучно е моделот да обезбеди стабилни идентификатори, конзистентни атрибути и јасни граници на правно релевантните простори, со што се отвора можност за поврзување со катастарски и регистарски записи, интеграција со парцели и други недвижности во GIS и спроведување анализи за просторни конфликти и преклопувања меѓу правни простори.

По извршената евалуација и валидација, моделот на пешачкиот мост „Влајко“ се потврдува, не само како геометриски валидна и просторно референцирана дигитална репрезентација на реалната состојба на објектот, туку и како семантички структурирана и интероперабилна основа, подготвена за употреба во интегрирани BIM-GIS работни процеси и како податочна платформа за 3Д катастарско моделирање и правно-просторни анализи на конструктивно и функционално комплексни објекти.

7.3. Модел 3 - 3Д модел на хоїшелски комїлекс

Третиот модел претставува сеопфатна студија на случај во рамки на експерименталниот дел од трудот, затоа што методологијата се тестира во услови што реално ја репрезентираат урбаната морфологија и природниот контекст истовремено: повеќе објекти во заеднички просторен систем, специфична конфигурација на терен, разновидни висини и форми на објекти, како и изразена хетерогеност на земјишната покривка (вегетација, пешачки патеки, паркинг и придружни инфраструктурни елементи). Дополнителната вредност на овој модел е во самиот мотив поврзан со еколошките аспекти и „животните циклуси“ на амбиентот, каде што просторната анализа не се сведува само на геометрија, туку претставува основа за следење на состојби и фактори што влијаат врз квалитетот на животната средина. Во таа смисла, моделот го проширува доменот на применливост на интегрираниот BIM-GIS пристап, од поединечен објект, кон комплексен ансамбл со контекстуални влијанија, што е критериум за зрелост и скалабилност на предложената методологија.

Како трет модел за тестирање на предложената методологија е избран хотелски комплекс, кој претставува репрезентативен пример за сложена урбана морфологија, во која повеќе објекти со различна намена, волумен и архитектонска геометрија коегзистираат во заеднички просторен систем. За разлика од првите два модела, кои претставуваа посебен дел од објект и поединечен објект, третиот модел овозможува проверка на методолошките чекори во услови што се поблиски до реалните сценарија во управувањето со недвижностите и просторот. На Слика 7.24 е дадена фотографија од хотелскиот комплекс направена во текот на ласерското скенирање со беспилотно летало DJI Matrice 350.



Слика 7.24. Фотографија од хотелскиот комплекс направена од беспилотно летало

Во рамките на комплексот е селектиран еден објект за детално моделирање во BIM, кој содржи две функционални единици, со што се добива можност да се анализираат просторните односи и логиката на поделба на недвижноста на функционални целини. Објектот е особено интересен како пример за детално моделирање, затоа што покрај поделбата на две функционални единици, во едната единица има и галерија, што резултира со карактеристично обликување на внатрешните волумени. Оваа карактеристика внесува дополнителна сложеност во моделирањето, бидејќи бара внимателна интерпретација на волумените, вертикалните врски и контактните површини помеѓу просториите и конструктивните елементи. Внатрешната организација е составена од повеќе функционални простории, вклучително прием, угостителски дел, административен сегмент и сервисни простории, што создава реалистичен пример за објект со хетерогена намена и изразени просторни зависности.

Од аспект на 3Д катастар и администрирање со недвижности, ваквата типологија е погодна затоа што овозможува јасно дефинирање на функционални единици и нивните граници во просторот, како и проверка на тоа дали дигиталниот модел може да ги поддржи основните барања за регистрација: геометриски валидни 3Д единици,

конзистентни вертикални односи и можност за поврзување на правни и технички атрибути со конкретни просторни објекти. Истовремено, комплексот како целина овозможува да се демонстрира скалабилноста на пристапот: еден репрезентативен објект е моделиран во BIM околина со повисока геометриска и семантичка деталност, додека останатите објекти се претставени во LOD1 како генерализирани волумени. Овој хибриден пристап е практично оправдан, бидејќи одразува реални проектни услови во кои деталното BIM моделирање може да се применува селективно, само за објекти што се критични за анализата, додека поширокиот контекст се моделира со пониско ниво на деталност заради ефикасност и прегледност.

Хотелскиот комплекс обезбедува соодветна основа за финална евалуација на методологијата, бидејќи овозможува истовремено тестирање на прецизната BIM-GIS интеграција на микрониво (за селектираниот објект) и интеграцијата на преостанатата содржина од просторниот контекст во единствен, конзистентен 3Д модел на макрониво. На тој начин се проверуваат клучни аспекти како геореференцирање, конзистентност на просторните односи, тематско раслојување и тополошка валидност, како и применливоста на резултатниот модел во контекст на 3Д катастар, управување со недвижности и развој на дигитални близнаци на објектите и просторот.

7.3.1. Аквизиција на просторни податоци

За аквизиција на просторни податоци за хотелскиот комплекс е применет комбиниран пристап на ласерско скенирање, со цел да се обезбеди целосна просторна покриеност и висока геометриска веродостојност на податоците, независно од висината на објектите, нивната меѓусебна поставеност и конфигурацијата на теренот. Комплексите од овој тип претставуваат предизвик за аквизиција, бидејќи содржат повеќе објекти со различни габарити, изразени кровни форми, фасадни детали, како и зони што се тешко достапни за скенирање само од воздух (долни делови на фасади, настрешници, пристапни патеки и тераси во сенка) или само од земја (покриви на објекти, целосно покривање на теренот и просторниот контекст). Затоа, примената на еден единствен метод за аквизиција на просторни податоци најчесто резултира со „скриени зони“ и нерамномерна густина на облакот од точки, што подоцна може да рефлектира неправилности при 3Д моделирање и геореференцирање.

Скенирањето од земја е реализирано со рачен SLAM-базиран LiDAR скенер RobotSLAM (South Surveying & Mapping Technology), како примарен извор за детална реконструкција на селектираниот објект што се моделира во BIM околина. Се работи за ласерскиот скенер користен за аквизиција на просторни податоци за пешачкиот мост „Влајко“ чии спецификации се дадени во анализата на вториот модел. Преку ова ласерско скенирање е добиен високорезолуциски облак од точки кој ги опфаќа внатрешните простории, комуникациите и конструктивните елементи за селектираниот објект, овозможувајќи јасно дефинирање на геометријата релевантна за модел со повисоко ниво на деталност. Дополнително, SLAM-скенирањето е искористено и во рамките на комплексот за снимање на фасадите и ниските сегменти на надворешноста, односно делови што би биле недоволно покриени само со LiDAR-скенирање од воздух, поради ограничени агли на видливост, вегетација или блискост меѓу објектите. Мобилниот карактер на SLAM-технологијата овозможува брзо движење низ просторот и континуирана

аквизиција, со што се добива густ облак од точки во зоните каде што е потребна највисока деталност, а каде што класичните статички мерења би биле помалку ефикасни.

Ласерското скенирање на надворешноста на повисоките делови од објектите, нивната кровна конструкција и надворешна геометрија, како и на околниот просторен контекст и конфигурација на теренот, е реализирано со скенирање од воздух со беспилотно летало DJI Matrice 350 RTK со Zenmuse L2 LiDAR сензор. DJI Zenmuse L2 е напреден LiDAR-систем кој комбинира LiDAR-модул, високопрецизен IMU и RGB фотограметриска камера во единствен компактен сензорски пакет. Оваа интеграција овозможува синхронизирана аквизиција на просторни податоци, создавајќи густ и геореференциран облак од точки со висок степен на прецизност, погоден за геодетски, инженерски и картографски апликации. Овој систем овозможува преглед на облакот од точки во реално време (Point Cloud Live View), што значително го подобрува следењето на квалитетот на облакот од точки за време на кампања на летање. Техничките перформанси на LiDAR-модулот вклучуваат опсег на детекција до 450 m при 50% рефлексивност, или 250 m при 10% рефлексивност и силно амбиентално осветлување. Системот работи со фреквенција на емисија од 240 kHz, поддржувајќи до пет враќања по ласерски импулс, што е особено корисно за поминување на ласерскиот сигнал низ вегетација и рефлексии на точки од теренот. Областа на скенирање изнесува $70^\circ \times 75^\circ$ во нерепетитивен режим, овозможувајќи широко покривање и снимање на фасади, додека репетитивниот режим со FOV (Field of View) од $70^\circ \times 3^\circ$ е оптимизиран за високопрецизно картографирање и униформна густина на податоците. Прецизноста на системот е загарантирана преку напредната IMU единица со ажурирање од 200 Hz, која овозможува хоризонтална точност од 5 cm и вертикална точност од 4 cm на 150 m висина, при услови на RTK FIX статус. Минималниот опсег на детекција е 3 m, што го прави системот применлив и во блиски летови за детални инспекции. RGB камерниот модул е базиран на 4/3 CMOS сензор со 20 MP, со агол на видно поле од 84° , што овозможува висококвалитетно фотограметриско документирање и автоматска колоризација на облакот од точки. Оваа можност е особено важна за 3D реконструкции, визуелна интерпретација и комбинирани BIM-GIS анализи.

Zenmuse L2 поддржува складирање на податоци на microSD картичка со брзина на запишување од 50 MB/s, при што се снимаат LiDAR податоци, IMU записи, RTK логови и слики во JPEG формат. Генерираните податоци се компатибилни со софтверскиот пакет DJI Terra, кој поддржува експорт во LAS, PLY, PCD, PNTS и S3MB формати, со што системот нуди целосна софтверска интеграција за постпроцесирање, класификација на облак од точки, генерирање на дигитални висински модели и структурни анализи. Zenmuse L2 има маса од 905 g, IP54 заштита и работен температурен опсег од -20°C до $+50^\circ\text{C}$, што го прави дизајниран за стабилни операции во различни теренски и климатски услови. Во комбинација со RTK позиционирање (1 cm + 1 ppm хоризонтално), системот обезбедува исклучително висока апсолутна прецизност, што е критично за топографски мерења, инженерски надзор, 3D катастар и моделирање на инфраструктурни објекти. Како интегрирано, LiDAR-решение од воздух, Zenmuse L2 овозможува брза, високопрецизна и мултисензорска аквизиција на просторни податоци, со што претставува оптимален избор за картографирање на сложени структури, анализи на вегетација, геоморфологија, генерирање на висински модели и реконструкција на големи површини со висока просторна резолуција.

Суштинската предност на комбинираниот пристап за аквизиција на просторни податоци применет во третиот модел, се состои во неговата способност да обезбеди

комплементарност и меѓусебно дополнување на податоците од различни сензорски извори. LiDAR-скенирањето од воздух обезбедува геометрија од воздушна перспектива и контекстуална просторна рамка, со целосна покриеност на покривните површини и теренот, додека SLAM-скенирањето обезбедува висока деталност во зоната на фасадите и во внатрешните простории. Фузијата на овие податоци резултира со геореференциран облак од точки со висока густина и минимизирани празнини, што претставува клучен предуслов за сигурна 3Д реконструкција и за последователна BIM-GIS интеграција. На Слика 7.25 е прикажана мерната технологија применета при аквизицијата на просторни податоци за третиот модел.



Слика 7.25. Скенирање на хотелски комплекс, лево – рачен скенер, десно – беспилотно летало со LiDAR скенер

Посебен акцент во аквизицијата е ставен на обезбедување прецизни просторни податоци за формирање на прецизен дигитален модел на теренот (DTM), имајќи предвид дека конфигурацијата на теренот директно влијае врз правилното позиционирање на објектите во тридимензионален простор. Во рамки на интегриран 3Д модел, висинската компонента (Z) има подеднакво значење како и хоризонталните координати (Y и X), особено во услови кога објектите се поставени на наклонет терен и кога е потребно да се анализираат пристапноста, котите на подовите, контактните линии со теренот и просторните односи меѓу објектите. Следствено, комбинираното ласерско скенирање обезбедува стабилна и доверлива основа за креирање BIM-модел на селектираниот објект, за LOD1-моделирање на останатите објекти, како и за нивна прецизна интеграција во GIS-околина во рамки на единствен координатен систем. На Слика 7.26 е прикажан облакот од точки за целиот хотелски комплекс и неговата поширока околина во 3Д поглед, добиен со

UAV-LiDAR скенирање, од каде јасно може да се согледа карактеристичната конфигурација на теренот врз кој е изграден хотелскиот комплекс.



Слика 7.26. Облак од точки од хотелскиот комплекс и неговата околина

7.3.2. Процесирање на облаци од точки

Вториот чекор од методологијата опфаќа процесирање на облаците од точки со цел да се обезбеди геометриски конзистентна, чиста и доволно детална основа за Scan-to-BIM моделирање на селектираниот објект. Во овој случај се обработуваат два комплементарни извори на облаци од точки SLAM-LiDAR и UAV-LiDAR.



Слика 7.27. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух од хотелскиот комплекс



Слика 7.28. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер од хотелскиот комплекс

На Слика 7.27 е прикажан UAV-LiDAR облакот од точки за хотелскиот комплекс, кој обезбедува добра покриеност на кровната геометрија, горните делови од објектот и непосредниот терен, а на Слика 7.28 е прикажан LiDAR облакот од точки добиен со рачен SLAM-скенер, кој овозможува висока густина и континуитет на податоците во зоната на фасадите и во внатрешните простории, преку непосредно движење околу и во објектот.

Процесирањето започнува со регистрација и геореференцирање на двата облака од точки во единствен координатен систем, со користење на референтни точки на терен (Ground Control Points – GCP), со што се обезбедува апсолутна просторна усогласеност и можност за нивна понатамошна интеграција со други просторни слоеви. По почетното усогласување, се спроведува фино порамнување (cloud-to-cloud registration) со цел минимизирање на резидуалните разлики помеѓу UAV-LiDAR и SLAM облакот од точки. Во оваа фаза посебно внимание се посветува на SLAM-податоците, имајќи предвид дека кај подолги траектории може да се појават локални деформации, акумулирано отклонување и варијации во густината на точките.

По усогласувањето следи чистење и редукција на шум и груби грешки, при што се отстрануваат изолирани точки, абнормални групирања на точки и нерелевантни точки (на пр., објекти кои се движат, случајни рефлексии и делови од вегетација што не се предмет на моделирање). Паралелно се врши просторно ограничување на облакот од точки на област од интерес (Region of Interest – ROI), односно издвојување на податоците што се однесуваат на селектираниот објект и неговата непосредна околина, со цел да се намали обемот на обработка и да се задржи контролирана работна структура. По потреба се применува и контролирана редукција на густината (decimation, downsampling), така што се оптимизира обработката без значајно губење на критичните геометриски рабови, прекини и карактеристични архитектонски детали.



