



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



Наташа Томе Малијанска Андреевска

**ПРИНЦИПИ И ОКОЛИНИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА ВIM 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 ВМ И GIS ДОМЕНИТЕ 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:

Наташа Томе Малијанска Андреевска

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 еден 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 на прецизна просторна репрезентација на комплекси 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 подржува 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

Natasha Tome Malijanska Andreevska

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 environments. Buildings and complex structures, underground and aboveground infrastructure, which are built to meet the needs of increasingly populated urban environments, often overlap at different height levels, and generate complicated spatial relationships. For the sustainable development of urban areas, it is of great importance to establish an integrated system in the 3D space that will contain all the necessary spatial and attribute data to make the right decisions during planning, designing, building, maintaining, and managing the facilities and urban environment. BIM (Building Information Modelling) and GIS (Geographic Information System) are technologies used in digital 3D modelling at two different levels. 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 environments.

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, which enables a clear demarcation and representation of spatial units and their legal relations, as well as their structuring in GIS-based spatial databases as support for 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 глабока благодарносии изразувам до мојоии мениор, ѓроф. д-р Ванчо Ѓорѓиев, за неѓовоии долгорочна ѓосвеиеносии и конииинуирано мениорсииво од самооии ѓочееиок на моеиио академско образование. Неѓовоиио сииручно водсииво, иииреливосии и искрена ѓоддршка ирееисииавуваа основа за мојоии ѓрофесионален и личен развој, надминувајќи ја рамкаииа на формалнаииа академска улога и ирераснувајќи во висииинско живоиино мениорсииво.

Посебна благодарносии уииаииувам до ѓроф. д-р Ѓорѓи Ѓорѓиев за несебичнаииа ѓоддршка, консиирукиииивнииие советии и охрабрувањеиио во ииекоии на израбоиикаииа на докѓиорскиоии ииируд. Неѓовоиио анѓажман и безрезервна сорабоиика значајно иииридонесоа за квалиииеиоии и усѓешнаииа реализаиија на исѓиражувањеиио.

Најголема благодарносии изразувам до моиие родиииели Елена и Томе, мојаииа сесѓира Емилија, мојаииа внука Лана, а особено до мојоии соѓруѓ Андреј, за разбирањеиио, ииирѓениеиио и ѓосѓиојанаииа ѓоддршка во иериодоии на израбоиикаииа на докѓиорскиоии ииируд. Нивнаииа доверба и охрабрување беа моја силна моѓиваиија и значајна иииикреѓа во секоја фаза од овој ииироцес.

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

Своерачен потпис на докторандот,

м-р Наташа Малијанска Андреевска

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

Потпис на авторот, с.р.

м-р Наташа Малијанска Андреевска

СОДРЖИНА

Вовед	14
Предмет на истражување	15
Цели на истражувањето	15
Образложение на работните хипотези и тези.....	16
Краток опис на содржината	17
Научни методи кои се применети	20
Очекуван научен придонес	21
Примена на резултатите од истражувањето	22
1. Преглед на достигнувањата во научно-истражувачката област.....	24
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.....	39
2.1.4. Ниво на развој во BIM (Level of Development - LOD)	41
2.1.5. Ограничувања и предизвици на BIM	44
2.2. GIS (Geographic Information System)	45
2.2.1. Основни принципи на GIS	45
2.2.2. Архитектура и структура на GIS.....	46
2.2.3. Типови на податоци во GIS.....	46
2.2.4. Ниво на деталност (Level of Detail) во GIS.....	47
2.2.5. Ограничувања и предизвици на GIS.....	48
2.3. Споредбена анализа на BIM и GIS	48
3. Стандарди и техники за интеграција на BIM и GIS	54
3.1. Интероперабилност во BIM-GIS интеграција.....	54
3.2. Улога на стандардите во BIM-GIS интеграцијата	57
3.3. IFC како основен BIM стандард за BIM-GIS интеграција	58
3.4. CityGML како основен GIS стандард за 3Д модели на урбани средини во BIM-GIS интеграција...	60
3.5. Техники за BIM-GIS интеграција	62
3.5.1. Техники за трансформација и конверзија на податоци - податочно ниво (data-level).....	66
3.5.2. Техники базирани на модели и правила за семантичко усогласување (semantic-level).....	68
3.5.3. Техники за системска/сервисна интеграција (system/service-level)	68
4. Домени на примена на интегриран BIM-GIS систем.....	70
4.1. Просторно и урбанистичко планирање.....	71
4.2. Планирање и управување со инфраструктура	72
4.3. Симулации и анализа на перформанси.....	73
4.4. Дигитални близнаци (Digital Twins).....	73

4.4.1.	Дигитален близнак на објект	74
4.4.2.	Дигитален близнак на град	75
4.5.	3Д катастар	76
4.5.1.	Римскоправните начела и нивното влијание врз разграничувањето на сопственичките права 76	
4.5.2.	Последици од примената на superficies solo cedit	78
4.5.3.	Пристапи за регистрација на комплексни 3Д ситуации	82
5.	Аквизиција на просторни податоци за 3Д моделирање	87
5.1.	Ласерска технологија за аквизиција на просторни податоци	87
5.2.	Системи за ласерско скенирање	87
5.2.1.	Основни компоненти на еден ласерски скенер и начин на пресметување на координати на поединечни точки	89
5.2.2.	Механички систем за скенирање	90
5.2.3.	Терестрички ласерски скенер (TLS)	92
5.2.4.	Мобилни ласерски скенери (MMS)	95
5.2.5.	Авионско ласерско скенирање (ALS)	97
5.2.6.	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)	100
6.	Методологија за интегрирање на BIM и GIS	106
6.1.	Аквизиција на просторни податоци	109
6.1.1.	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)	109
6.1.2.	TLS (Terrestrial Laser Scanning)	114
6.1.3.	UAV-LiDAR (Unmanned Aircraft System-Light Detection and Ranging)	117
6.2.	Процесирање и интеграција на облаците од точки	120
6.2.1.	Карактеристики на обработката за различни извори на податоци	121
6.2.2.	Претпроцесирање и филтрирање на шум	121
6.2.3.	Внатрешна регистрација на SLAM облаците (ентериер и габарит)	122
6.2.4.	Геореференцирање на SLAM моделот кон глобален координатен систем	123
6.2.5.	Интеграција на SLAM и UAV-LiDAR облаците и контрола на квалитет	124
6.2.6.	Интегрирање на SLAM облак за ентериер и габарит со UAV-LiDAR	124
6.3.	Креирање на BIM модели	125
6.3.1.	Параметарско моделирање и интелигентни објекти	125
6.3.2.	Инкорпорирање на интегриран облак од точки во BIM околина и подготовка за моделирање 126	
6.3.3.	Реконструкција на архитектонски и конструктивни елементи	128
6.3.4.	Геометриска валидација и тополошка конзистентност	130
6.3.5.	Подготовка на BIM моделот за GIS трансформација	132
6.4.	Интеграција на BIM и GIS	134
6.4.1.	Трансформација на BIM во GIS	134
6.4.2.	Раслојување, структурирање и семантичка трансформација	135