Слика 7.29. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух за селектираниот објект



Слика 7.30. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер за селектираниот објект

На Слика 7.29 е прикажан облак од точки добиен со UAV-LiDAR скенирање кој дава конзистентен облак од точки за селектираниот објект и околниот терен, со особено добра репрезентација на кровните рамнини, но очекувано покажува ограничувања во зони со засенчување и делови што не се директно видливи од траекторијата на летање. Наспроти тоа, Слика 7.30 го прикажува облакот од точки добиен со SLAM скенирање со повисока густина на точки во непосредно скенираните области и подобро дефинирани фасадни детали.

Во следната фаза се спроведува сегментација и тематска организација на податоците, при што облакот се структурира во функционални целини релевантни за BIM-моделирање: кровни површини, фасадни рамнини, отвори, конструктивно релевантни површини, терен и нерелевантни елементи. Ваквата организација овозможува појасна интерпретација на геометријата и создава стабилна основа за извлекување на основни форми, референтни рамнини и параметарски елементи во BIM околина. Особено значајно е што со комбинирање на двата извора се надополнуваат слабостите на секој од нив поединечно: UAV-LiDAR обезбедува сигурна информација за кровната структура и

надворешниот контекст, додека SLAM-скенирањето обезбедува повисока деталност на фасадите и внатрешните простори.

Како резултат од процесирањето се добива интегриран, исчистен и тематски структуриран облак од точки за селектираниот објект, геореференциран во единствен координатен систем, кој претставува доверлива основа за последователното Scan-to-BIM моделирање. На овој начин се обезбедуваат услови за конзистентна реконструкција на надворешната и внатрешната геометрија на објектот и за негова понатамошна BIM-GIS интеграција.

7.3.3. Креирање на BIM модел

Постапката за формирање на BIM-модел на селектираниот објект од хотелскиот комплекс започнува со систематска интерпретација на интегрираниот облак од точки, добиен преку фузија на податоци од рачен SLAM-LiDAR скенер и UAV-LiDAR снимање. Во рамки на претходната обработка, облакот од точки е геореференциран и усогласен во државниот координатен систем EPSG:6316, со што и BIM моделот ја наследува истата просторна референца и претставува *as-is* репрезентација со недвосмислена просторна референца. Ваквата просторна конзистентност е важна за понатамошна BIM-GIS интеграција, 3Д просторни анализи и 3Д катастарски сценарија, каде што позицијата, ориентацијата и метричката точност на моделот мора да бидат обезбедени низ различни софтверски платформи и податочни формати. Архитектонската морфологија на објектот се карактеризира со комплексен габарит и комбинација на повеќе волумени, поради што квалитетот на прочистувањето, сегментацијата и проверката на геометриската конзистентност меѓу SLAM и UAV-LiDAR облаците од точки директно влијае врз точноста на позиционирањето и димензионирањето на BIM елементите, особено во зоните на фасадни прекршувања, кровни премини, конзолни делови и отвори.

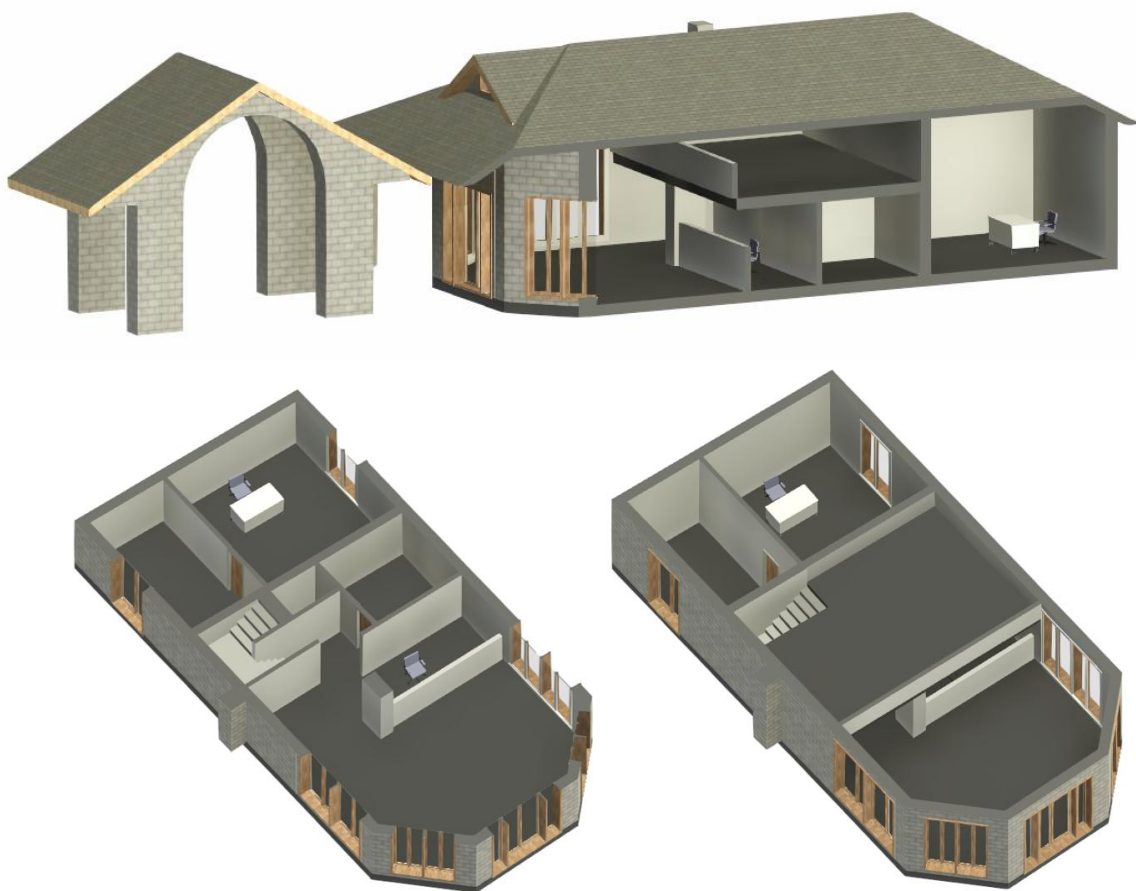
Препознавањето и моделирањето на карактеристичните елементи се базира на аналитичка работа со хоризонтални пресеци по нивоа и вертикални (попречни и надолжни) пресеци низ критични зони, со цел да се контролираат габаритот, висинските односи, дебелините и позициите на плочите, кровната геометрија, како и врските со пристапните и контактните делови. Моделирањето се спроведува по принцип од глобална кон детална геометрија, при што најнапред се воспоставуваат референтните поставки (ориентација, оски и нивоа), потоа се дефинира примарната обвивка (надворешни сидови, плочи и покрив), а во следните чекори се моделираат внатрешните прегради, отворите и секундарните архитектонски компоненти. Просторните целини се дефинираат како параметарски простории со атрибути, со што се овозможува автоматско извлекување на квантитативни показатели (површини, волумени, коти и други релевантни параметри) и нивна понатамошна употреба за анализи.

Во текот на целиот процес се применува континуирана контрола на усогласеноста на BIM геометријата со облакот од точки преку пресеци, споредбена визуелна инспекција и проверка на критичните зони, со итеративни корекции на локални отстапувања. Конечниот резултат е геореференциран BIM модел со соодветно ниво на деталност и метричка доверливост, подготвен за интеграција во GIS околина и за примена во 3Д катастарски сценарија (Слика 7.31). Финалниот BIM модел овозможува:

- автоматско пресметување на површина и волумени на сите простории и функционални делови, со што се овозможува прецизна процена на корисната

површина, неопходна за 3Д катастарските системи, енергетска ефикасност и просторни анализи,

- визуелизација и анализа на катови и пресеци, што овозможува детален увид во внатрешната просторна организација и структурата на објектот,
- идентификација на просторните релации меѓу просториите, односно како се меѓусебно поврзани и преклопени, што е клучно за моделирање на 3Д катастарски единици и утврдување на нивните граници,
- прецизна категоризација на функционални зони (прием, канцелариски дел), што овозможува анализа на намената и користењето на просторот во контекст на катастарска регистрација.



Слика 7.31. BIM модел на селектираниот објект од хотелскиот комплекс

7.3.4. Интеграција на BIM и GIS

Во третата студија на случај интеграцијата на селектираниот BIM модел се одвива во поширок просторен контекст, што значително ја зголемува аналитичката вредност на резултатот. Деталниот BIM модел на избраниот објект не е изолиран, туку е вграден во интегрирана GIS околина во која останатите објекти од хотелскиот комплекс се прикажани со генерализирано ниво на деталност LOD1, формирани врз основа на UAV-LiDAR податоците. На тој начин се воспоставува јасна методолошка разлика помеѓу

микрониво, каде е потребна висока геометриска и семантичка деталност поради моделирање на внатрешни единици и нивни граници, и макрониво, каде поширокиот просторен контекст е претставен поедноставено, но доволно информативно за анализа на односите во рамките на комплексот.

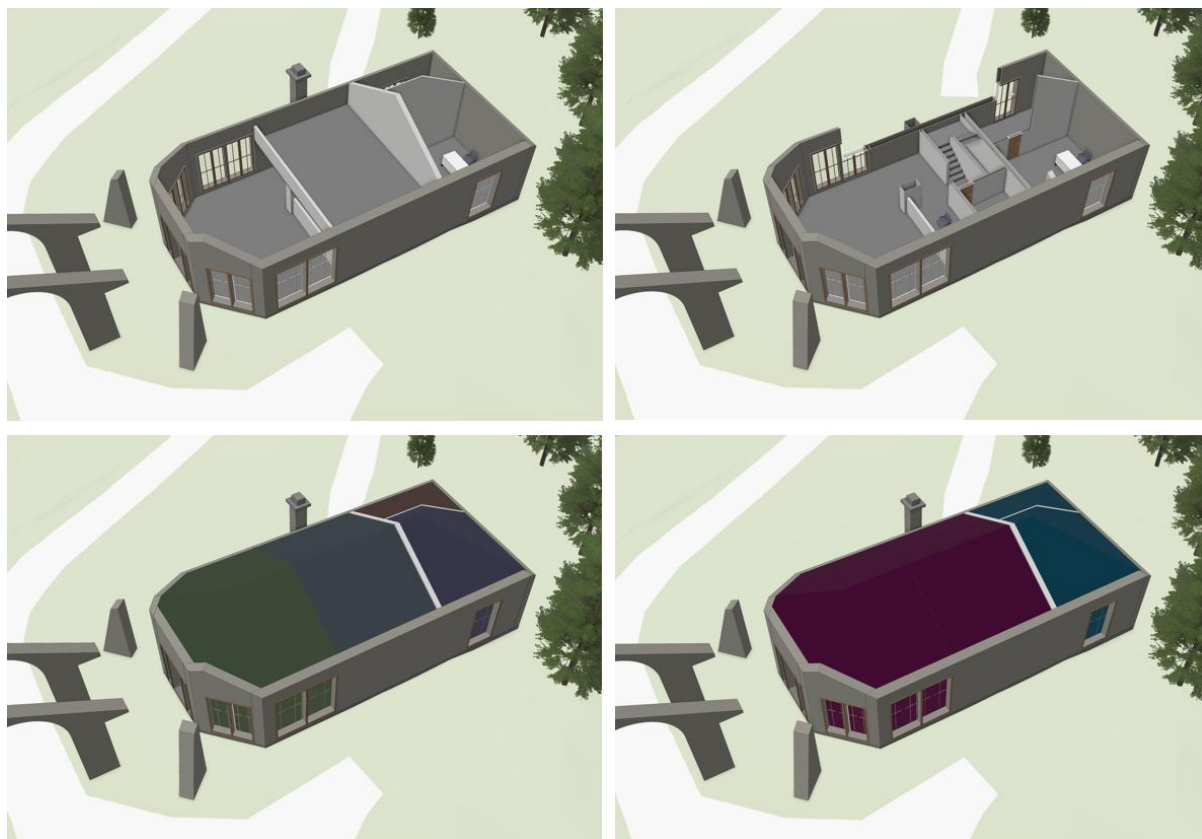
Интеграцијата на селектираниот објект во GIS околина се изведува без потреба од дополнително геореференцирање, бидејќи BIM моделот е формиран врз основа на геореференциран облак од точки, добиен со фузија на податоци од SLAM-LiDAR и UAV-LiDAR аквизиција. Геометриската основа на моделот е веќе поставена во државниот координатен референтен систем, па и BIM елементите се креирани во истиот просторен контекст. При миграцијата во IFC4 формат, моделот ја задржува можноста за пренос на информациите за координатниот систем преку стандардните механизми за просторно референцирање, што овозможува негова директна и конзистентна интеграција во GIS околина. На тој начин, деталниот BIM модел на селектираниот објект се интегрира со останатите просторни слоеви без поместувања и без дополнителни постапки за усогласување на координатите.

Во практична смисла, интеграцијата е реализирана преку трансформација на BIM моделот во просторна база на податоци, при што IFC датотеката се импортира во GIS и се генерираат структурирани 3Д слоеви за различните типови елементи. Со ова се менува и природата на податокот: од затворен модел во BIM датотека, кон аналитички употреблив GIS модел, во кој секој елемент станува просторен ентитет со геометрија и атрибути. Сидовите, подовите, покривните елементи, скалите, просториите и другите составни делови на објектот се трансформираат во соодветни GIS објекти, организирани по конструктивна или IFC логика, така што моделот станува достапен за пребарување, филтрирање, статистичка обработка и 3Д просторни анализи.

Клучен аспект на оваа трансформација е задржувањето на тридимензионалната геометрија на објектот. Во GIS околината, BIM елементите се претставени како multipatch геометрии, со што се зачувува нивната волуметриска и површинска структура и се овозможуваат реални 3Д анализи, како пресметка на волумен, анализа на контактни површини, просторни пресекувања, проверка на вертикални односи и идентификација на потенцијални конфликтни зони. Истовремено, тематската организација на слоевите овозможува анализите да се изведуваат по тип на елемент, по кат, по функционална припадност или по конструктивна улога, што е особено важно кај објекти со сложена внатрешна организација и повеќе функционални целини.

Посебно значење во контекст на катастар и управување со недвижности има интеграцијата на внатрешните просторни единици. Во BIM моделот, поединечните простории се дефинирани како IfcSpace, додека нивната логичка групација во функционални целини е реализирана преку IfcZone. По импортирањето во GIS, овие просторни единици се трансформираат во 3Д просторни ентитети со јасно дефинирани граници, површини и волумени, што создава основа за нивно третирање како 3Д просторни единици во смисла на 3Д катастар. На овој начин, поединечните деловни простори, санитарни јазли и другите функционални делови на објектот можат да се анализираат според површина, волумен, катност, просторна положба и релации со останатите елементи на објектот. Истовремено, зоните функционираат како просторни групи, погодни за поврзување на повеќе простории во една административна или функционална целина. Сите 3Д просторни единици се просторно и семантички поврзани со основниот објект, обезбедувајќи јасна хиерархиска структура што кореспондира со

реалната организација на објектот. Моделот е точно геореференциран и овозможува поврзување со соодветната 2Д катастарска парцела, што создава основа за формирање на 3Д катастарски систем. На Слика 7.32 се дадени формираните 3Д просторни сегменти во интегрираниот BIM-GIS модел за селектираниот објект.



Слика 7.32. Дефинирани просторни сегменти во рамките на селектираниот објект

Во атрибутна смисла, во GIS околината се пренесуваат и клучните податоци од BIM моделот, како што се GlobalId, IFC класа, ниво, површина, волумен и други параметри на елементите и просториите.

Табела 7.10. Атрибутивна табела на просторните единици во селектираниот објект

Единствен идентификатор на објект	Единствен идентификатор на просторна единица	Просторна единица (IfcZone)	Намена	Број на простор (IfcSpace)	Кат (Level)	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
10200_1	1_1	1	Деловен простор	1	Кат 1	75	283
10200_1	1_1	1	Тоалет	2	Кат 1	10	21
10200_1	1_1	1	Деловен простор	3	Кат 2	44	110
10200_1	1_2	2	Деловен простор	4	Кат 1	15	67
10200_1	1_2	2	Деловен простор	5	Кат 1	26	126

Овие атрибути стануваат основа за семантичка селекција, статистички анализи и поврзување со надворешни бази на податоци. Особено значајно е тоа што вака формираните просторни единици може да се доведат во релација со правата врз недвижностите, односно со катастарски и административни записи. Во таа смисла, IfcSpace објектите може да се интерпретираат како поединечни 3Д просторни единици, а IfcZone како нивни групи, со што BIM-GIS моделот создава непосредна геометриско-семантичка основа за понатамошно поврзување со LADM ориентираните структури. Во Табела 7.10 се дадени атрибутните податоци за формираните 3Д просторни сегменти во интегрираниот BIM-GIS модел за селектираниот објект.

Интеграцијата на BIM и GIS во третата студија на случај е реализирана како „контекстуално збогатен“ 3Д просторен модел, во кој деталниот BIM модел на избраниот објект се поврзува со генерализирана 3Д репрезентација на останатите објекти од хотелскиот комплекс и со тематски слоеви што ја опишуваат природната и инфраструктурната околина (вегетација, електроенергетска мрежа, патеки и паркинг). Со ваквиот пристап методологијата се тестира како целосен BIM-GIS работен тек насочен кон просторна анализа и поддршка на сценарија за 3Д катастар и управување со недвижности, каде што контекстот има суштинско влијание врз интерпретацијата на просторните односи и граници.

Предуслов за успешна интеграција на сите просторни податоци во еден интегриран систем е формирање на конзистентна висинска и просторна основа врз база на UAV-LiDAR облак од точки. Од обработениот и класифициран облак се генерирани дигитален теренски модел (DTM) и дигитален модел на површината (DSM), кои служат како примарни просторни деривати за усогласување на сите 3Д елементи. DTM ја обезбедува реалната топографија и висинската референтност на локацијата, во комплекс со наклонет терен дури и мали локални отстапувања можат да предизвикаат неконзистентно „вклопување“ на објектите („потонување“ или „лебдење“), а во катастарски контекст, погрешно толкување на просторните односи. Затоа DTM се користи како референтна површина за поставување на BIM моделот и за контрола на вертикалната конзистентност на GIS слоевите на макрониво.

Останатите објекти во рамките на хотелскиот комплекс се интегрирани како генерализирани 3Д волумени со ниво на деталност LOD1. Оваа репрезентација е соодветна за контекстуална визуелизација и за анализа на меѓусебните просторни односи на ниво на комплекс, без да се воведува геометриска сложеност. Иако овие објекти не ја содржат деталната внатрешна структура на селектираниот BIM модел, нивното присуство е суштинско за правилно согледување на положбата, ориентацијата и просторната поврзаност на анализираниот објект во рамките на целиот систем. Со тоа интегрираниот модел добива карактер на хибриден BIM-GIS модел, во кој различни нивоа на деталност се комбинираат согласно аналитичката потреба.

Вегетацијата е вклучена како посебен тематски слој, добиен преку екстракција на дрвјата од класифицираниот облак од точки. Методолошки, како репрезентативен елемент за позицијата на секое дрво е избрано стеблото, бидејќи претставува најстабилна планиметриска референца, за разлика од крошната која е морфолошки променлива. За секој поединечен елемент дефиниран како точка е определена и висина, добиена од nDSM, која е зачувана како атрибут и овозможува поставување 3Д симболија на дрвјата во рамките на интегрираниот BIM-GIS модел. На овој начин, вегетацијата не е само визуелен додаток, туку просторно и семантички дефиниран слој што може да се користи

за анализа на засенчување, визуелни анализи, однос со објектите и влијание врз непосредната просторна околина.

Инфраструктурните елементи на електроенергетската мрежа се интегрирани преку издвојување и моделирање на електричните столбови и електропроводите како посебни 3Д GIS слоеви. Столбовите се претставени како точки со висински и описни атрибути, додека електропроводите се моделирани како 3Д линии што ја следат нивната реална просторна траекторија. Со ова, густата и неструктурирана LiDAR геометрија се трансформира во поедноставен, но аналитички значително покорисен инфраструктурен модел. Ваквата репрезентација овозможува проверка на растојанија до објектите, анализа на потенцијални конфликтни зони, дефинирање на безбедносни коридори и вклучување на инфраструктурата во пошироки сценарија на управување со комплексот.

Патеките и паркинг-просторите се интегрирани како значајни површински слоеви што ја дополнуваат функционалната и просторната интерпретација на хотелскиот комплекс. Нивното вклучување е важно бидејќи овозможува анализа на пристапноста, организацијата на движењето во рамките на комплексот и релациите помеѓу објектите и отворениот простор. Во комбинација со DTM, овие слоеви придонесуваат за попрецизно разбирање на просторното функционирање на комплексот, особено во услови на наклонет терен, каде патеките, отворените површини и паркинзите имаат суштинска улога во меѓусебното поврзување на објектите и во дефинирањето на практичната употреба на просторот.



Слика 7.33. Интегриран BIM-GIS модел на хотелскиот комплекс

Финалниот интегриран BIM-GIS модел за целиот хотелски комплекс е прикажан на Слика 7.33 и Слика 7.34. Интегрираниот модел е организиран во јасни тематски слоеви (терен, објекти, вегетација, инфраструктура), со контролиран баланс меѓу деталност и

ефикасност, висока резолуција се применува таму каде што се потребни внатрешните единици и граници, а поширокиот контекст се моделира генерализирано. Како резултат, се обезбедува функционална основа за просторни и правно-административни анализи релевантни за 3Д катастар (просторни односи, вертикални преклопувања, конфликтни зони со инфраструктура) и за сценарија за управување со недвижности и простор во рамки на дигитален близнак, каде недвижноста се разгледува како дел од поширок, реално условен просторен систем.



Слика 7.34. Интегриран BIM-GIS модел на хотелскиот комплекс во поширок опфат

7.3.5. Евалуација и валидација на моделот

Евалуацијата и валидацијата на третиот модел е насочена кон проверка и потврда дека интегрираниот BIM-GIS модел е просторно конзистентен, интероперабилен и практично употреблив за просторни анализи и сценарија поврзани со 3Д катастар во услови што ја репрезентираат реалната комплексност на урбаната средина. За разлика од првите два модели, каде акцентот е поставен на статистичка проверка на геометриската точност на внатрешноста и габаритот на објектите, овде валидацијата е ориентирана кон системско ниво: контрола на мултисензорската фузија, стабилност на вертикалната компонента во наклонет терен, коегзистенција на различни нивоа на деталност, зачувување на семантика и атрибути при трансформацијата BIM→GIS и интеграција на контекстуални слоеви (терен, вегетација, инфраструктура) во единствен оперативен просторен модел. Со тоа, третиот модел претставува целосен тест на методологијата, проверувајќи не само точност, туку и зрелост за мултифункционална употреба и долгорочно управување со податоци.

Потврдена е просторната референцираност и конзистентноста на комбинираниот аквизициски пристап (UAV-LiDAR и SLAM-LiDAR). Усогласеноста меѓу двата податочни сета е оценета во преклопните зони преку детална визуелно-геометриска контрола на критични елементи (кровни рабови, фасадни рамнини, јасни агли и карактеристични точки). Резултатите потврдија дека регистрирањето обезбедува стабилна заедничка геометриска основа и дека потенцијалните SLAM деформации се контролирани, без систематски насочени отстапувања, што е особено релевантно во урбани сцени со нееднаква густина на точки, засенчување, рефлексивност и хетерогена покривка.

Посебен фокус е ставен на вертикалната компонента и улогата на дигиталниот модел на терен (DTM), бидејќи висинската стабилност е клучна за коректни 3Д просторни односи во наклонет терен. Тополошките проверки на контактите терен-објект потврдија реалистична релација на основите и пристапните површини со теренот, без неосновани празнини или дисконтинуитети. Дополнително е оценета реалистичноста и континуитетот на наклоните кај пешачки патеки и паркинг-површини, што индиректно упатува на квалитетно издвојување, односно филтрирање на теренските точки и во присуство на вегетација и микрорелјеф.

Во делот на моделирање и интеграција, валидацијата ја потврди применливоста на селективна деталност во единствен просторен систем: целниот објект е моделиран детално во BIM (со коректно интерпретирани преклопувања и просторни единици), додека останатите објекти се претставени генерализирано како 3Д контекст. Анализата покажа дека различните нивоа на деталност не создаваат конфликт во координатната поставеност и не генерираат неконзистентни пресечни односи, што е практично значајно бидејќи целосно детално BIM моделирање на сите објекти не е потребно секогаш. Клучен сегмент е интероперабилноста при трансформацијата BIM→GIS. Потврдено е зачувување на семантичката структура и клучните атрибути (идентификатори, катност, намена, површина и волумен), како и геометриска валидност на 3Д телата по трансформирање во GIS, без критични тополошки грешки. Важно е што резултатот останува оперативен, слоевите се подготвени за 3Д просторни операции и за поврзување со административно-правни податоци.

Дополнително, валидирана е интеграцијата на контекстуалните објекти и инфраструктурни слоеви (вегетација, електроенергетска инфраструктура, патеки и паркинг), при што е потврдена правилна висинска референца на вегетацијата во однос на DTM и просторна конзистентност на меѓусебните 3Д односи кај инфраструктурата, со потенцијал за анализи на конфликти, приближувања и ризици. Евалуацијата потврди дека третиот модел ја исполнува улогата на завршна системска проверка, обезбедена е просторна конзистентност при мултисензорска фузија, вертикална стабилност преку DTM во наклонет терен, функционална коегзистенција на различни нивоа на деталност и интероперабилност со оперативност по трансформацијата во GIS. Врз таа основа, интегрираниот BIM-GIS модел е валидиран како практично применлив за комплексни урбани ансамбли и како аргумент за зрелоста и скалабилноста на предложената методологија во пошироки институционални и катастарски сценарија.

8. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД СПРОВЕДЕНОТО ИСТРАЖУВАЊЕ

8.1. Дискусија на резултатите од Модел 1

8.1.1. Објаваност на изборите на моделите и улогата во методологијата

Како прв модел за тестирање и валидација на предложената методологија е избран посебен дел од објект со наменска класификација – стан, бидејќи обезбедува методолошки соодветни услови за иницијална проверка на Scan-to-BIM работниот тек од две комплементарни перспективи. Од една страна, станбената единица претставува релативно затворена и предвидлива околина во која може да се спроведе структурирана евалуација на основните чекори (аквизиција на облак од точки, регистрација, обработка и BIM моделирање) без дополнителни влијанија што се типични за надворешни услови и кои можат да ја отежнат интерпретацијата на причинско-последичната врска меѓу методот и резултатот. Со тоа се овозможува појасно утврдување на точноста, конзистентноста и репродуктивноста на постапката.

Од друга страна, иако внатрешната геометрија на просториите главно е составена од правилни и лесно интерпретабилни форми, присуството на конструктивни елементи (столбови, греди) воведува доволно реалистична инженерска комплексност за да се провери капацитетот на методологијата да продуцира не само визуелно усогласен модел, туку метрички проверлива и геометриски коректна дигитална репрезентација. Оттука, моделот може доверливо да се користи за извлекување квантифицирани карактеристики како површина, волумен и должини, како и за понатамошно семантичко структурирање на елементите, што претставува предуслов за негово интегрирање во пошироки аналитички и интероперабилни работни текови.

8.1.2. Квалитетот и репрезентативноста на влезните податоци

Резултатите од аквизицијата со рачен SLAM-LiDAR покажуваат дека мобилното снимање во затворен простор, кога е изведено со соодветна траекторија и со контролиран режим на движење, може да обезбеди облак од точки со доволна густина и стабилност за изработка на *as-is* BIM модел на ниво LOD 300–350. Средната густина од околу 30 000 pt/m² претставува податочен сет со висока резолуција, кој овозможува јасна детекција не само на примарните градежни елементи (сидови, плочи, отвори), туку и на останати детали релевантни за геометриската точност (профили околу прозорци, врати, рабови на греди, столбови итн.). Ваквата густина практично ја намалува неодреденоста при „поставување“ на параметарските елементи во BIM, бидејќи контурите и рамнините се поизразени и недостатокот на точки на одредени локации кои се јавуваат поради мебел и тесни премини нема влијание врз моделот.