6.4.3.	Пристапи на конверзија од IFC во GIS.....	136
6.4.4.	Интеграција на BIM, GIS и LADM	146
7.	Студии на случај	148
7.1.	Модел 1 - 3Д модел на стан во станбено-деловна зграда	148
7.1.1.	Аквизиција на просторни податоци	149
7.1.2.	Процесирање на облаци од точки.....	150
7.1.3.	Креирање на BIM модел	152
7.1.4.	Евалуација и валидација на моделот.....	157
7.2.	Модел 2 - 3Д модел на пешачки мост „Влајко“	162
7.2.1.	Аквизиција на просторни податоци	165
7.2.2.	Процесирање на облаци од точки.....	167
7.2.3.	Креирање на BIM модел	169
7.2.4.	Интеграција на BIM и GIS.....	171
7.2.5.	Евалуација и валидација на моделот.....	177
7.3.	Модел 3 - 3Д модел на хотелски комплекс	186
7.3.1.	Аквизиција на просторни податоци	188
7.3.2.	Процесирање на облаци од точки.....	190
7.3.3.	Креирање на BIM модел	193
7.3.4.	Интеграција на BIM и GIS.....	195
7.3.5.	Евалуација и валидација на моделот.....	197
8.	Анализа на резултатите од спроведеното истражување	199
8.1.	Дискусија на резултатите од Модел 1	199
8.1.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	199
8.1.2.	Квалитет и репрезентативност на влезните податоци	199
8.1.3.	Локален координатен систем како методолошка поставка	200
8.1.4.	Ефекти од процесирањето: прочистување и сегментација	200
8.1.5.	Геометриска валидност на BIM моделот и контрола на квалитет	201
8.1.6.	Релевантност за катастар и концептуално поврзување со LADM.....	201
8.1.7.	Ограничувања и заклучни согледувања	203
8.2.	Дискусија на резултатите од Модел 2	203
8.2.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	203
8.2.2.	Катастарска репрезентација и идентификувани ограничувања на 2Д моделот	204
8.2.3.	Квалитет на аквизицијата со SLAM-LiDAR во урбана инфраструктурна средина.....	204
8.2.4.	Обработка и геореференцирање: стабилност на интегрираниот облак од точки	205
8.2.5.	Резултати од BIM моделирањето: геометрија, деталност и семантика.....	205
8.2.6.	Интеграција BIM-GIS: интероперабилност и просторен контекст.....	205
8.2.7.	Геометриска валидност на интегрираниот BIM-GIS модел.....	206
8.2.8.	Импликации за 3Д катастар: просторни единици, правни односи и LADM	207
8.2.9.	Ограничувања и заклучни согледувања	208

8.3.	Дискусија на резултатите од Модел 3.....	208
8.3.1.	Оправданост на изборот на моделот и улога во методологијата.....	208
8.3.2.	Ефектот од комбинираната аквизиција врз конзистентноста на моделот	208
8.3.3.	Класификацијата на облакот од точки како предуслов за формирање на сеопфатен 3Д модел 209	
8.3.4.	Улогата на дигиталните висински модели	209
8.3.5.	Хибридно моделирање како практичен компромис со висока методолошка вредност.....	210
8.3.6.	VIM-GIS интеграција во функција на администрација со недвижности	210
8.3.7.	Потенцијал за поврзување со LADM	211
8.3.8.	Надградба на моделот со дополнителни тематски слоеви (вегетација, електрични столбови, електроводови, патеки, паркинг)	211
8.3.9.	Ограничувања и заклучни согледувања	211
	Заклучок	213
	Литература	217

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1. Преклопување на објекти на различни висински нивоа	14
Слика 2.1. BIM во сите фази од животниот циклус на објектот. Извор: https://bimmda.com/en/what-is-bim . 36	36
Слика 2.2. Типови на податоци во BIM. Извор: https://bimcorner.com/what-is-data-introduction-to-data-in-bim/	39
Слика 2.3. Нивоа на развој на BIM моделите. Извор: https://www.pentagonsolutions.com/sv/blogg/beharska-detalj-niva-utveckling-i-konstruktion-byggnad-framgang-en-detalj-i-taget-lod/	42
Слика 2.4. Нивоа на деталност во GIS. Извор: Biljecki et al., 2016	47
Слика 2.5. Домени на дејствување на BIM и GIS. Извор: https://blogs.autodesk.com/infrastructure-reimagined/BIM-GIS-integration-smarter-designs-better-outcomes/	49
Слика 3.1. Просторна хиерархија во IFC (IfcProject-IfcSite-IfcBuilding-IfcBuildingStorey-IfcSpace)	59
Слика 4.1. Интегрирано BIM-GIS решение за сообраќајници и железници	72
Слика 4.2. Интегриран BIM-GIS пристап за процена на соларен фотоволтаичен потенцијал на покриви на објекти	73
Слика 4.3. Дигитален близнак на град	75
Слика 4.4. Ad inferos et usque ad sidera, познат како „од пеколот до рајот“	77
Слика 4.5. Студентски дом Гоце Делчев, конекциите помеѓу зградите не се прикажани на катастарскиот план	80
Слика 4.6. Подземни гаражи во комплексот „Лептокарија“, влезната рампа и подземниот објект не се прикажани на катастарскиот план	81
Слика 5.1. TLS vs. MMS vs. ALS	88
Слика 5.2. Типични механички системи за скенирање кај LiDAR	91
Слика 5.3. Геометрија на видното поле (Field of View) на TLS. Извор: Vosselman & Maas, 2010	92
Слика 5.4. Шематски приказ на вертикалното отклонување на ласерскиот зрак. Извор: Kersten et al., 2018	93
Слика 5.5. Концептуален приказ на регистрација на облаци од точки	94
Слика 5.6. Терестрички ласерски скенер	95
Слика 5.7. Мобилен ласерски скенер поставен на возило	96
Слика 5.8. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало	98
Слика 5.9. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало	99
Слика 6.1. Методологија за интегрирање на ласерско скенирање, BIM и GIS	106
Слика 6.2. Затворање на јазли (loop closure) кај SLAM скенирање	111
Слика 6.3. TLS vs. SLAM	117
Слика 6.4. Траектории на снимање со UAV-LiDAR (grid pattern, cross-flight, и double-grid)	119
Слика 6.5. Моделирање со трасирање на облакот од точки	128
Слика 6.6. Поврзување на IFC и CityGML врз основа на концепти за заеднички елементи на градбата. Извор: El-Mekawy et al., 2012	137
Слика 7.1. Облак од точки добиен со SLAM-скенирање, траекторија на движење, позиции на скенирање и фотографии од позицијата на скенирање	150
Слика 7.2. Необработен облак од точки визуелизиран според интензитет на рефлексивност на ласерски импулс (Опсег на бои: од црна, низок интензитет до бела, висок интензитет)	151
Слика 7.3. Обработен облак од точки добиен со ласерско скенирање на станот со рачен SLAM-скенер	152
Слика 7.4. Хоризонтален пресек на облакот од точки во BIM околина	153
Слика 7.5. Вертикален пресек на облакот од точки добиен со ласерско скенирање на стан	153
Слика 7.6. Вертикален пресек на облак од точки и BIM модел на стан	154
Слика 7.7. 3Д поглед во моделот (лево – облак од точки преклопен со BIM модел, десно – BIM модел)	154
Слика 7.8. 2Д основа на BIM модел на стан	155
Слика 7.9. 3Д визуелизација на BIM модел на стан	156
Слика 7.10. Должини [m] извлечени од BIM модел	157
Слика 7.11. Фотографија од пешачки мост „Влајко“	163
Слика 7.12. Ортофото снимка и регистрирани катастарски парцели и објекти (жолти полигони – регистрирани објекти (столбови) на мост „Влајко“)	164
Слика 7.13. Снимање на мост „Влајко“, лево – рачен скенер, десно – тотална станица	166
Слика 7.14. Интегриран облак од точки добиен со ласерско скенирање на мост „Влајко“	168

Слика 7.15. Обработен облак од точки од надворешноста на мост „Влајко“	169
Слика 7.16. Обработен облак од точки од внатрешноста на мост „Влајко“	169
Слика 7.17. 3Д поглед на BIM моделот на мост „Влајко“	171
Слика 7.18. Хоризонтален пресек на BIM модел на мост „Влајко“	171
Слика 7.19. 3Д поглед на интегриран BIM модел на мост „Влајко“ во GIS околина	172
Слика 7.20. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед од надвор)	173
Слика 7.21. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед кон внатре)	174
Слика 7.22. Формирани 3Д волумени во интегрираниот BIM-GIS модел на мостот Влајко	176
Слика 7.23. Снимени точки за валидација на интегрираниот BIM-GIS модел на мост „Влајко“	178
Слика 7.24. Фотографија од хотелскиот комплекс направена од беспилотно летало	187
Слика 7.25. Скенирање на хотелски комплекс, лево – рачен скенер, десно – беспилотно летало со LiDAR скенер	190
Слика 7.27. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух од хотелскиот комплекс	191
Слика 7.28. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер од хотелскиот комплекс	191
Слика 7.29. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух за селектираниот објект	192
Слика 7.30. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер за селектираниот објект	192
Слика 7.31. BIM модел за селектираниот објект од хотелскиот комплекс	194
Слика 7.34. Дефинирани просторни сегменти во рамките на BIM	195
Слика 7.35. Интегриран BIM-GIS модел на хотелски комплекс	197

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 2.1. Компарација на BIM и GIS	49
Табела 3.1. Споредба на IFC и CityGML	61
Табела 7.1. Формирани простори во моделот (IfcSpace)	156
Табела 7.2. Компаративна анализа на должини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните должини извлечени од BIM модел	158
Табела 7.3. Компаративна анализа на висини мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните висини извлечени од BIM модел	159
Табела 7.4. Статистички параметри од компаративната анализа на растојанија мерени со уред за ласерско мерење должини и соодветните растојанија од BIM модел.....	162
Табела 7.5. Атрибутна табела со податоци за посебните единици во објект „Влајко“ од интегрираниот BIM-GIS модел	175
Табела 7.7. 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	178
Табела 7.8. Статистички параметри од компаративна анализа на координати на контролни точки (класичен премер vs. BIM модел)	183
Табела 7.9. Комбинирани индикатори за позициска точност (рамнина и 3Д простор).....	183
Табела 7.10. Регистрирани внатрешни простори на мост Влајко во ГКИС на АКН.....	184
Табела 7.11. Атрибутна табела со податоци за станбените единици во анализираниот објект	196

ЛИСТА НА КРАТЕНКИ

BIM – Building Information Modelling

GIS – Geographic Information System

CAD – Computer-Aided Design

IFC – Industry Foundation Classes

OGC – Open Geospatial Consortium

WMS – Web Map Service

WFS – Web Feature Service

GML – Geography Markup Language

CityGML – City Geography Markup Language

LiDAR – Light Detection and Ranging

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping

TLS – Terrestrial Laser Scanning

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

LADM – Land Administration Domain Model

AEC – Architecture, Engineering and Construction

LoD – Level of Detail

LOD – Level of Development

MEP – Mechanical, Electrical, Plumbing

IoT – Internet of Things

RTK – Real-Time Kinematic

DTM – Digital Terrain Model

DSM – Digital Surface Model

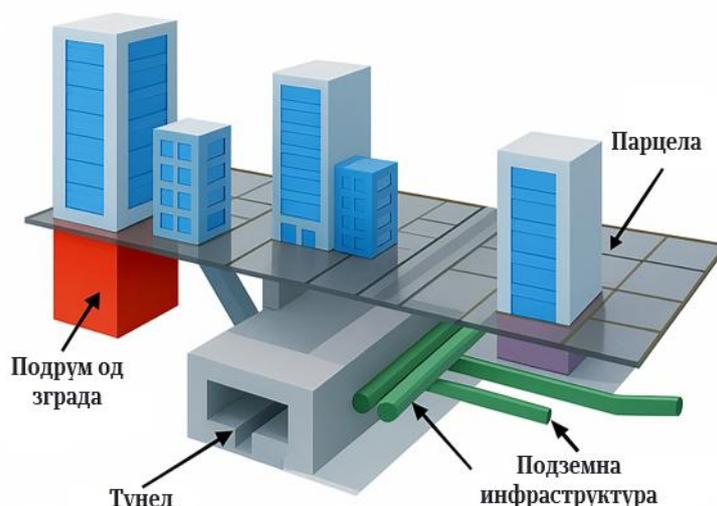
nDSM – Normalized Digital Surface Model

АКН – Агенција за катастар на недвижности

ГКИС – Геодегско-катастарски информациски 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. 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

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 преставуваат современи решенија за брзо и детално снимање на објектите и изградената средина, со можност за добивање густы 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;
- **Инициирање 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 инициираното решение**, преку квантитативна и квалитативна анализа на геометриската точност, атрибутивната 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 просторна точност, 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 (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.

Крајок 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 досџиѓнувања 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 3D 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 3D 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 3D 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 имплементација 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 спроведеното 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 рамки 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 студија 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 на 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 што 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 атрибутивни 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 рамки 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 (пример 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 од 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, 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 ДОСТИГНУВАЊАТА 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 објектите не е цртеж, туку информациска структура составена од елементи со својства, правила и односи**. Оваа перспектива подразбира дека ѕидот, 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 ѕид, 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 истражувачката литература, 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 објекти/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, обнови и управување со имот (Volk et al., 2014). Токму тука 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. Работата на Tomlinson (1968), поврзана со раните национални геоинформациски системи, често се смета 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, координациониот 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 нивно поврзување со бази на податоци. Во практична смисла, тоа значи дека просторните објекти (парцели, објекти, оски на патишта, водови) не се третираат само како графички ентитети, туку како објекти со структуриран опис, правила и ограничувања. Тополошките односи (соседство, поврзаност, припадност), како и точната дефиниција на координатните системи, овозможуваат да се контролира квалитетот на податоците и да

се изведуваат сложени просторни операции (Burrough & McDonnell, 1998). Во оваа еволуција, концептот на просторна база на податоци „geodatabase“ (во објектно/објектно-релациски контекст) претставува важен чекор кон моделско-ориентирано управување со податоци, бидејќи поддржува доменски правила, подтипови на објекти, релации и 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 тука *CityGML се еџаблира како клучен OGC-стандард 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 на едната страна се задржува урбанистичкиот и територијалниот контекст, а на 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 катастар, просторно и урбанистичко планирање, планирање на системи за

водоснабдување, ефикасно планирање на патна и железничка инфраструктура, предвидувања и симулации како процена на соларен фотоволтаичен потенцијал, анализи на бучава, но и предвидување на евентуални штети предизвикани од поплави, свлечишта, пожари итн.

Интеграцијата на BIM и GIS претставува *интердисциплинарен предизвик за којашто се обидува да усогласи два различни „начини на размислување“ за просторот: BIM доменот го моделира објектот како инженерски сет од елементи со бојата семантика и локална геометрија, додека GIS доменот го моделира просторот како просторен референтен 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 што се IFC (Industry Foundation Classes) и CityGML, 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 et al. (2021) 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 тополошки 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 CityGML 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.

El-Mekawy и Östman развиваат Unified Building Model (UBM) кој ги „капсулира“ концептите и од IFC и од CityGML, со цел трансформацијата да биде во два чекори (IFC → UBM → CityGML и обратно), при што се задржуваат клучните класи, атрибути и просторни релации (El-Mekawy & Östman, 2012). Во слична насока се движат и проширувањата на CityGML за да се зачува подмножество на „BIM-специфични“ информации кои се корисни за одредени сценарија. Biljecki et al. (2021) развиваат екстензија за CityGML која има за цел да редуцира семантичка загуба при IFC-to-CityGML конверзии и да ја подобри употребливоста на IFC-изворни 3Д модели на урбани средини.