Истовремено, резултатите потврдуваат дека квалитетот на SLAM-решението во затворен простор зависи од одржување на континуирана просторна поврзаност помеѓу веќе скенирани и нови области. Опишаната стратегија (скенирање на сите простории со внимателно преминување низ тесни зони) е во согласност со принципот дека стабилноста на SLAM се нарушува при долги монотони коридори, брзи ротации и губење на

геометриски карактеристични форми, рабови или агли. Во оваа студија, ваквите ризици се третирани преку концептот на траекторија на движење со „затворање на јазли“ (loop closure) во рамки на станот, што придонесува да се минимизира акумулираното отклонување и да се задржи конзистентноста на геометријата.

8.1.3. Локален координатен систем како методолошка поставка

Во рамки на првиот модел скенирањето е реализирано без активирање на GNSS-базиран режим на работа, поради што облакот од точки, а со тоа и BIM моделот, е дефиниран во локален координатен систем. Ова е оправдана методолошка одлука, бидејќи овозможува „чиста“ евалуација на релативната геометриска стабилност на реконструкцијата и способноста за прецизно репродуцирање на димензиите и просторните односи во рамки на истиот објект, без влијание од глобално позиционирање. Истовремено, така формираната геометрија останува отворена за понатамошни GIS и катастарски сценарија.

Практичната импликација е двојна:

- резултатите од точноста директно ја рефлектираат стабилноста на Scan-to-BIM реконструкцијата, а не квалитетот на геореференцирањето,
- во следните фази, истиот модел може да се трансформира во друг координатен систем преку контролни мерења и трансформација, кога интеграцијата со GIS ќе стане примарна цел.

8.1.4. Ефекти од процесирањето: прочистување и сегментација

Обработката на облакот од точки (отстранување шум, груби грешки и нерегуларни точки) се покажува како важен предуслов за метрички конзистентно моделирање. Кај внатрешни простори, најизразени извори на шум се:

- стаклени или сјајни површини (погрешни или повеќекратни рефлексии) кои создаваат „фантомски“ точки пред или зад реалната рамнина на стаклените или сјајни површини,
- динамички објекти (лица, врати кои се движат), кои создаваат дисперзирани контури и локални кластери што не припаѓаат на реалната геометрија.

Визуелизацијата по интензитет овозможува практична дијагностика: шумот често е поврзан со понизок интензитет и поголема дисперзија. Комбинацијата од статистичко филтрирање, кластеризација и рачна интервенција резултира со „почист“ облак кој е погоден за интерпретација. Дополнително, сегментацијата по структурни целини (под, сид, таван) ја зголемува читливоста на облакот и ја намалува веројатноста BIM моделот да репрезентира погрешна геометрија. Практично, оваа фаза директно го олеснува моделирањето и го подобрува квалитетот на финалните параметарски елементи, што е во согласност со општите препораки за Scan-to-BIM работни текови.

8.1.5. Геометриска валидност на BIM моделот и контрола на квалитетот

Контролата на квалитет на BIM моделот, реализирана преку хоризонтални и вертикални пресеци и преклопување на моделот со облакот од точки, покажува високо

ниво на усогласеност меѓу реконструираниите елементи и скенираната реалност. Особено е значајно што вертикалните пресеци дозволуваат проверка на висинските параметри: висина на простории, позиција на плочи и сидови, како и геометрија на греди и столбови.

Евалуацијата и валидацијата се спроведени преку компаративна статистичка анализа со независни референтни мерења добиени со ласерски уред за мерење должини со декларирана точност $\pm 2 \text{ mm}$, што обезбедува високо ниво на доверливост на референтниот сет на податоци. Анализата е спроведена врз 86 парови мерења (хоризонтални должини и дополнителни вертикални мерења), при што опсегот на должини е широк (0,07–8,79 m кај класичните мерења и 0,06–8,80 m во BIM), што овозможува оценка на конзистентноста и кај кратки и кај подолги растојанија.

Статистичките показатели ја потврдуваат стабилноста на моделот: број на мерења $n=86$, средна разлика $\Delta L \approx -0,47 \text{ mm}$ и 95% интервал на доверба $[-3,05 \text{ mm}, +2,12 \text{ mm}]$, што укажува на отсуство на статистички значајна систематска пристрасност. Дисперзијата е на сантиметарско ниво $s \approx 1,21 \text{ cm}$, со $MAE \approx 0,91 \text{ cm}$ и $RMSE \approx 1,20 \text{ cm}$. Најлошото сценарио е $\max|\Delta L| \approx 2 \text{ cm}$, а 95% интервалот на согласност е приближно $[-2,41 \text{ cm}, +2,32 \text{ cm}]$, што дефинира реалистични граници во кои се очекуваат најголемиот дел отстапувања при слични услови на скенирање и моделирање. Ова значи дека точноста на BIM моделот добиен преку Scan-to-BIM е споредлива со класичниот пристап на мерење на внатрешен простор, при што отстапувањата се во рамки на прифатливи толеранции. Од практична перспектива, особено е важно што сите споредени растојанија се во $\pm 2 \text{ cm}$ и дека голем дел од мерките покажуваат уште потесна согласност, што го поткрепува заклучокот за висока конзистентност на моделот. Оваа конзистентност е значајна затоа што ја демонстрира способноста на моделот да биде метрички валиден во 3Д смисла, односно не се работи само за визуелна 3Д репрезентација, туку за дигитален модел од кој може доверливо да се извлечат квантитативни карактеристики (површина, волумен), што претставува основа за понатамошни анализи, извештаи и интеграции.

Од аспект на стандардизацијата, дефинирањето на просториите како IfcSpace и нивното групирање во IfcZone претставува клучна семантичка структура за понатамошни примени во управување со недвижности и 3Д катастар, бидејќи просторот е основна единица кога се бара јасна идентификација на функционални целини, површини и волумени во рамки на една станбена единица. Со тоа, првиот модел успешно демонстрира дека предложената методологија не завршува со геометриска репрезентација на просторот, туку обезбедува основа за структурирани податоци и можност за интеграција.

8.1.6. Релевантност за катастар и концептуално поврзување со LADM

Иако станот е избран првенствено за валидација на геометрискиот квалитет и стабилноста на Scan-to-BIM реконструкцијата, резултатите имаат директна импликација за катастарските сценарија. Во катастарските системи при регистрацијата на станови, клучниот предмет на регистрација е просторот како правно дефинирана единица (посебен дел од зграда) со јасни граници и мерливи атрибути (површина и волумен), како и неговиот однос со заедничките делови и останатите единици. Токму затоа, структурирањето на станот преку IfcSpace (простории) и IfcZone (стан како целина) претставува функционална BIM основа за понатамошна правно-просторна интерпретација.

Просторни граници и нивна правна интерпретација

За катастарски сценарија, суштинското прашање е: каде точно завршува едниот посебен дел од зградата и продолжува другиот? Во BIM, границите на IfcSpace се дефинираат преку геометрија и релации со градежните елементи (сидови, плочи), но во катастарските модели тие граници добиваат права поврзани со нив. Оттука, BIM моделот од овој случај овозможува да се тестираат најважните концепти:

- волуметриски опфат на посебниот дел од зградата (како просторна единица),
- континуитет на граници (затворена граница на просторот),
- внатрешни поделби (простории) и правна целина (стан, посебен дел).

Практично, IfcZone може да се третира како агрегатна репрезентација на станот, додека IfcSpace се елементите од кои IfcZone е сочинета.

Концептуално мапирање кон LADM логика

Во рамки на LADM-пристапот, посебниот дел од зградата како правна целина најчесто се моделира како LA_BAUnit (основна административна единица) што се поврзува со една или повеќе LA_SpatialUnit геометрии, и со права и ограничувања (RRR). Во тој контекст, резултатите од овој модел се значајни затоа што:

- IfcZone (посебен дел од зграда) може да се користи како семантичка основа за административната целина (LA_BAUnit),
- IfcSpace или агрегираниот 3Д волумен може да се користи како кандидат-геометрија за просторната единица (LA_SpatialUnit),
- изведените димензии (површина и волумен) се атрибути што се релевантни и за правни и технички регистри, но само ако моделот е геометриски валиден и проверен.

Ова мапирање на класите не значи дека IFC автоматски станува катастарски модел, туку дека BIM обезбедува дигитален сет на податоци од кој може да се извлече 3Д геометрија и минимум атрибути за поврзување со податоците од катастарскиот систем.

Во овој прв модел намерно е избран локален координатен систем, што е соодветно за релативна геометриска валидација. Сепак, за катастарска примена се појавуваат два дополнителни услови:

- геореференцирање во официјален координатен систем (преку контролни точки, мерења и трансформација),
- дефинирање на толеранција (прифатливо отстапување) врз основа на корелацијата на точноста на инструментите и правните критериуми за регистрација.

Оттука, резултатите од анализата за контрола на квалитетот од овој модел се практично корисни бидејќи овозможуваат да се предложи реалистична толеранција за формирање на модел на изведена состојба за посебните делови од зграда, врз основа на измерени вредности и реални статистики, наместо да се користат произволни толеранции.

8.1.7. Ограничувања и заклучни согледувања

Иако резултатите се позитивни, неколку ограничувања се важни за дискусија. Најпрво, поради локалниот координатен систем, моделот во оваа фаза не е директно подготвен за интеграција со други просторни податоци без дополнително геореференцирање. Второ, иако SLAM-скенирањето овозможува висока релативна точност, потенцијално акумулирано отклонување може да се појави кај подолги траектории или простори со еднолична геометриска структура, затоа во покомплексни студии на случај (повеќе етажи, долги коридори итн.) ќе биде потребна поцврста контрола (контролни мерења, затворање на јазли или дополнување со други извори на референтност). Трето, стаклените површини и динамичките објекти остануваат систематски извори на шум и бараат дополнителна обработка, бидејќи во спротивно може да влијаат на прецизноста на елементите кај отвори и фасадни линии.

Сумирано, првиот модел ја потврдува применливоста на предложениот пристап за брза и прецизна аквизиција на просторни податоци од внатрешен простор со SLAM-LiDAR, како и способноста да се формира BIM модел со висока геометриска усогласеност и семантичка структура погодна за квантитативни анализи. Овој резултат е суштински за методологијата, бидејќи покажува дека базичните чекори (аквизиција → процесирање → BIM реконструкција → контрола на квалитет и извлекување податоци) функционираат стабилно во реален објект и создаваат доверлива основа за следните фази: стандардизиран експорт (IFC), интеграција со GIS, и тестирање во пообемни и покомплексни сценарија релевантни за катастарска регистрација и генерално администрирање со недвижности.

Првиот изработен модел функционира како „калибрациски“ случај што ја проверува стабилноста на методологијата во контролирани услови. Имајќи предвид дека анализата за контрола на квалитетот потврди дека грешките се мали по вредност и од случаен карактер, методологијата може да се примени на посложени случаи (повеќе етажи, комплексни објекти, комбинирани пристапи за аквизиција на просторни податоци, SLAM, TLS, UAV-LiDAR), каде геореференцирањето, тополошката конструкција и интероперабилноста со GIS и катастарските системи стануваат доминантни предизвици.

8.2. Дискусија на резултатите од Модел 2

8.2.1. Оправданост на изборот на моделот и улогата во методологијата

Резултатите од вториот модел овозможуваат поцврста и поцелосна проверка на предложената методологија во услови што се значително поблиски до реалните сценарија на управување со недвижности: објект со комбинирана намена, сложена конструктивна морфологија, изразени вертикални преклопувања и потреба од апсолутна просторна референца. За разлика од првиот модел, каде тестирањето се одвива во затворен простор и доминантно е насочено кон геометриска конзистентност и метричка валидација во контролирана средина, кај мостот „Влајко“ методологијата се проверува во урбана околина со динамични влијанија, варијабилни услови на снимање и непосредна применливост во 3Д катастарски интерпретации. Оттука, студијата на случај не ја оценува само точноста на моделот, туку ја тестира стабилноста на целиот процес: аквизиција на просторни податоци, обработка и интеграција на просторни податоци, BIM моделирање,

BIM-GIS трансформација, како и можноста за просторни анализи и катастарска интерпретација врз основа на интегрираниот резултат.

8.2.2. Катастарска репрезентација и идентификувани ограничувања на 2Д моделот

Анализата на постојната евиденција во Геодетско-катастарскиот информационален систем за овој објект јасно покажува дека 2Д пристапот концептуално не може да ја прикаже реалната просторна и правна структура на објектот. Регистрацијата преку четири полигони кои ги претставуваат основите на столбовите на мостот создава фрагментирана интерпретација: надземната конструкција останува „невидлива“ во катастарската содржина, а објектот практично се сведува на четири изолирани елементи без просторен континуитет и без јасно дефиниран однос меѓу конструкцијата и функционалните целини.

Дополнително, деловните простори интегрирани во телото на мостот се регистрирани на несоодветна локација (во рамки на еден столб), додека затворениот пешачки коридор воопшто не е дефиниран како просторна единица. Ова укажува дека проблемот не е исклучиво во недостиг на деталност, туку во ограничувањата на основниот модел на репрезентација: 2Д репрезентациите тешко или воопшто не можат да прикажат вертикални односи и преклопувања на недвижности со различна намена (сообраќајница-мост-деловни простори), ниту нивната функционална и административна поврзаност во 3Д просторот.

Во тој контекст, вториот модел има двојна улога: емпириски да демонстрира зошто постојната 2Д евиденција е недоволна за вакви објекти и да покаже дека интегриран BIM-GIS модел може да обезбеди просторна репрезентација што е истовремено инженерски валидна и административно интерпретативна.

8.2.3. Квалитетот на аквизицијата со SLAM-LiDAR во урбана средина

Примената на рачен SLAM-LiDAR скенер се потврди како ефикасно решение за брза аквизиција на детални просторни податоци за објект со сложена геометрија и повеќе функционални зони. Снимањето ги опфати сите релевантни сегменти: внатрешниот коридор, деловните простори, решетката и носечките елементи, пристапните кули и скали. Реализацијата во две работни сесии (внатрешност и надворешност) има јасна методолошка оправданост: се намалува ризикот од акумулирано отстапување поради долга траекторија, а воедно се овозможува поефективна контрола на покриеноста и стабилноста на решението преку „затворање на јазли“ во делови со изразени и стабилни геометриски обележја.

Воедно, моделот експлицитно ги истакна типичните извори на шум кај SLAM-скенирањето во отворена урбана средина: динамични објекти (пешаци, возила), вегетација и материјали со различни рефлексивни својства (стакло, метал). Овие фактори не се секундарни, туку директно влијаат врз квалитетот на облакот од точки и врз сигурноста на последователното моделирање. Сепак, резултатите покажуваат дека со внимателно планирање на траекторијата (вклучување на стабилни изразени детали како столбови, рабови) и со соодветна организација на снимањето, овие ефекти може да се задржат во рамки што овозможуваат Scan-to-BIM моделирање со деталност релевантна за LOD 300–350, односно со доволна геометриска информативност за конструктивни и функционални интерпретации.

8.2.4. Обработка и геореференцирање: стабилност на интегрираниот облак од точки

Процесирањето на облакот од точки (интеграција на работни сесии, прочистување од груби грешки, редукција на непотребна густина и сегментација) резултираше со метрички конзистентен и „читлив“ податочен сет погоден за Scan-to-BIM. Клучната разлика во однос на првиот модел е геореференцирањето: трансформацијата од локален во државен координатен систем преку GNSS референтни точки обезбеди апсолутно просторно референцирање, неопходно за GIS интеграција и катастарска употреба.

Во практична смисла, референтните точки имаат две улоги: ја стабилизираат трансформацијата, го намалуваат ризикот од глобално поместување на моделот и овозможуваат конзистентно позиционирање на BIM елементите во однос на парцели, инфраструктурни слоеви и други просторни податоци. Важно е да се нагласи дека без апсолутна просторна референца, BIM моделот останува инженерски корисен, но со намалена оперативност за административни цели, бидејќи не може да се поврзе со просторно референцирани катастарски записи. Во вториот модел, токму геореференцирањето го прави преминот од просторно изолиран модел кон модел спремен за интеграција со останати просторни податоци.

8.2.5. Резултати од BIM моделирањето: геометрија, дејалност и семантика

Формирањето на BIM моделот потврди дека Scan-to-BIM пристапот е применлив и за инфраструктурни конструкции со решеткаста, линеарна и комплексна просторна морфологија. За разлика од ортогоналната геометрија кај станот, каде доминираат рамни површини и правилни агли, кај мостовската конструкција доминираат линеарни носачи, повторливи модули и просторни врски меѓу елементите. Ова бара различна стратегија на моделирање: систематска анализа преку надолжни и попречни пресеци и примена на локални пресечни рамнини во критични зони.

Финалниот BIM модел обезбедува двојна вредност. Прво, тој претставува геометриски валидна *as-is* репрезентација, подготвена за извлекување мерливи параметри и за просторни анализи. Второ, и еднакво важно, моделот е семантички структуриран: конструктивните елементи, пристапните делови и функционалните простори се моделирани како параметарски објекти со класификација согласно IFC стандардот. Посебно значајно е што пешачкиот коридор и деловните простори можат да се дефинираат како IfcSpace, со можност за логичко групирање преку IfcZone. Оваа организација е директно релевантна за 3Д катастар, бидејќи овозможува просторните единици да се третираат како затворени 3Д волумени со јасно дефинирани граници.

8.2.6. Интеграција BIM-GIS: интегрираност и просторен контекст

Интеграцијата во GIS беше олеснета затоа што BIM моделот е изграден врз геореференциран облак од точки, а кај верзијата IFC4 се регистрираат информации за координатниот референтен систем, вклучително и соодветниот EPSG код (во конкретниот случај EPSG:6316). Како резултат на тоа, интегрираниот BIM модел може директно да се преклопи со ортофотото, катастарски парцели и инфраструктурни слоеви без дополнителни трансформации.

Во GIS околина, формирањето 3Д слоеви (multipatch, 3D feature classes) има суштинска методолошка последица: моделот станува предмет на просторни селекции,

тополошки проверки и анализа на односи (преклопување, контакт со терен, инфраструктура, однос со парцели и сообраќајници). Оттука, BIM-GIS интеграцијата не се сведува на визуелизација, туку претставува функционален трансфер на инженерскиот модел во аналитички просторен контекст. Ова е особено важно за катастарски сценарија, каде просторната конзистентност и проверливоста во однос на други регистри и ограничувања се еднакво критични како и самата геометрија.

8.2.7. Геометриска валидност и квалитет на интегрираниот BIM-GIS модел

Валидацијата на интегрираниот BIM модел во GIS околина е третирана како клучен чекор за потврда на неговата употребливост во администрирањето со недвижности. Кај вториот модел квалитетот на моделот не се оценува само преку локална усогласеност на BIM моделот со облакот од точки, туку и преку способноста моделот да обезбеди апсолутна просторна точност, односно сигурно позиционирање во државен координатен систем, што е предуслов за интегрирање со други регистрирани просторни слоеви.

Валидацијата на вториот модел е реализирана преку контролни геодетски мерења, кои претставуваат основа за одредување на позициската точност на конечниот модел. Основата на постапката е компаративна анализа на координатите на 58 карактеристични точки, избрани така да ја покриваат конструктивната и функционалната разновидност на објектот. Изборот на точки има методолошко значење, бидејќи „карактеристичните точки“ не се секогаш строго дефинирани: површините можат да бидат заоблени, а позицијата на пресекот може да зависи од дебелината на елементот или од нивото на деталност во моделот. Оттука, со оваа валидација се оценува не само точноста на аквизицијата, туку и степенот на геометриска усогласеност што произлегува од интерпретацијата при моделирањето.

Важен аспект е што оцената на квалитетот на моделот го зема предвид целиот процес: скенирање, обработка и регистрација, геореференцирање преку референтни точки, BIM моделирање, IFC трансформација и GIS интеграција, како и екстракција на координати од интегрираниот модел. На тој начин, резултатите го одразуваат кумулативниот ефект на потенцијалните извори на грешка (точноста на SLAM скенирањето, трансформациски ефекти зависни од распоредот и квалитетот на референтните точки, генерализација при моделирање и интероперабилност при трансформација во GIS), што е суштински важно за 3Д катастарски апликации, каде грешката може да се манифестира на повеќе нивоа, а не само во една фаза.

Статистичката анализа води кон две клучни констатации. Прво, средните разлики по координатни компоненти се занемарливи, што укажува на отсуство на систематско поместување на моделот во државниот координатен систем. Во практична смисла, ова потврдува дека трансформацијата преку GNSS-референтни точки е стабилна и дека BIM-GIS интеграцијата не воведува дополнителна глобална деформација. Овој резултат е критичен за катастарската применливост: систематска грешка би довела до погрешна просторна врска со парцели и инфраструктурни слоеви независно од локалната геометриска усогласеност.

Втората констатација е дека дисперзијата на отстапувањата е од ред на неколку сантиметри, што е очекувано за SLAM-базирана аквизиција во урбана средина и за моделирање на комплексни конструктивни елементи. MAE и RMSE индикаторите укажуваат на типична грешка по оска приближно 4–5 cm, при што максималните

отстапувања се јавуваат кај ограничен број точки, најчесто во зони со висока геометриска сложеност или во делови со неповолни услови на снимање.

За инженерска и катастарска интерпретација особено значајни се комбинирани индикатори, бидејќи тие се најблиски до реалните GIS операции кои работат со 2Д и 3Д растојанија, а не со поединечни координатни компоненти. Просечните хоризонтални и 3Д отстапувања покажуваат дека моделот е позициониран со точност доволна за стабилно преклопување со други просторни слоеви и за просторна идентификација на функционалните единици. Дополнително, 3Д отстапувањето сугерира дека кај најголемиот дел од точките се очекува грешка под 11 cm, што е „оперативна“ проценка на најлошо очекувано сценарио при просторни анализи.

Покрај валидацијата на моделот преку контролни геодетски мерења, споредбата со површините на посебните делови регистрирани во катастарскиот систем претставува дополнителен, независен критериум за верификација на метричката конзистентност на моделот. Пресметаните површини од моделот целосно се совпаѓаат со официјално евидентираниите површини во Геодетско-катастарскиот информативен систем, што укажува дека моделот не е само визуелно веродостоен, туку и геометриски „калибриран“ во рамки на параметрите што традиционално се применуваат.

Во исто време, ваквата паралела ја истакнува суштинската разлика меѓу 2Д и 3Д пристапот на регистрација. Дводимензионалниот катастар може да ја зачува точната површина како нумеричка вредност и да ја поврзе со правната единица, но не може да ја репрезентира нејзината просторна позиција во висина, нејзините реални граници во просторот, ниту односите со соседните простори и конструктивните елементи. Наспроти тоа, интегрираниот BIM-GIS модел овозможува површината да не биде само број, туку дел од 3Д геореференцирана и семантички организирана просторна единица, со јасно дефиниран контекст и проверлива просторна поставеност. На тој начин, усогласувањето на површините служи како мост меѓу постојната 2Д катастарска логика и потенцијалот за идно проширување кон 3Д катастар, каде што метричката точност се потврдува истовремено во рамнина и во волумен.

Валидацијата на овој модел потврдува дека комбинацијата на SLAM-LiDAR со соодветно распоредени GNSS-референтни точки претставува практична и ефикасна рамка за добивање апсолутно референцирани 3Д модели со употреблива точност за BIM-GIS и 3Д катастарски апликации.

8.2.8. Импликации за 3Д катастар: просторни единици, правни односи и LADM

Студијата на случај „Влајко“ претставува силен аргумент за потребата од 3Д катастар, бидејќи демонстрира реален пример каде 2Д регистрацијата создава правно-просторна двосмисленост. Геореференцираниот BIM модел овозможува јасна идентификација на 3Д просторни единици (пешачки коридор, деловни простори и релевантни конструктивни сегменти) и нивните просторни односи со сообраќајницата и парцелите. Во комбинација со GIS, овие единици може да се анализираат, да се валидираат и да се поврзат со административни атрибути, што ја отвора можноста за систематско управување со правата врз недвижностите врз основа на реални 3Д волумени.

Од аспект на LADM, резултатите ја потврдуваат концептуалната изводливост на мапирање: IfcSpace објектите природно кореспондираат со LA_SpatialUnit (3Д волумени),

IfcZone со LA_SpatialUnitGroup (групирање на просторни единици), додека секој посебен дел од објектот се разгледува како LA_BAUnit што е носител на правата врз недвижностите. На овој начин се формира основа за просторно смислено, проверливо и интероперабилно поврзување на инженерскиот модел со катастарската база.

8.2.9. Ограничувања и заклучни согледувања

Иако резултатите се позитивни, анализата укажува на неколку практични ограничувања што се релевантни за идни примени: потреба од внимателно планирање на траектории и кратки сесии за контрола на акумулираното отклонување, зголемена чувствителност на шум во присуство на динамични објекти и рефлексивни материјали, и зависност на апсолутната точност од распоредот и квалитетот на референтни точки. Овие ограничувања не ја намалуваат применливоста на методологијата, туку ја нагласуваат потребата од стандарден протокол за теренско скенирање и обработка на податоците.

Како заклучок, може да се каже дека вториот модел потврдува дека предложената методологија е применлива и за комплексни недвижности и дека овозможува креирање геометриски валиден, семантички структуриран и геореференциран BIM модел кој може директно да се интегрира во GIS и да се користи како основа за 3Д катастарска репрезентација. Студијата на случај „Влајко“ особено јасно ја демонстрира разликата помеѓу актуелната 2Д регистрација и реалната 3Д просторна структура, што претставува суштински придонес во аргументацијата за премин кон 3Д катастар базиран на BIM-GIS интеграција.

8.3. Дискусија на резултатите од Модел 3

8.3.1. Оправданост на изборот на модели и улогата во методологијата

Третиот модел, кој претставува хотелски комплекс со повеќе објекти во заеднички просторен систем, ја тестира применливоста на предложената методологија во реални услови каде геометријата, семантиката и контекстот се меѓусебно зависни. За разлика од претходните модели, каде фокусот е претежно на микро-ниво (детална реконструкција и тестирање на методологијата на еден објект и дел од објект), во овој модел резултатите имаат системски карактер: се проверува дали BIM-GIS интеграцијата функционира како оперативна рамка што може да поддржи истовремено моделирање на објекти со различно ниво на деталност, прецизни висински модели и останати тематски слоеви (вегетација, енергетска инфраструктура, патеки, паркинг). Избраната локација овозможува проверка на скалабилноста на пристапот и неговата применливост на микро и на макро ниво.

8.3.2. Ефективноста од комбинираната аквизиција врз конзистентноста на модели

Резултатите од третиот модел јасно ја потврдуваат оправданоста на комбинираниот пристап за аквизиција на просторни податоци. UAV-LiDAR обезбедува континуирана покриеност на кровните површини, горните делови на објектите и теренот и просторот во кој коегзистираат објектите. Истовремено, SLAM скенирањето ја компензира очекуваната слабост на облакот од точки добиен со UAV-LiDAR во скриени и „невидливи“ зони (долни фасадни појаси, под конзоли, тесни премини, делови блиску до вегетација). Практичниот придонес од оваа фузија не се сведува на „погуста геометрија“,

туку на значително подобрена читливост на објектите во критични зони за моделирање: рабови, конекции помеѓу елементи, отвори и детали во човечка висина.

Истовремено, третиот модел ја нагласува и методолошката чувствителност на SLAM-облаците од точки, можни локални деформации и акумулирано отклонување кај подолги траектории, што наметнува контролиран пристап при усогласување и квалитетна контрола во преклопните зони. Во овој случај, резултатите покажуваат дека со правилна регистрација, контролни точки и cloud-to-cloud регистрација, SLAM податоците може сигурно да се интегрираат со UAV-LiDAR и да се добие стабилен, геореференциран облак од точки. Ова е суштинско за применливост во реални сценарија, каде ретко постои „идеална“ видливост и униформна густина на точки.

8.3.3. Класификацијата на облакот од точки како предуслов за формирање на сеопфатен 3Д модел

Една од најзначајните разлики кај третиот модел е тоа што облакот од точки не е третиран само како извор за реконструкција на објекти, туку како извор на податоци за екстракција и генерирање на повеќе просторни тематски слоеви. Со примена на методи базирани на вештачка интелигенција и однапред тренирани модели, UAV-LiDAR облакот од точки е класифициран во соодветни класи (терен, објекти, вегетација, инфраструктура и сл.), со што директно се овозможува генерирање на дериватни модели и анализи: издвојување на теренски точки за формирање на DTM, формирање на DSM, пресметка на nDSM за висински показатели, како и создавање предуслови за понатамошна екстракција и моделирање на природни и антропогени елементи.