Во пракса, една од најкритичните технички точки е геореференцирањето на BIM моделите и нивното поставување во координатен референтен систем што е компатибилен со GIS. Резултатите од GeoBIM Benchmark 2019 покажуваат дека постојат алатки и процедури за геореференцирање и конверзии помеѓу IFC и CityGML, но дека сè уште

недостигаат унифицирани правила, јасни барања и стабилни работни практики што би обезбедиле репродуктивни резултати на различни платформи, особено кога се бара висока конзистентност меѓу моделите (Noardo et al., 2020). Токму заради тоа, во поновата стандардизација се појавува ISO/TS 19166 (BIM-to-GIS conceptual mapping), која не претендира да „реши“ сè на техничко ниво, туку формализира како, според конкретни кориснички барања, се дефинира перспектива на мапирање, мапирање на елементи и мапирање на нивоа на деталност помеѓу BIM и GIS (ISO/TS 19166:2021).

Интеграцијата се реализира на различни нивоа (податочна, апликативна, сервисна) и дека изборот на пристап зависи од сценариото: урбано планирање, одржливо управување, енергетски анализи или правно-административни апликации како катастар (Wang et al., 2019; Zhu et al., 2022).

Во поновите насоки, интегрираните BIM-GIS модели сè почесто се разгледуваат како основа за дигитални близинаци на урбани средини, каде што деталната инженерска семантика се комбинира со градски/територијален контекст и податочни сервиси. Сепак, литературата нагласува дека токму интеграцијата на податоците (конзистентна семантика, геореференцирање, управување со нивоа на деталност и ажурирање) останува најголем „праг“ меѓу концептот и реалните имплементации (Jeddoub et al., 2023). Во таа рамка, се јавуваат и конкретни работни текови за 3Д катастар, каде BIM/IFC се користи за дефинирање на правни 3Д граници на ниво на објект, а CityGML/3Д градскиот модел служи како „индексна карта“ за визуелизација и анализа на ниво на град—што ја демонстрира практичната вредност на стандардизирана BIM-GIS поврзаност (Sun et al., 2019).

Во GIS доменот, CityGML се позиционира како клучен OGC стандард за семантички 3Д модел на урбани средини, бидејќи комбинира геометрија со тематика (класи на објекти) и тополошка дисциплина, што ја прави содржината употреблива за просторни анализи и управување со податоци во база. Особено значајно е што CityGML 3.0 (официјално стандардизиран од OGC во 2021) воведува ревидиран LOD концепт и унапредени механизми за моделирање на простори и граници, што директно влијае на начинот на кој BIM содржините може да се „преведат“ во GIS контекст без геометриска и семантичка деградација.

Критичниот мост меѓу IFC и GML/CityGML најчесто се остварува преку semantic mapping – формализирано поврзување на ентитети, атрибути и релации од BIM шемата со соодветни класи и својства во GIS шемата. Во литературата, Karan & Irizarry го нагласуваат пристапот каде семантичкото мапирање и „семантичките сервиси“ се користат за да се прошири интероперабилноста на BIM кон просторни анализи, што е индикативно дека интеграцијата се третира како информациски проблем (значење и правила), а не само како геометриска конверзија.

Во пракса, потребата да се зачуваат BIM-специфични својства во GIS доведе до развој на Application Domain Extensions (ADE) за CityGML. Препознат пример е GeoBIM екстензијата на de Laat & van Berlo (2011), која има цел да задржи подмножество од IFC семантиката во CityGML преку проширување на постоечки CityGML објекти со атрибути и релации релевантни за BIM-светот. Понатаму, прегледната студија за ADE механизам (Biljecki et al., 2018) покажува дека ADE е системски начин CityGML да се прилагоди на доменски потреби (енергија, ризици, катастар), а поновите работи посочуваат дека

CityGML 3.0 донесува промени кои бараат внимателно „препакување“ на постоечките ADE за да останат компатибилни – што е важна напомена за долгорочна интероперабилност.

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 објекти/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/LoD 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 волуменската конзистентност и недвосмисленоста на границите се критични). Во таа рамка, трудовите за CityGML 3.0 посочуваат дека ревидираниот LOD концепт и унапредените можности за моделирање на простори/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. Ласерското скенирање, во форми како Terrestrial Laser Scanning (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 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.

Различните технологии придонесуваат комплементарно, со различни силни страни и ограничувања. TLS обезбедува многу висока точност и стабилност, но бара статички поставки и внимателна регистрација; UAV-LiDAR е клучен за кровни конструкции, висински модели и поширок контекст (терен, вегетација, урбана околина), но често има пониска густина на точки на фасади и ограничувања во „сенки“; додека SLAM овозможува континуирано снимање во затворени или комплексни простори без статив и со брз теренски работен тек. SLAM е особено корисен за ентериери, коридори, скалишта и објекти со сложена конфигурација, но носи специфични ризици како акумулиран дрфт, „ghosting“ и локални деформации ако траекторијата не е добро затворена и ако средината има слаб геометриски „feature“ сигнал (Cadena et al., 2016). Практичната вредност во BIM–GIS сценарија е токму во тоа што комбинацијата TLS/UAV/SLAM може да обезбеди доволна комплетност на податоците: фасади и носечки структури, кровови и терен, како и внатрешни простори, што ретко може да се постигне со еден сензор во изолација.

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 и артефакти, регистрација/усогласување на скенови, геореференцирање, како и сегментација и класификација на точки во структурни и архитектонски елементи. Регистрацијата (на пр. ICP и варијации) и контролата на грешка се критични за да се избегне „локално точен, глобално неконзистентен“ модел, додека сегментацијата е основа за полуавтоматско или автоматизирано 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/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 дисциплина: конзистентни волумени, недвосмислени граници и стабилна врска со координатен референтен систем. Wang et al. (2020) во прегледите за Scan-to-BIM укажуваат дека практичната употребливост зависи и од тоа колку добро е управувана „врската“ меѓу детален модел и реалниот простор: метаподатоци за точност, контрола на систематски грешки, и документирана процедура за геореференцирање—што е особено важно кога моделот ќе се интегрира во GIS и ќе се поврзува со парцели, инфраструктура и административни единици (Wang et al., 2020).

Конечната вредност за BIM-GIS интеграција се постигнува кога резултатите од LiDAR/SLAM не завршуваат како изолиран BIM, туку се „вградуваат“ во просторни бази на податоци и сервиси. Интегрирани рамки како оние дискутирани кај Zhu et al. (2022) комбинираат LiDAR податоци со BIM структури за автоматизирана сегментација, извлекување објекти и нивно организирање во GIS слоеви/класи, што овозможува создавање просторен инвентар на недвижности и градби со богата семантика. Во таков работен тек, облакот од точки служи како геометриска основа, BIM како носител на детални атрибути и структури (елементи, простории, нивоа), а GIS како платформа за геореференцирано складирање, анализа и поврзување со правни и административни податоци—особено релевантно за 3Д катастар, каде што просторната конзистентност и можноста за проверка на преклопувања/граници се клучни (Zhu et al., 2022). 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 границите се прикажуваат во рамнина, 3Д катастарот овозможува волуменско претставување на недвижностите, нивните меѓусебни односи (над/под/покрај), 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, ограничувања и одговорности.

Истражувањата на Stoter et al. (2011, 2017) и Shojaei (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 линија, 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). Прегледните трудови за 3Д градски модели и нивните апликации дополнително покажуваат дека семантички структуриран 3Д модел (CityGML) 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).