Важно е да се истакне дека квалитетот на класификацијата има „каскаден“ ефект врз целиот работен тек. Неправилно класифицирани точки во класата „терен“ не значат само локално отстапување во облакот од точки, туку можат да предизвикаат систематско нарушување на DTM, а преку него и на сите производи и анализи што се потпираат на висинската компонента: висините и волумените на LOD1 моделите на објектите, наклоните и профилите на патеките, како и просторните анализи каде висинската компонента е носечки параметар. Оттука, третиот модел јасно ја потврдува потребата класификацијата да се третира како важна фаза во обработката на облаците од точки во случај на сеопфатно моделирање на просторот.

8.3.4. Улогата на дигиталните висински модели

DTM во третиот модел има двојна улога: ја обезбедува висинската референтна рамка за позиционирање на објектите во комплексот и претставува подлога за анализа на пристапност, патеки и просторни односи со теренот. Резултатите укажуваат дека прецизниот DTM е клучен за да се избегнат типични проблеми кај 3Д модели во наклонет терен: „лебдење“ на објекти, „потонување“ на објекти во теренот или неосновани дисконтинуитети на контактната линија објект-терен.

DSM и nDSM дополнително ја прошируваат функционалноста на моделот: nDSM овозможува стабилна процена на висини над терен, што директно се користи и за LOD1 моделирање и за еколошки и инфраструктурни анализи (пример висина на вегетација во близина на енергетската инфраструктура). На тој начин, третиот модел покажува дека „теренот“ не е само контекст, туку интегрален дел од точноста и употребливоста на комплексниот 3Д систем.

8.3.5. Хибридно моделирање како практичен компромис со висока методолошка вредност

Еден од најважните резултати од третиот модел е потврдата дека различни нивоа на деталност можат да коегзистираат во единствен координатен и логички конзистентен просторен модел. Деталното BIM моделирање е применето селективно, за објект што е релевантен за анализата на функционални единици и 3Д катастар, додека останатите објекти се претставени како LOD1 волумени. Овој пристап е реалистичен од инженерска и институционална перспектива: целосно детално моделирање на сите објекти е често финансиски и временски неоправдано, но контекстот е неопходен за просторни анализи и за интерпретација на објектот во контекст на неговата околина.

Вредноста на LOD1 не е во геометриската деталност, туку во обезбедување на просторни односи на макро-ниво: позиција, ориентација, габарити, растојанија, сенчење, видливост и тополошка поставеност на објектите. На овој начин, третиот модел ја потврдува скалабилноста на методологијата: деталноста се распределува според потребата, без да се наруши оперативноста на целината.

8.3.6. BIM-GIS интеграција во функција на администрирање со недвижности

Интеграцијата преку IFC4 стандардот и креирањето GIS слоеви со 3Д геометрија покажуваат дека трансформацијата BIM→GIS може да биде повеќе од визуелизација: IfcSpace просториите се задржуваат како 3Д простори со можност за атрибутно поврзување, а IfcZone овозможува нивно логичко групирање во функционални целини. Можноста на GIS за поврзување на геометријата со атрибутна табела со податоци, ја демонстрира токму таа „оперативна страна“ на интеграцијата, во GIS се пренесуваат атрибути како површина, волумен, катност и идентификатори, што претставува основа за поврзување со останати бази на податоци за администрирање со недвижности.

Применливоста на интегрираниот модел за администрирање со недвижности не зависи само од тоа дали моделот може да се трансформира од BIM во GIS околина, туку и дали се задржуваат:

- семантичката структура (простори, зони, нивоа),
- единствени идентификатори (за следливост),
- геометриската валидност на телата (затворени волумени, стабилни граници), и
- можноста за просторни операции во GIS (пресек, селекција по атрибут, 3Д визуелизација и просторна анализа).

Овој модел покажува дека трансформацијата е успешна тогаш кога резултатот е „употреблив“, односно кога GIS слоевите се подготвени да станат дел од работен процес за управување со недвижности, а не само 3Д визуелизација.

8.3.7. Потенцијал за поврзување со LADM

Третиот модел ја потврдува логиката дека IfcSpace и IfcZone можат да послужат како мост кон LADM концептите. Двете функционални единици во избраниот објект се погодни за дискусија за тоа како во практика се моделираат административни целини кои имаат реални просторни граници и вертикални односи. Во селектираниот објект за BIM моделирање во оваа студија на случај, со делумно преклопени катови, токму 3Д

репрезентацијата станува неопходна за јасно дефинирање на границите и нивните релации, што е суштината на 3Д катастарот.

Може да се нагласи дека третиот модел не само што ја демонстрира техничката можност за поврзување, туку укажува на фактот дека сложените вертикални односи и функционалните поделби во рамки на еден објект, тешко можат недвосмислено да се претстават во 2Д репрезентација без ризик од интерпретативни грешки.

8.3.8. Наградба на моделот со дополнителни тематски слоеви (вегетација, енергетска инфраструктура, паркинџи)

Додадената вредност на третиот модел е во тоа што во интегрираната GIS компонентата се моделираат дополнителни тематски слоеви (вегетација, електрични столбови, електроководови, патеки, паркинџи) со што се надминува концептот на моделирање само на објектите од примарен интерес. Екстракцијата на дрва (со класифицирани стебла), електрични столбови и електроководови создава основа за проширена примена на моделот, како:

- процени на ризици (дрво-жица, жица-кров),
- мониторинг на вегетација и нејзин раст,
- планирање и одржување на инфраструктура,
- сценарија поврзани со безбедност и функционалност на комплексот.

Патеките извлечени од DTM и BIM моделирањето на паркинџот дополнуваат уште една практична димензија: пристапност, движење, логистика и управување со јавни и заеднички површини. Од овде може да се види еколошкиот и „животен циклус“ на моделот: геометријата станува основа за следење состојби и фактори, а не само за документарна репрезентација.

8.3.9. Ограничувања и заклучни согледувања

Иако резултатите ја потврдуваат применливоста на методологијата, третиот модел јасно ги истакнува и клучните ризици што треба да се контролираат во комплексни околинџи:

- Разлики меѓу UAV-LiDAR и SLAM облакот од точки. Поради различна перспектива, различна густина и можни SLAM деформации, потребна е внимателна контрола особено на фасадни зони каде двата извора се преклопуваат.
- Нееднаква густина на точки. UAV-LiDAR дава поуниформно покривање одозгора, додека SLAM дава локално густџи појасџи во пониските деловџи на објектите. Без редукција и сегментација, ова може да доведе до нерамномерна деталност на интерпретацијата при моделирањето.
- Вегетацијата и скриените зони создаваат празнинџи и шум во облакот од точки. Облаците од точки бараат прецизна обработка и класификација, особено за DTM, затоа што теренската површина е основа за сите следни просторни односи.
- Различно ниво на деталност во ист модел. Хибридниот пристап е практичен, но бара јасно дефинирани правила, кои анализи се дозволени на модел со LOD1, а за кои е потребно да се обезбеди модел со повисоко ниво на деталност.

Овие поуки се значајни затоа што ја поставуваат методологијата како реално применлива, но и ја дефинираат рамката на предуслови за успешна примена.

Третиот модел ја потврдува целосната методолошка рамка: од комбинирана аквизиција и фузија на облаци од точки, преку геореференцирање и обработка, до детално BIM моделирање, интеграција со GIS и извлекување на атрибути потребни за правно-административно поврзување. Најзначајната придобивка е демонстрацијата дека пристапот е применлив во реални комплексни сценарија, каде што се бара истовремено:

- прецизност на микро-ниво (простории, зони, волумени, преклопени катови) и
- просторна 3Д усогласеност во поширокиот контекст на макро-ниво (повеќе објекти, терен, вегетација, патеки, енергетска инфраструктура).

Сумирано, резултатите од третиот модел ја потврдуваат зрелоста на предложената методологија во услови на реална комплексност. Со ова, третиот модел не е само „уште една студија на случај“, туку аргумент дека методологијата е скалабилна и оперативна, може да се примени селективно (детално каде што е потребно, генерализирано каде што е доволно), да одржи просторна и семантичка конзистентност и да создаде основа за поврзување со административно-правни системи.

ЗАКЛУЧОК

Интегрираниот пристап кој го спојува ласерското скенирање со технологиите за моделирање BIM и GIS, претставува значаен напредок кој длабоко ги трансформира процесите на дигитална репрезентација и просторна анализа на недвижностите. Со имплементација на овој пристап успешно се решаваат ограничувањата и предизвиците со кои се соочуваат традиционалните дводимензионални катастарски системи, обезбедувајќи прецизно дефинирање на границите и јасна репрезентација на просторните односи, особено во сложени урбани средини и кај комплексни недвижности.

Применетата методологија врз студиите на случај демонстрира дека интегрираните податоци добиени од UAV-LiDAR и SLAM-LiDAR технологиите можат да бидат успешно имплементирани во создавањето на високо детални и прецизни дигитални близнаци на недвижностите. Интеграцијата со BIM обезбедува семантички богати и структурно конзистентни модели, додека GIS нуди просторен контекст и дополнителни аналитички можности. Овој интегриран пристап овозможува детална визуелизација, ефективно управување, оптимално планирање и законско регулирање на недвижностите. Сепак, за целосна реализација на потенцијалот на овие технологии неопходно е да се надминат бројните технички, организациски и правни предизвици. Интероперабилноста на податоците, стандардизацијата на форматите, воспоставувањето на единствени координатни системи и развојот на правни рамки за 3Д регистрација на правата на недвижностите се клучни фактори кои мора да бидат решени за успешна имплементација на интегрираниот пристап.

Резултатите од истражувањето јасно укажуваат дека интеграцијата на BIM и GIS не е само технички возможна, туку и неопходна за развој на современи 3Д катастарски системи. Овие системи имаат потенцијал значително да го подобрат управувањето со просторот, да ја зголемат правната сигурност и да придонесат кон поефикасно планирање и управување со инфраструктурата. Реализираните студии на случај покажаа дека предложената методологија овозможува ефикасно поврзување на BIM и GIS технологиите во еден интегриран и функционален тридимензионален систем за администрирање со недвижности. Преку имплементацијата на истражувачкиот процес се потврдува дека ваквиот пристап овозможува создавање на реална, прецизна и интероперабилна врска меѓу архитектонските и конструкциските податоци и просторните податоци.

Целите дефинирани во истражувањето се целосно исполнети. Постигната е и техничка и семантичка интеграција на BIM и GIS технологиите, со што е создаден унифициран методолошки пристап за обработка, конверзија и размена на податоци. Методологијата е успешно аплицирана на реални примери, што овозможува практична валидација на предложените чекори и техники. Дополнително, е потврдена применливоста на меѓународните стандарди, кои обезбедуваат интероперабилна размена на податоци меѓу различни системи и платформи.

Со ова се потврдува дека синергијата меѓу BIM и GIS не само што ја надминува традиционалната поделба на просторните податоци и модели на микро и на макро ниво, туку создава интегриран пристап кон управувањето со просторот во насока на целосна дигитална трансформација на системите за администрирање со недвижности.

Научниот придонес на ова истражување се состои во повеќе меѓусебно поврзани аспекти, кои заедно претставуваат оригинален и релевантен придонес во доменот на BIM-GIS интеграцијата и развојот на катастарските системи.

Истражувањето нуди методолошки разработен Scan-to-BIM пристап применет на реален, комплексен инфраструктурен објект со комбинирана намена. За разлика од доминантниот дел од постоечките истражувања, кои се фокусираат на станбени или едноставни објекти, оваа дисертација демонстрира дека Scan-to-BIM методологијата може успешно да се примени и кај надземни пешачки мостови со интегрирани комерцијални простори и сложена конструкција. Истражувањето исто така дава јасен концептуален и практичен придонес во поврзувањето на BIM моделите со LADM. Преку анализа на постоечката 2Д регистрација и предложениот 3Д модел, се покажува како BIM просторите (IfcSpace) можат да се интерпретираат како 3Д просторни единици (LA_SpatialUnit) и да се поврзат со соодветни административни единици (LA_BAUnit). Овој придонес е од особено значење за земји во кои 3Д катастарот сè уште не е формално имплементиран, но постои реална потреба од негово постепено воведување.

Дисертацијата придонесува кон унапредување на знаењата за правната и просторната интерпретација на внатрешни просторни единици, како што се деловните простори и затворените пешачки коридори. Истражувањето покажува дека овие простори можат да бидат јасно дефинирани и регистрирани само преку 3Д моделирање, со што се отвора можност за нивна недвосмислена правна идентификација и управување.

Значаен научен придонес претставува и демонстрацијата на BIM моделот како јадро на дигитален близнак за катастарски и урбанистички потреби. Истражувањето покажува дека BIM-GIS интеграцијата не е само технички процес на трансформација на податоци, туку суштински предуслов за современо управување со сложени недвижности, инфраструктура и урбан простор. На тој начин, дисертацијата придонесува кон пошироката научна и стручна дебата за дигитална трансформација на катастарските системи и нивна адаптација кон реалните просторни и правни предизвици на современите градови.

BIM-GIS интеграцијата во овој труд е анализирана не само како техничка конверзија на различни формати, туку како методолошка рамка за формирање единствен 3Д дигитален модел во кој се усогласуваат геометријата, семантиката, атрибутните податоци и просторната референца. Преку развиениот работен тек, од аквизиција на податоци, преку Scan-to-BIM моделирање, трансформација и имплементација во GIS околина, до евалуација преку студии на случај, добиени се резултати што овозможуваат аргументирана проверка на поставената теза и работните хипотези.

Главната теза, интеграцијата на BIM и GIS технологиите овозможува развој на конзистентен, тридимензионален, дигитален модел кој може да се користи како основа за изградба на современ систем за ефикасно управување со недвижностите, со валидирана просторна точност, атрибутна целовитост и интероперабилност на податоците, се потврдува, но со јасно дефинирани услови и граници. Истражувањето покажа дека е возможно да се формира модел што е истовремено: геометриски употреблив за 3Д интерпретација и анализа, просторно усогласен со релевантен координатен систем (со контролирана вертикална компонента), доволно семантички структуриран за да обезбеди пребарување, филтрирање и атрибутни врски и функционално интегриран со

просторниот контекст (терен, околни објекти, инфраструктура, природни елементи) на ниво потребно за администрирање со недвижностите и просторот.

Сепак, тезата не подразбира „автоматска“ беспрекорност на интеграцијата. Потврдата е резултат на методолошки дисциплиниран процес: внимателна подготовка на BIM моделот, избор на соодветни репрезентации, семантички класи и односи, контрола на топологијата и јасни правила за трансформација и проверка во GIS. Таму каде овие предуслови не се испочитувани, може да се појават проблеми како невалидни геометрии при трансформација, губење на просторни односи, неконзистентни атрибути и ограничена анализа. Оттука, тезата е потврдена како принцип и како практично остварлива основа, но под услов интеграцијата да се третира како системски работен тек со вградени механизми за контрола на квалитет.

Хипотеза 1: *Постојат конкретни технички и концептуални можности за поврзување на BIM и GIS околината преку усогласување на стандардите, геометриските репрезентации и атрибутивните структури.*

Хипотезата **се потврдува**. Практичната реализација покажа дека интероперабилноста може да се постигне преку комбинирање на: стандарден BIM формат (IFC) како носител на објектна семантика и геометрија, GIS механизми за 3D регистрација, визуелизација и просторни операции и правила на мапирање за атрибутивна конзистентност (идентификатори, класи, типови, својства). Клучно е што „усогласувањето“ не е само техничко (формати), туку и концептуално: BIM логиката на елементи и односи мора да се преведе во GIS логика на просторни објекти со атрибути и тополошки релации. Истражувањето утврди дека тоа е изводливо и репродуктивно, доколку се дефинираат јасни правила за избор на репрезентација и ниво на деталност што GIS може стабилно да го одржи.

Хипотеза 2: *Примената на ласерско скенирање (LiDAR и SLAM) и Scan-to-BIM методологиите овозможува креирање на прецизни 3D BIM модели кои можат да се интегрираат во GIS системи со минимални загуби на податоци и структури.*

Хипотезата **се потврдува делумно**. Од една страна, аквизицијата со ласерско скенирање создава доволно богата геометријска основа за as-is BIM моделирање и за постигнување просторна контрола што е релевантна за катастарски и урбанистички сценарија. Од друга страна, „минимални загуби“ не се универзално дефинирани.

Во студиите на случај интеграцијата покажа висока стабилност за примарните архитектонски и конструктивни елементи и просторно-логичките единици (простории, зони), додека најголеми предизвици се јавуваат кај ситни архитектонски детали, комплексни фасадни структури и неструктурирани елементи што не се типично катастарски релевантни. Оттука, заклучокот е дека Scan-to-BIM пристапот е адекватен и практично употреблив како основа за BIM-GIS интеграција, но бара јасно дефинирање на целното ниво на деталност и критериуми за тоа што се смета за „загуба“ во однос на намената на моделот.

Хипотеза 3: *Постои потреба за проширување или адаптација на постојните формати и стандарди (IFC, CityGML, LADM) за да се овозможи беспрекорна размена на податоци и изградба на интероперабилен 3D катастарски систем.*

Хипотезата *се потврдува*. Истражувањето покажа дека постојните стандарди се силни во сопствените домени, но се појавуваат „празнини“ во нивните пресечни точки:

- IFC е богат за BIM семантика и детална геометрија, но не е оптимизиран за GIS анализа и поширок просторен контекст,
- CityGML е ориентиран кон модел на урбана средина и просторен контекст, но во пракса често не го задржува целосниот BIM капацитет за внатрешни просторни единици и инженерски односи без дополнителни правила,
- LADM обезбедува концептуална рамка за права, ограничувања и одговорности, но бара внимателно поврзување со 3Д физичката репрезентација за да се добие функционална 3Д просторна единица.

Поради тоа, „беспрекорноста“ не се постигнува само со користење на стандарди, туку со адаптација преку шеми на мапирање и правилници за имплементација (на пр., дефинирање на стабилни идентификатори, правила за трансформација на просторни единици и врски меѓу правните ентитети и 3Д геометријата).

Хипотеза 4: Интегрираниот BIM-GIS модел овозможува идеална визуелизација, анализа и управување со правните, техничките и геометриските аспекти на недвижностите во споредба со традиционалните катастарски решенија.

Хипотезата *се потврдува*. Во споредба со 2Д катастарски пристап, интегрираниот модел обезбедува суштинска додадена вредност во три насоки:

- експлицитна 3Д просторна дефинираност (волумени, вертикални преклопувања, просторни релации меѓу единици),
- поврзување на правни податоци со физичкиот објект (правото се поврзува со просторната единица, наместо да остане само табеларен запис),
- контекстуална анализа (влијанието на теренот, инфраструктурата и околината врз користење, пристапност, ограничувања и управување).

Ова не е само визуелен напредок, тоа е функционален напредок затоа што овозможува сценарија што 2Д системите тешко ги поддржуваат: проверка на преклопувања, анализа на пристап, просторни ограничувања поврзани со инфраструктура, како и појасна комуникација меѓу институции и сопственици.

Хипотеза 5: Примената на такаов систем е особено погодна за урбани средини со сложени сопственички односи и вертикална организација на просторот (пример, згради на повеќе нивоа со повеќе сопственици, подземна и надземна инфраструктура и слично), при што се подобрува правната сигурност и транспарентноста.

Хипотезата *се потврдува делумно*, со јасен аргумент за потенцијал и со идентификувани предуслови за реална институционална примена. Истражувањето покажа дека интегрираните 3Д модели најмногу добиваат на значење таму каде 2Д регистрацијата е недоволна: повеќекатни објекти со повеќе сопственици, комплицирани заеднички делови, и коегзистенција на надземна и подземна инфраструктура. Во тие случаи, 3Д репрезентацијата го намалува просторот за двосмисленост и олеснува транспарентна интерпретација на граници и права.

Сепак, „подобрување на правната сигурност“ не зависи само од моделот како техничка можност, туку и од: правно-нормативна рамка што признава 3Д единици и нивни правила на дефинирање, институционални процедури за ажурирање и одржување и

стандардизиран начин на поврзување со официјални регистри. Затоа, хипотезата се потврдува во доменот на техничко-информациска транспарентност и аналитичка поддршка, а како целосна правна имплементација се потврдува како насока што бара дополнителни системски чекори надвор од рамките на ова истражување.

Сумирано, тезата и хипотезите главно се потврдени, при што најсилната потврда се однесува на методолошката остварливост на BIM-GIS интеграцијата и на нејзината аналитичка и управувачка вредност во 3Д. Делумната потврда кај одредени хипотези произлегува не од слабост на концептот, туку од реалните ограничувања на интероперабилноста во пракса и од фактот дека катастарот е истовремено технички и институционално-правен систем. Токму затоа, најзначајниот придонес на истражувањето е што ја демонстрира BIM-GIS интеграцијата како „елемент за конекција“ што може да ги поврзе физичкиот објект, просторниот контекст и правните информации во кохерентен 3Д модел, и истовремено ги идентификува точките каде се потребни правила и надградби на постојните стандарди.

Врз основа на овие заклучоци, се наметнува насока за понатамошна работа: формализирање на правила за мапирање кон LADM (со јасни типови 3Д катастарски единици), дефинирање на стандарден минимален сет на атрибути и идентификатори за одржување на врските BIM-GIS-права врз недвижностите, како и тестирање на моделот во пошироки институционални сценарија (ажурирање, верзионирање и правна валидација). Со тоа, истражувањето не само што ги потврдува поставените научни тврдења, туку и поставува практично применлива основа за развој на интероперабилни 3Д системи за управување со недвижностите и просторот во современи урбани услови.

Идните истражувања треба да се фокусираат на понатамошен развој на овие технологии, особено со примена на вештачка интелигенција, *cloud computing* и проширена реалност, кои дополнително ќе ги зголемат можностите за автоматизација, ефикасност и точност на овие системи. Ова ќе овозможи нивна поширока примена во пракса и ќе придонесе за поефикасно администрирање со недвижностите.

Како идни насоки, истражувањето препорачува дополнително усовршување на методологијата преку имплементација на автоматизирани алатки базирани на вештачка интелигенција (AI), кои ќе овозможат препознавање и моделирање на елементи со минимална човечка интервенција. Дополнително, се препорачува развој на национален прототип за 3Д катастар базиран на BIM-GIS интеграција, кој би претставувал модел за идно системско решение на национално ниво. Како клучен технолошки правец се посочува и користењето на cloud-based платформи и дигитални близнаци, преку кои би се овозможило ажурирање на просторните податоци во реално време и нивно користење во процесите на управување со недвижности, урбанистичко планирање и инфраструктурен развој.

Имајќи ја предвид динамиката на технолошкиот развој, еволуцијата на меѓународните стандарди и комплексноста на правно-просторните односи во урбаните средини, резултатите од оваа дисертација отвораат повеќе конкретни насоки за понатамошни истражувања.

Првата насока се однесува на унапредување на методологијата за автоматска екстракција на геометриски и семантички информации од облаци од точки добиени со LiDAR и SLAM технологии. Идните истражувања може да се фокусираат на примена на

алгоритми за машинско учење и *deep learning* за автоматска сегментација на ентериерни и екстериерни простори, препознавање на конструктивни елементи и автоматско генерирање на параметарски BIM-елементи. Овој пристап би придонел кон намалување на субјективноста во Scan-to-BIM процесот и би ја зголемил репродуктивноста на резултатите, што е од суштинско значење за институционална примена во катастарски системи.

Втората насока се однесува на понатамошно продлабочување на интероперабилноста помеѓу BIM и GIS преку формализирано поврзување на ентитетите од IFC кон CityGML и нивно усогласување со концептуалниот модел на ISO 19152. Иако во рамки на ова истражување е демонстрирана можноста за трансформација на IFC-податоци во просторна база на податоци погодна за 3Д катастарски апликации, потребни се дополнителни анализи за автоматизирано генерирање на LADM-класи (LA_SpatialUnit, LA_BAUnit, LA_RRR) директно од семантички структурирани BIM-модели. Особено предизвикувачка област претставува формализацијата на правните волумени (legal spaces) во BIM-околина и нивното пренесување во GIS со задржување на тополошката конзистентност и правната валидност.

Трета насока за истражување претставува анализа на точноста и доверливоста на различни технологии за просторна аквизиција во контекст на 3Д катастар. Иако во дисертацијата е спроведена статистичка евалуација на BIM-моделите во однос на класичен геодетски пример, идните студии може да вклучат компаративна анализа помеѓу UAV-LiDAR, мобилно и статичко ласерско скенирање, со фокус на дефинирање на прифатливи толеранции за правна регистрација на 3Д просторни единици. Ваквите анализи би придонеле кон воспоставување на национални технички упатства и стандарди за 3Д катастарска регистрација.

Дополнително, значајна насока претставува интеграцијата на моделите од 3Д катастарските системи со концептот на дигитален близинак (Digital Twin) на урбани средини. Поврзувањето на BIM-GIS моделите со динамички податоци (сензори, енергетска потрошувачка, управување со инфраструктура) отвора можности за мултифункционална употреба на катастарските податоци, не само за правна сигурност, туку и за урбанистичко планирање, управување со ризици и одржлив развој.

Понатаму, идните истражувања треба да се насочат кон институционалниот и правниот аспект на имплементација на 3Д катастар. Прашања како што се правната дефиниција на просторен волумен, регистрирањето на преклопени права, како и процедурите за ажурирање на податоците по реконструкции или надградби, бараат интердисциплинарен пристап кој ги обединува геодетските, правните и информатичките науки. Особено значајно е усогласувањето на националната законска регулатива со принципите на LADM и европските иницијативи за дигитализација на просторно-правните системи.

Во контекст на одржливост и климатски предизвици, идните истражувања може да ја разгледаат можноста за интеграција на BIM-GIS моделите со анализи на енергетска ефикасност, соларен потенцијал и управување со урбана инфраструктура. Имајќи предвид дека дисертацијата веќе демонстрира интеграција на просторни и семантички

податоци, логичен чекор е нивна примена за поддршка на политики за обновливи извори на енергија и одржливо урбано планирање.

Се препорачува да се развијат прототип-системи и пилот-проекти во соработка со надлежните институции (Агенцијата за катастар на недвижности), со цел тестирање на предложената методологија во реална административна средина. Ваквите пилот-имплементации ќе овозможат евалуација на перформансите, идентификација на оперативни предизвици и дефинирање на чекори за постепена транзиција од 2Д кон функционален 3Д катастарски систем.

Сумирано, идните истражувања треба да се движат во насока на техничка автоматизација, стандардизација, правна валидност и институционална применливост на BIM-GIS интегрираните модели. Само преку ваков холистички пристап може да се обезбеди одржлив, интероперабилен и правно сигурен 3Д катастар кој ќе одговори на современите просторни и општествени потреби.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alattas, A., Kalogianni, E., Alzahrani, T., Zlatanova, S., & van Oosterom, P. (2021). Mapping private, common, and exclusive common spaces in buildings from BIM/IFC to LADM: A case study from Saudi Arabia. *Land Use Policy*, 104, 105355.
- [2] Alotaibi, B. S., Waqar, A., Radu, D., Khan, A. M., Dodo, Y., Althoey, F., & Almujiabah, H. (2024). Building information modeling (BIM) adoption for enhanced legal and contractual management in construction projects. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(7), 102822.
- [3] Arroyo Ogori, K., Diakité, A., Krijnen, T., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). Processing BIM and GIS models in practice: Experiences and recommendations from a GeoBIM project in the Netherlands. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), Article 311.
- [4] Aryan, A., Bosché, F., & Tang, P. (2021). Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. *Automation in Construction*, 125, 103551.
- [5] Atazadeh, B., Kalantari, M., Rajabifard, A., Ho, S., & Ngo, T. (2017). Building information modelling for high-rise land administration. *Transactions in GIS*, 21(1), 91-113.
- [6] 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.
- [7] Barber, D., Mills, J., & Smith-Voysey, S. (2008). Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1), 128-141.
- [8] Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820.
- [9] Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256.
- [10] Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML Application Domain Extension (ADE): Overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 13.
- [11] Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25-37.
- [12] Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., & Vosselman, G. (2016). The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 42-54.
- [13] Biljecki, F., Lim, J., Crawford, J., Moraru, D., Tauscher, H., Konde, A., Adouane, K., Lawrence, S., Janssen, P., & Stouffs, R. (2021). Extending CityGML for IFC-sourced 3D city models. *Automation in Construction*, 121, Article 103440.
- [14] Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., &   ltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842-2889.
- [15] Biljecki, F., Zhao, J., Stoter, J., & Ledoux, H. (2013). Revisiting the concept of level of detail in 3D city modelling. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-2/W1, 63-74.
- [16] BIMForum. (2024). *Level of Development Specification: Part I (Version 2024)*. BIMForum.