Токму затоа, LADM (ISO 19152) се наметнува како централна концептуална рамка за поврзување на физичкиот простор со правните односи. Како што објаснуваат Lemmen, van Oosterom & Bennett (2015), LADM воведува унифициран јазик за моделирање на страни (parties), права/ограничувања/одговорности (RRR) и административни единици (BAUnits), поврзани со просторни единици (spatial units) – што е суштината на катастарската евиденција. 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/границите, но неговото правно значење и врска со сопственик, право на користење или ограничување се моделира преку LADM, а не преку BIM логиката.

Во современите истражувања, еден јасен тренд е комбинирање на LADM со CityGML и IFC како начин да се изгради целосен 3Д катастарски информациски екосистем. Работите 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/границы) кон правни просторни единици во LADM и нивна репрезентација/контекстуализација во GIS/CityGML. Овој пристап е особено релевантен затоа што овозможува 3Д катастарот да биде истовремено правно ориентиран (LADM) и просторно-аналитички употреблив (GIS/CityGML), а BIM да остане извор на детална „as-built“ геометрија кога тоа е потребно за доказност, валидација и одржување на моделот.

Дополнително, се појавуваат трудови кои се обидуваат да го опфатат целосниот работен тек од аквизиција до катастарска употреба. Според Karaki et al. (2021) и Soon et al. (2022), интегрираниот пристап може да ги поврзе фазите: прибирање податоци со LiDAR/SLAM за реалната состојба, обработка и моделирање во BIM за добивање структурирани објекти и просторни единици, трансформација/интеграција во GIS преку CityGML и поврзување со LADM за правните атрибути и примена за катастарски и урбанистички задачи (проверка на преклопувања, анализи по висина, управување со ограничувања, сервисни процеси). Овие пристапи сугерираат дека најголемата научна и практична вредност не е во поединечна конверзија, туку во создавање унифициран систем каде инженерските податоци, просторната референца и правните односи се одржуваат

конзистентно, ажурирано и проверливо, што е основа за ефикасна сервисна политика со недвижностите во дигитална средина.

Од првите концептуални трудови за BIM и GIS до денес, научноистражувачката заедница изгради солидна теоретска и технолошка основа за нивна интеграција во кохерентен информациски екосистем. Напредокот е овозможен преку стандардизацијата на доменските модели и шеми (IFC како BIM-стандард, CityGML како семантички 3D градски модел и LADM како правно-административна рамка), 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 развија модели и методологии за интероперабилност (semantic mapping, ETL процеси, ADE проширувања, ISO/OGC рамки), 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. Најголемите предизвици остануваат: континуирано и проверливо геореференцирање на BIM моделите, тополошки валидни 3D тела погодни за катастарска регистрација, доследно мапирање на семантиката од инженерски кон правно-административен контекст и воспоставување работен тек кој е репродуктибилен од аквизиција до просторна база и катастарска примена. Во пракса, токму овие точки често се третираат фрагментарно: едни студии се фокусираат на скенирање и облаци од точки, други на IFC-CityGML конверзија, а трети на LADM моделирање, без целосно интегриран и валидиран „крај-до-крај“ процес.

Оттука произлегува потребата и научниот придонес на оваа дисертација: да предложи и аргументира сеопфатна методологија за интеграција на BIM и GIS како основа за ефикасна сервисна политика со недвижностите, каде просторните податоци се прибираат (LiDAR/SLAM), се обработуваат до геометриски конзистентен as-built модел, се структурираат во BIM (IFC), се трансформираат и организираат во GIS (CityGML/Geodatabase), и се поврзуваат со правниот слој на управување со недвижности преку LADM. На тој начин, интеграцијата не се третира како еднократна конверзија, туку како репродуктибилен 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 истражувањето.

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 џрисиџај за креирање, уџравување, извлекување и сџоделување информации за џрабџиџе џомеџу засеџнаџиџе сџрани низ целиџи 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 (Eastman et al., 2011; ISO 19650-1:2018). Од друга страна, *GIS е сисџем дизајниран за складирање, визуелизација, џроверка и џоџврдување, маниџулација, обрабоџка, инџџџирање и анализирање на џростџорни и аџрибуџџни џодаџџоџи, со цел извлекување заклучоџи и џоддрџка на џростџорни одлуки*. 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 регионално 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 претпоставки, 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 новата на деталност, 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 напредна дигитална методологија за систематско моделирање, структурирање и управување со податоци за објектите во сите фази од нивниот животен циклус. Овој пристап ја обединува тродимензионалната геометрија со атрибутни податоци, создавајќи единствен, интегриран информациски модел. Како резултат на овој пристап се надминуваат ограничувањата на традиционалните 2Д и САД методи, овозможувајќи значително повисоко ниво на дигитална контрола и координација во архитектонско-градежните процеси, а со тоа сигурно, прецизно и конзистентно донесување одлуки.

BIM моделот не е само тридимензионална геометриска репрезентација, туку интегриран информациски процес кој ги поврзува објектот, податоците и моделирањето во единствена дигитална рамка. Building – ја нагласува физичката страна на проектот, односно објектот како резултат на градежните процеси, додека Information – укажува дека секој елемент во моделот содржи вградени податоци: геометриски, технички, функционални и оперативни, кои ја опишуваат неговата улога и однесување. Modelling – го претставува процесот на дигитално моделирање, односно создавање виртуелен модел на објектот пред неговата физичка реализација, со што се овозможува анализа, симулација и оптимизација уште во раните фази.

Во меѓународниот контекст на стандардизацијата, според buildingSMART International, BIM се разбира како процес кој овозможува создавање, управување и споделување на информации за изградената средина во текот на целиот животен циклус на објектите. Во овој пристап, BIM се темели на примена на дигитални технологии и отворени стандарди (openBIM) со цел да се поддржи соработката меѓу различните чинители, да се обезбеди континуитет и долгорочна достапност на податоците, како и да се овозможи независност од поединечни софтверски платформи, со што се создава сигурна основа за информирано донесување одлуки во сите фази на животниот циклус.

Покрај дефиницијата дадена од buildingSMART International, во стручната и научната практика широко е прифатена и националната дефиниција на BIM воспоставена во Соединетите Американски Држави. Така, во рамките на National BIM Standard–United States (NBIMS-US), BIM се дефинира како:

„Дигитална репрезентација на физичките и функционалните карактеристики на објектот, која служи како заеднички извор на информации за објектот и обезбедува сигурна основа за донесување одлуки во текот на целиот негов животен циклус – од најраните концептуални фази до рушење.“

Во суштинска смисла, 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. Врз основа на ваквата објектно-ориентирана и семантички богата структура, BIM моделите се прошируваат со дополнителни димензии, како што се 4Д – временско моделирање, 5Д – финансиска анализа, 6Д – енергетска и перформансна евалуација и 7Д – управување со објектите, при што моделот ја надминува улогата на статична дигитална репрезентација и се трансформира во динамична информациска платформа. Оваа повеќедимензионална природа претставува цврста основа за BIM-GIS интеграција, бидејќи овозможува поврзување на деталните информации за објектите со поширокиот просторен контекст, што е од клучно значење за развој на дигитални близнаци, напредни просторни анализи и имплементација на 3Д катастарски системи.

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 тродимензионално моделирање,
- Интегрирана и централизирана база на податоци (Single Source of Truth),
- Мултидисциплинарна соработка и интегрираните работни текови,
- Структурирани податоци и интероперабилност,
- Поддршка на целиот животен циклус на објектот.