- [17] BIMForum. (2025). *Level of Development (LOD) Specification*. BIMForum.
- [18] Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, Article 103179.
- [19] Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (Eds.). (2018). *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Springer.
- [20] Bosché, F. (2012). Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 90-102.
- [21] buildingSMART International. (n.d.). *Industry Foundation Classes (IFC)*. buildingSMART International.
- [22] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- [23] Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., & Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309-1332.
- [24] Chrbolková, A., Štroner, M., Urban, R., Michal, O., Křemen, T., & Braun, J. (2025). A Comparative Study of Indoor Accuracies Between SLAM and Static Scanners. *Applied Sciences*, 15(14), 8053.
- [25] Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- [26] Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429.
- [27] Diakité, A. A., & Zlatanova, S. (2020). Automatic geo-referencing of BIM in GIS environments using building footprints. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80, 101453.
- [28] Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., & Stoter, J. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547-569.
- [29] Eastman, C. M. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*, 63(3), 46-50.
- [30] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.
- [31] El-Mekawy, M., Östman, A., & Hijazi, I. (2012). A unified building model for 3D urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2), 120-145.
- [32] El-Mekawy, M., Östman, A., & Hijazi, I. (2012). An evaluation of IFC-CityGML unidirectional conversion. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(5), 159-171.
- [33] Floros, G. S., Ruff, P., & Ellul, C. (2020). Impact of information management during design & construction on downstream BIM-GIS interoperability for rail infrastructure. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VI-4/W1-2020, 61-68.

- [34] Gallaher, M. P., O'Connor, A. C., Dettbarn, J. L., Jr., & Gilday, L. T. (2004). *Cost analysis of inadequate interoperability in the U.S. capital facilities industry* (NIST GCR 04-867). National Institute of Standards and Technology.
- [35] Gharebaghi, A., Mostafavi, M. A., Larouche, C., Esmaeili, K., & Genon, M. (2021). Precise indoor localization and mapping using mobile laser scanners: A scoping review. *Geomatica*, 75(4), 1-13.
- [36] Gielsdorf, F., Rietdorf, A., & Gruendig, L. (2004). A concept for the calibration of terrestrial laser scanners. In *Proceedings of the FIG Working Week 2004 (Athens, Greece, May 22-27, 2004)*. International Federation of Surveyors (FIG).
- [37] Gjorgjiev, V., Gjorgjiev, G., & Malijanska, N. (2019). *From point cloud to 3D building model*. Scientific Journal of Civil Engineering, 8(1).
- [38] Goodchild, M. F. (1992). Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1), 31-45.
- [39] Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33.
- [40] Grzelka, K., Pargieła, K., Jasińska, A., Warchoń, A., & Bydłosz, J. (2024). Registration of objects for 3D cadastre: An integrated approach. *Land*, 13(12), 2070.
- [41] Hajji, R., Yaagoubi, R., Meliana, I., Laafou, I., & Gholabzouri, A. E. (2021). Development of an integrated BIM-3D GIS approach for 3D cadastre in Morocco. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 351.
- [42] Huisman, O., & de By, R. A. (Eds.). (2009). *Principles of geographic information systems: An introductory textbook (4th ed.)*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).
- [43] International Organization for Standardization. (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* (ISO Standard No. 19650-1:2018). ISO.
- [44] International Organization for Standardization. (2021). *Geographic information - BIM to GIS conceptual mapping (B2GM)* (ISO Technical Specification No. 19166:2021). ISO.
- [45] International Organization for Standardization. (2021). *GIS (geospatial) / BIM interoperability* (ISO Technical Report No. 23262:2021). ISO.
- [46] International Organization for Standardization. (2024). *Geographic information - Land Administration Domain Model (LADM) - Part 1: Generic conceptual model* (ISO Standard No. 19152-1:2024). ISO.
- [47] International Organization for Standardization. (2024). *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema* (ISO Standard No. 16739-1:2024). ISO.
- [48] International Organization for Standardization. (2025). *Geographic information - Building information modelling (BIM) to geographic information systems (GIS) conceptual mapping (B2GM)* (ISO Technical Specification No. 19166:2025). ISO.

- [49] International Organization for Standardization. (2025). *Geographic information - Land Administration Domain Model (LADM) - Part 2: Land registration* (ISO Standard No. 19152-2:2025). ISO.
- [50] Isikdag, U., & Zlatanova, S. (2009). Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using building information models. In J. Lee & S. Zlatanova (Eds.), *3D geo-information sciences* (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp. 79-96). Springer.
- [51] ISO/IEC/IEEE. (2017). *Systems and software engineering-Vocabulary* (ISO/IEC/IEEE 24765:2017). International Organization for Standardization.
- [52] Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R., & Billen, R. (2023). Digital twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103440.
- [53] Kalogianni, E., van Oosterom, P., Dimopoulou, E., & Lemmen, C. (2020). 3D land administration: A review and a future vision in the context of the spatial development lifecycle. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 107.
- [54] Kang, T. W., & Hong, C. H. (2018). IFC-CityGML LOD mapping automation using multiprocessing-based screen-buffer scanning including mapping rule. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 373-383.
- [55] Kealy, A., Retscher, G., Grejner-Brzezinska, D., Gikas, V., & Roberts, G. (2011). Evaluating the performance of MEMS-based inertial navigation sensors for land mobile mapping applications. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2011)*, Cracow, Poland.
- [56] Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE Access*, 7, 147406-147419.
- [57] Kim, G., & Kim, A. (2018). Scan context: Egocentric spatial descriptor for place recognition within 3D point cloud map. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 4802-4809).
- [58] Koeva, M., Nikoohemat, S., Oude Elberink, S., Morales, J., Lemmen, C., & Zevenbergen, J. (2019). Towards 3D Indoor Cadastre Based on Change Detection from Point Clouds. *Remote Sensing*, 11(17), 1972.
- [59] Kolbe, T. H. (2009). Representing and exchanging 3D city models with CityGML. In J. Lee & S. Zlatanova (Eds.), *3D Geo-Information Sciences* (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography) (pp. 15-31). Springer.
- [60] Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, 12(9), 11712-11733.
- [61] Kutzner, T., Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2020). CityGML 3.0: New functions open up new applications. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 43-61.
- [62] Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., & Wiechert, A. (2010). Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(10), 1123-1134.

- [63] Ledoux, H., Arroyo Ohori, K., Kumar, K., Dukai, B., Labetski, A., & Vitalis, S. (2019). CityJSON: A compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), Article 4.
- [64] Lee, H., Lee, J.-K., Park, S., & Kim, I. (2016). Translating building legislation into a computer-executable format for evaluating building permit requirements. *Automation in Construction*, 71, 49-61.
- [65] Lemmen, C., van Oosterom, P., & Bennett, R. (2015). The Land Administration Domain Model. *Land Use Policy*, 49, 535-545.
- [66] Leonard, J. J., & Durrant-Whyte, H. F. (1991). Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '91)* (Vol. 3, pp. 1442-1447).
- [67] Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J. C. P., Li, X., & Liu, R. (2017). A state-of-the-art review on the integration of building information modeling (BIM) and geographic information system (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53.
- [68] Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographic Information Systems and Science* (2nd ed.). Wiley.
- [69] Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [70] Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017). From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings. *Applied Sciences*, 7(10), 1030.
- [71] National Institute of Building Sciences. (2015). *National BIM Standard-United States Version 3: Terms and definitions*. buildingSMART alliance.
- [72] Noardo, F., Arroyo Ohori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Harrie, L., Krijnen, T., Kokla, M., & Stoter, J. (2020). The ISPRS-EuroSDR GeoBIM benchmark 2019. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5-2020, 227-233.
- [73] Noardo, F., Ellul, C., Harrie, L., Overland, I., Shariat, M., Arroyo Ohori, K., & Stoter, J. (2020). Opportunities and challenges for GeoBIM in Europe: Developing a building permits use-case to raise awareness and examine technical interoperability challenges. *Journal of Spatial Science*, 65(2), 209-233.
- [74] Noardo, F., Harrie, L., Arroyo Ohori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., Eriksson, H., Guler, D., Hintz, D., Jadidi, M. A., Pla, M., Sanchez, S., Soini, V.-P., Stouffs, R., Tekavec, J., & Stoter, J. (2020). Tools for BIM-GIS integration (IFC georeferencing and conversions): Results from the GeoBIM benchmark 2019. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 502.
- [75] Nouvel, R., Zirak, M., Coors, V., & Eicker, U. (2017). The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 68-80.
- [76] Open Geospatial Consortium. (2021). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard (Version 3.0, OGC Doc. No. 20-010)*. Open Geospatial Consortium.

- [77] Pepe, M., Costantino, D., Alfio, V. S., Garofalo Restuccia, A., & Papalino, N. M. (2021). Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*, 50, 115-125.
- [78] Petronijević, M., Višnjevac, N., Praščević, N., & Bajat, B. (2021). The extension of IFC for supporting 3D cadastre LADM geometry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 297.
- [79] Previtali, M., Díaz-Vilariño, L., & Scaioni, M. (2018). Indoor Building Reconstruction from Occluded Point Clouds Using Graph-Cut and Ray-Tracing. *Applied Sciences*, 8(9), 1529.
- [80] Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127-2145.
- [81] Rashidan, H., Abdul Rahman, A., & Sani, M. J. (2021). Converting BIM Data to CityGML for 3D Cadastre Purposes. In *Proceedings of the 7th International FIG 3D Cadastre Workshop (New York, 11-13 October 2021)*.
- [82] 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 (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- [83] Sandberg, H. (2003). Three-dimensional partition and registration of subsurface space. *Israel Law Review*, 37(1), 119-167.
- [84] Sani, M. J., & Abdul Rahman, A. (2018). GIS and BIM integration at data level: A review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9, 299-306.
- [85] Scaramuzza, D., & Siegwart, R. (2008). Appearance-guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5), 1015-1026.
- [86] Schaer, P., Skaloud, J., Landtwing, S., & Legat, K. (2007). Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2007)*, Padova, Italy.
- [87] Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing (2nd ed.)*. CRC Press.
- [88] Shojaei, D., Rajabifard, A., Kalantari, M., Bishop, I. D., & Aien, A. (2015). Design and development of a web-based 3D cadastral visualisation prototype. *International Journal of Digital Earth*, 8(7), 538-557.
- [89] Solihin, W., & Eastman, C. (2015). Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*, 53, 69-82.
- [90] Song, Y., Wang, X., Tan, Y., Wu, P., Sutrisna, M., Cheng, J. C. P., & Hampson, K. (2017). Trends and opportunities of BIM-GIS integration in the architecture, engineering and construction industry: A review from a spatio-temporal statistical perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 397.
- [91] Soudarissanane, S. S. (2016). *The geometry of terrestrial laser scanning: Identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry* (Doctoral thesis, Delft University of Technology).

- [92] Stoter, J. E. (2004). *3D cadastre* (Doctoral dissertation, Delft University of Technology). Delft, The Netherlands: Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG). (Publications on Geodesy, 57).
- [93] Stoter, J. E., & van Oosterom, P. J. M. (2006). *3D cadastre in an international context: Legal, organizational and technological aspects*. CRC Press.
- [94] Stoter, J., Ploeger, H., Louwman, W., van Oosterom, P., & Wunsch, B. (2011). Registration of 3D situations in land administration in the Netherlands. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on 3D Cadastres (Delft, The Netherlands, 16-18 November 2011)*.
- [95] Stoter, J., Ploeger, H., Roes, R., van der Riet, E., Biljecki, F., Ledoux, H., Kok, D., & Kim, S. (2017). Registration of multi-level property rights in 3D in The Netherlands: Two cases and next steps in further implementation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(6), 158.
- [96] Stouffs, R., Tauscher, H., & Biljecki, F. (2018). Achieving complete and near-lossless conversion from IFC to CityGML. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 355.
- [97] Su, S., Zhong, R. Y., & Jiang, Y. (2022). Digital twin and its applications in the construction industry: A state-of-the-art systematic review. *Digital Twin*, 2, Article 15.
- [98] Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375.
- [99] Sun, J., Mi, S., Olsson, P.-O., Paulsson, J., & Harrie, L. (2019). Utilizing BIM and GIS for representation and visualization of 3D cadastre. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(11), 503-527.
- [100] Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7), 829-843.
- [101] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. The MIT Press.
- [102] Tomlinson, R. F. (1968). *A geographic information system for regional planning*. CSIRO.
- [103] Turner, E., & Zakhor, A. (2014). Floor plan generation and room labeling of indoor environments from laser range data. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2014, Vol. 1)* (pp. 22-33).
- [104] van Oosterom, P. J. M. (2009). Research and development in geo-information generalisation and multiple representation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(5), 303-310.
- [105] van Oosterom, P., Lemmen, C., Thompson, R., Janečka, K., & Zlatanova, S. (2013). ISO 19152:2012 land administration domain model (LADM). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(4), 972-1003.
- [106] 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.
- [107] Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Eds.). (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.
- [108] Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4(6), 1519-1543.

- [109] Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41-52.
- [110] Zeiler, M. (1999). *Modeling our world: The ESRI guide to geodatabase design*. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- [111] Zhang, J., & Singh, S. (2014). LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems X (RSS 2014)*. Robotics: Science and Systems Foundation.
- [112] Zhao, L., Liu, Z., & Mbachu, J. (2019). An integrated BIM-GIS method for planning of water distribution system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8), Article 331.
- [113] Zhou, Y., Pang, Y., Chen, F., & Zhang, Y. (2020). Three-dimensional indoor fire evacuation routing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), Article 558.
- [114] Zhu, J., & Wu, P. (2022). BIM/GIS data integration from the perspective of information flow. *Automation in Construction*, 136, 104166.
- [115] Zlatanova, S., Yan, J., Wang, Y., Diakité, A., Isikdag, U., Sithole, G., & Barton, J. (2020). Spaces in spatial science and urban applications-State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), Article 58.