Параметарско и објектно-ориентирано моделирање ја претставува основата на BIM, при што секој градежен елемент е дефиниран како интелигентен објект со геометриски, материјални, и функционални својства. Параметрите и логичките правила овозможуваат автоматско ажурирање на моделите, што значи дека кога се менува еден атрибут, BIM автоматски ги ажурира сите поврзани компоненти, пресметки и документација. Според Eastman et al. (2011), BIM моделот претставува „интелигентна база на податоци“ со меѓусебно зависни компоненти, каде секоја промена иницира автоматска конзистентност низ целиот модел. Зголемената конзистентност ја намалува потребата за рачна ревизија и го минимизира ризикот од грешки кои се карактеристични за традиционалните CAD процеси. Според Eastman et al. (2011), ваквото параметарско моделирање го претвора BIM моделот во „жива“, динамички ажурирана структура.

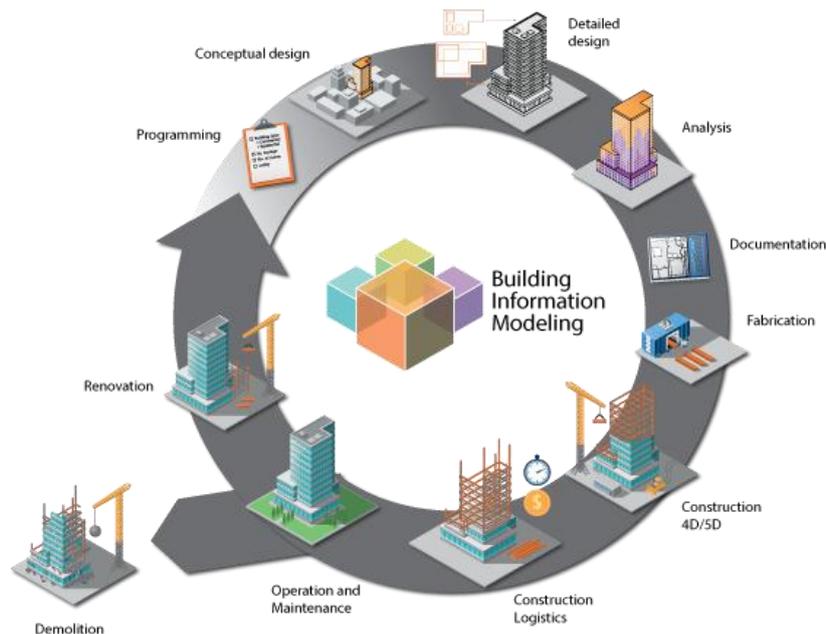
BIM се темели на принципот на централизирано управување со информациите, каде сите податоци се складираани во единствен, валиден и контролирано управуван извор, Single Source of Truth (SSOT). Овој принцип се реализира преку Common Data Environment (CDE), стандардизиран во ISO 19650, кој обезбедува структуриран процес за креирање, ревизија, споделување и архивирање на информации низ целиот животен циклус на проектот. Со ова се елиминира фрагментираноста карактеристична за традиционалните системи, во кои цртежи, табели, спецификации и мејлови постојат во неконзистентни и неконтролирани форми. Придобивките се значајни: намалување на грешки, подобрена дисциплинска координација, контрола на верзии, транспарентност и можност за интеграција со GIS, FM системи, дигитални близнаци и 3D катастар.

Мултидисциплинарна соработка и интегрираните работни текови се однесува на обезбедување единствена, дигитално синхронизирана околина што овозможува сите засегнати страни да работат врз идентичен, постојано ажуриран сет на информации. BIM платформите создаваат услови за паралелна работа на архитектонските, инженерските и изведувачките тимови, при што прегледот, анализата и измените на моделот се изведуваат транспарентно и координирано, значително намалувајќи ги ризиците од недоследности и повторна работа. Овој принцип се заснова на воспоставени интероперабилни стандарди како IFC и BCF, кои гарантираат сигурна размена на податоци меѓу различни дисциплини и софтверски системи. Интегрираните работни текови овозможуваат ефикасен процес на интердисциплинарна координација, автоматска детекција на грешки со што се зајакнува точноста и сигурноста на проектната документација и се оптимизира вкупниот процес на проектирање и изведба.

Структурирани податоци и интероперабилност претставуваат еден од принципи на BIM, чија суштина лежи во управувањето со формално организирани, машински читливи податоци што можат систематски да се анализираат, трансформираат и

разменуваат меѓу различни дигитални платформи. Во оваа рамка, BIM не претставува само тродимензионален визуелен модел, туку комплексен податочен екосистем кој се потпира на стандарди како IFC (Industry Foundation Classes), COBie, UniClass, OmniClass и други класификациски системи со цел да обезбеди унифицирана, семантички конзистентна репрезентација на градежните елементи. Високото ниво на интероперабилност што го обезбедуваат овие стандарди овозможува беспрекорна интеграција на BIM со системи за управување, конструктивни анализи, енергетски симулации, GIS системи, како и софтвери за 4Д и 5Д планирање. Овој принцип е критичен за автоматизација на работните процеси, напредно аналитичко моделирање и целосна дигитална трансформација на инженерските и управувачките практики.

BIM е концепт кој ја надминува фазата на проектирање и дава поддршка низ сите фази од животниот циклус на објектот: концепт, проектирање, изведба, експлоатација, одржување, реновирање и рушење. Благодарение на својата семантичка структура, BIM може да репрезентира не само геометрија туку и временски податоци (4Д), трошоци (5Д), енергетски перформанси (6Д) и параметри за управување со објектот (7Д). Овој принцип е клучен за современи концепти како дигитални близнаци, оптимизација на ресурси и за интеграција со 3Д катастар и правни модели како LADM. Поддршката на целиот животен циклус го претвора BIM во стратесиска алатка за долгорочно управување со инфраструктура и згради.



Слика 2.1. BIM во сите фази од животниот циклус на објектот. Извор: <https://bimmda.com/en/what-is-bim>

2.1.2. Архитектура и структура на BIM

Архитектурата и структурата на BIM ја дефинираат системската организација на дигиталниот модел, во која геометриските, информативните и процесните податоци се поврзани во конзистентна и интегрирана целина. Применувајќи ги принципите на параметричност, објектна ориентација и интероперабилни стандарди, BIM создава слоевит систем што ги поврзува просторните нивоа, објектите, нивните својства и

функционалните релации. Ова поглавје разгледува повеќеслојна архитектонска рамка која ја поддржува функционалноста на BIM, вклучувајќи ја просторната, информациската архитектура, податочната архитектура, моделската структура, семантичка, процесна и дисциплинската интеграција.

Просторната архитектура (Spatial Architecture) ја дефинира хиерархиската организација на BIM моделот преку нивоа како Project, Site, Building, Building Storey и Space. Таа обезбедува структуриран просторен контекст, унифицирани координатни системи и точна просторна поставеност на елементите, што е значајно за интеграција со GIS, 4Д симулации и 3Д катастар.

Информациска архитектура (Information Architecture) ги структурира правилата и механизмите за создавање, управување, складирање и размена на податоци. Клучен концепт во оваа архитектура е воспоставувањето на Single Source of Truth (SSOT) – единствен валиден и централизирано контролиран извор на податоци за сите учесници во проектот. Дигиталната околина, дефинирана преку Common Data Environment (CDE) според ISO 19650 серијата, обезбедува континуирано ажурирање, следење на промени што се случуваат во BIM моделот и придружната документација, управување со верзии и стандардизиран пристап до информациите, со што се минимизираат грешките, дуплирањето и неконзистентноста на податоците.

Податочна архитектура и интероперабилност (Data Architecture & Interoperability) ги дефинира форматите, стандардите и протоколите што овозможуваат структурирано складирање и интероперабилна размена на информации. BIM податочната архитектура се темели на формализиран модел на податоци во кој сите градежни компоненти, нивните атрибути и меѓусебни релации се организирани во конзистентна и интероперабилна структура. Таа се реализира преку формални стандарди за моделирање, меѓу кои најзначаен е Industry Foundation Classes (IFC) – отворен и неутрален податочен модел, како и OmniClass, UniClass, MasterFormat и COBie ја дополнуваат податочната архитектура со таксоними и типологии за стандардизирано именување, каталогизација и управување со опремата, материјалите, активите и функционалните својства (NBIMS-US V3, 2021).

Во рамките на податочната архитектура, структурата на податоците (data structure) претставува формален опис на начинот на кој податоците се организираат, групираат и поврзуваат во BIM моделот. Во таа смисла може да се разликува:

- Физичка структура која се однесува на геометриската репрезентација на објектите – точки, површини, волумени, параметарска геометрија, нивоа на развиеност и координатни системи. Овој сегмент ги опишува „видливите“ карактеристики на BIM моделот и ја обезбедува основата за 3Д визуелизација, симулации и метрички анализи,
- Логичка структура која се однесува на хиерархиските односи и организација на моделот (проект → локација → објект → кат → простор → елементот. Тука се вбројуваат релациските односи (relating/related), асоцијациите, зависностите и параметарските правила кои обезбедуваат конзистентност и автоматско ажурирање на моделот,
- Информациска структура се однесува на сетови на атрибути, својства и параметри (property sets, type attributes, material definitions) поврзани со секој објект. Тука спаѓаат техничките, геометриските, материјалните, оперативните и

правните податоци потребни за 4D, 5D, 6D и 7D моделирање, како и за интеграција со системи за енергетска анализа, проценки на трошоци и управување со објектите.

- Релативна структура ја дефинира мрежата од формални релации што ги поврзуваат објектите во IFC (RelDefines, RelAggregates, RelConnects, RelAssociates).

Квалитетно дефинираната податочна архитектура овозможува интероперабилност – способност за размена и употреба на податоците меѓу различни софтверски платформи и основа за спроведување напредни симулации и интеграција со GIS и LADM.

Следниот слој од BIM архитектурата се однесува на моделската архитектура, која ја дефинира теоретските и техничките основи врз кои се конструира дигиталниот модел и се регулира неговото однесување. За разлика од информациската архитектура, која ја управува формалните податочни структури и протоколите за размена, моделската архитектура ја опишува внатрешната логика на BIM. Овој слој опфаќа воведување параметарски правила, хиерархиските зависности, асоцијативните релации и логички ограничувања што ги дефинираат интеракциите помеѓу објектите во моделот, односно како параметарските правила овозможуваат автоматско ажурирање во рамки на единствена, објектно ориентирана дигитална средина без рачна интервенција. Во рамките на оваа архитектура се дефинираат и принципите на просторна хиерархија (Project-Site-Building-Storey-Space), објектно-типолошки класи (семејства, типови), како и релативни структури кои ги поврзуваат елементите според нивната физичка, логичка и функционална зависност.

Семантичката архитектура ја дефинира интелигентната содржина на моделот преку систематско организирање на атрибути, класификации и правила што ги опишуваат физичките и функционалните карактеристики на објектите. За разлика од моделската архитектура, која ја дефинира хиерархијата и параметарска логика, семантичката архитектура се фокусира на што претставува секој елемент, кои својства ги поседува и како е квалификуван во инженерски, правен и управувачки контекст. Ова опфаќа структурирани својства (property sets), материјални спецификации, перформансни параметри, класификациски системи (OmniClass, UniClass, MasterFormat), како и мултидисциплинарни атрибути неопходни за енергетска анализа, конструктивна проверка, пресметка на трошоци и управување со објекти. Семантичката архитектура ја поврзува геометријата со значење – трансформирајќи едноставни 3D форми во „паметни“ објекти што можат да се анализираат, филтрираат, автоматски верификуваат и разменуваат преку формати како IFC или COBie.

Процесната архитектура ја дефинира организацијата, логиката и тековите на информациите што се случуваат околу самиот модел, од неговото креирање, преку координација и ревизија, до одобрување, предавање и одржување. Таа претставува оперативна рамка што ја структурира чекорите, улогите и меѓусебните интеракции во проектниот животен циклус, осигурувајќи дека BIM не функционира само како статичен модел, туку како динамичен, процесно управуван систем. Во оваа архитектура се вклучени критични компоненти како управување со информации (Information Management), дефинирање на нивоа на одговорност (EIR, BEP), моделирање на работните текови согласно ISO 19650, валидација и ревизија на податоци, координација меѓу дисциплини

(детекција на грешки, следење на проблеми), управување со верзии и статуси на документација, како и интеграција на BIM со други оперативни процеси – 4D планирање, 5D пресметки, системи за управување и CDE платформи. Процесната архитектура е насочена кон тоа како се создава, трансформира и верификува информацијата, а не само каква информација постои. Таа утврдува стандарди за именување, структури за одобрување, нивоа на развиеност (LOD/LOI), процедури за управување со промени и протоколи за колаборативна комуникација. Преку ова, BIM станува контролирана средина во која секој чекор – од првичен концепт до as-built документ – е проследен, транспарентен и усогласен со дефинираните правила.

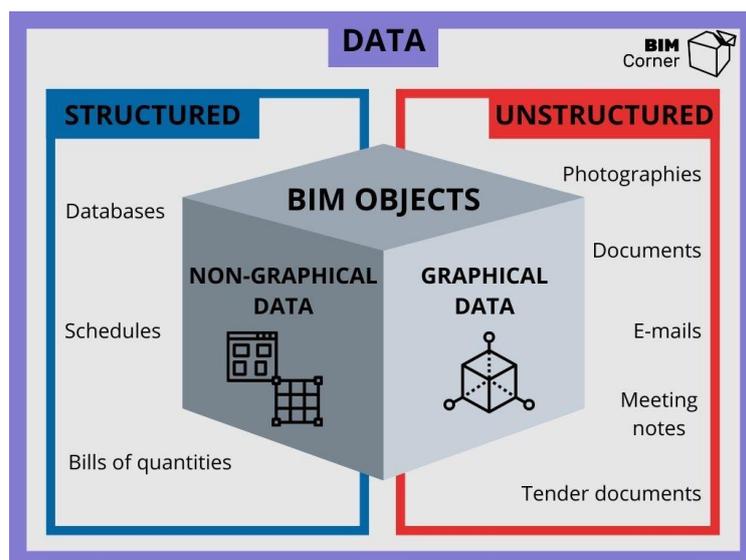
2.1.3. Типови на податоци во BIM

BIM претставува интегриран дигитален модел што комбинира повеќе категории на податоци со цел да ја опише геометријата, семантиката, функционалноста и животниот циклус на градежниот објект. Во рамките на современите BIM платформи, податоците се структурирани во неколку меѓусебно поврзани типови, кои овозможуваат детална репрезентација и напредна анализа во текот на проектирањето, изградбата и експлоатацијата.

Според Eastman et al. (2011), вредноста на BIM се заснова на неговата способност да служи како централизирана база на податоци која содржи информации релевантни за сите фази од животниот циклус на објектот – од концепт до одржување.

BIM податоците може да се групираат во две основни категории:

- геометриски податоци, кои ја претставуваат тродимензионалната геометрија на објектот, и
- не-геометриски податоци, кои вклучуваат структурирани информации како текстуални атрибути, нумерички вредности, датуми, логички (Boolean) променливи и други параметри.



Слика 2.2. Типови на податоци во BIM. Извор: <https://bimcorner.com/what-is-data-introduction-to-data-in-bim/>

Геометриските податоци (3D BIM) ја претставуваат тродимензионалната форма на објектот и неговите составни елементи. Тука спаѓаат параметризирани модели на ѕидови, подови, колони, покривни конструкции, отвори и инсталации. Геометриските податоци се дефинирани со точни измерени вредности, координати и тополошки односи. Во IFC шемата тие се опишани преку класи како IfcProduct, IfcExtrudedAreaSolid, IfcFacetedBrep и други. Како основна визуелна компонента на BIM моделот, графичките податоци обезбедуваат прецизна 3D основа за интеграција со GIS и за напредни анализи и процена на просторни односи.

Не-геометриски податоци (Атрибутни/Семантички податоци) ги опфаќаат сите атрибути што не создаваат геометриска форма, но ја збогатуваат информациската структура на BIM моделот. Во современите BIM практики, димензиите претставуваат начин за проширување на традиционалниот тродимензионален модел со дополнителни слоеви на информации (4D - 7D). Тие ја надополнуваат просторната репрезентација обезбедувајќи богата семантика и податочна интелигенција, овозможувајќи BIM моделот да служи како целосен информациски систем кој ги поддржува анализите, управувањето со проекти и интеграцијата со GIS и други платформи. Тука се вбројуваат:

- Временските податоци (Планирање и фази на изградба - 4D BIM) претставуваат проширување на основниот тродимензионален BIM модел со информации што ја опишуваат временската организација на градежните активности, создавајќи интегриран систем во кој просторот и времето се третираат како меѓусебно зависни параметри. Преку 4D димензијата, секој елемент од моделот добива поврзаност со конкретна задача, фазен период, редослед на активности или логистичка зависност, со што се моделира комплексната реалност на градежниот процес. Овие податоци овозможуваат да се прикаже како објектот се развива во текот на времето, да се предвидат критичните точки во изведбата, да се идентификуваат потенцијални застои, анализи на просторно-временските влијанија на градежните активности врз урбаната средина како и да се симулираат алтернативни сценарија со цел минимизирање на ризици и подобрување на ефикасноста.
- Финансиски податоци (Трошоци - 5D BIM) ја прошируваат функционалноста на BIM моделите преку интеграција на економски и буџетски информации со што овозможува проценка на трошоци во зависност од географски услови, достапност на инфраструктура и логистички ограничувања во урбани и рурални средини.
- Енергетски податоци (Одржливост и енергетска ефикасност - 6D BIM) - внесуваат дополнителна димензија на информативна комплексност во BIM моделите, овозможувајќи систематска процена на енергетските, еколошките и оперативните перформанси на објектот во текот на неговиот животен циклус. Овозможува просторна анализа на енергетските карактеристики во урбани целини, процена на засенување од соседни структури, анализи на урбани тоplotни острови и проценка на потенцијалот за соларни или пасивни енергетски системи. Со тоа, 6D BIM ја поврзува одржливата архитектура со просторните податоци, создавајќи дигитални модели со висока аналитичка вредност за современите енергетски стратегии.
- Оперативни податоци (7D BIM) се однесуваат на информациите потребни за управување, одржување и експлоатација на објектот по неговата изградба,

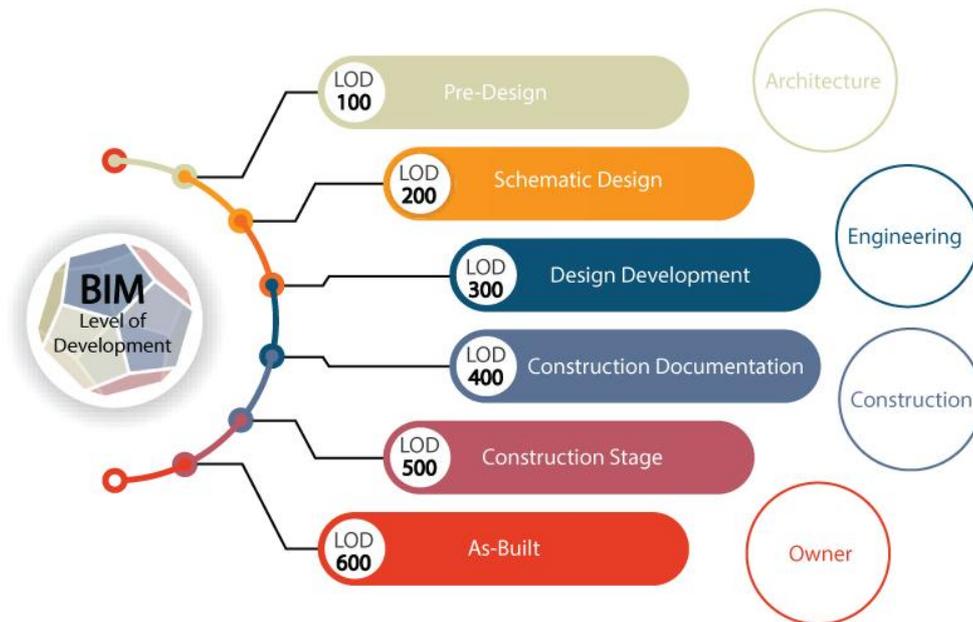
обезбедувајќи детален as-built модел. Тие ги опфаќаат податоците за опрема, гаранции, животен век, одржливост, сервисирање и оперативни процедури, овозможувајќи ефикасно управување со објектите. Ваквите BIM модели ја претвора статичката дигитална репрезентација во динамичен дигитален близнак кој ги поддржува процесите на мониторирање на инфраструктурата во реален простор, следење на дефекти во географски контекст, анализирање на пристапност, безбедносни зони и логистички потреби на објектите.

Сите овие типови на податоци имаат структура, дефинирана преку стандарди што овозможува нивна конзистентност, интероперабилност и машинска читливост и се нарекуваат структурни податоци. За разлика од нив, BIM интегрира и не-структурни податоци, кои немаат строго дефинирана внатрешна структура. Во оваа група спаѓаат документи во PDF формат, спецификации, извештаи, фотографии, слики од терен, скенирани документи, текстуални белешки, кореспонденција и други придружни датотеки што го поддржуваат процесот на проектирање, координација и управување со проектот. Овие не-структурни податоци најчесто се складираат и управуваат во рамки на Common Data Environment (CDE), кој претставува централизирана платформа за споделување и контрола на документацијата.

Способноста да се обединат сите типови на податоци, создавајќи модел кој функционира истовремено како геометриски опис, како техничка документација и како интелигентен информациски систем претставува основна моќ на BIM моделот. Меѓутоа, квалитетот и употребливоста на овие податоци значително зависат од степенот на нивна развиеност и точност во различните фази на проектниот циклус. Оттука произлегува потребата од воспоставување на јасна и формализирана рамка за дефинирање на нивото на развиеност на BIM моделите, која овозможува нивна конзистентна интерпретација и употреба низ сите проектни фази.

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

Нивото на развој (Level of Development – LOD) е широко прифатена и во практиката често користена рамка за дефинирање на степенот на геометриска и информациска зрелост на BIM моделите во различните фази од проектниот циклус. Развиена од The American Institute of Architects (AIA) и Associated General Contractors of America (AGC), оваа рамка овозможува структурирање на BIM моделот во јасно дефинирани нивоа на развиеност - Level of Development (LOD). На овој начин се овозможува стандардизирано толкување колку елементите во моделот се геометриски прецизни, информациски комплетни и подготвени за конкретни задачи во дадена фаза од проектниот циклус. LOD ги опфаќа и геометријата и не-геометриските податоци (материјали, технички својства, количини, перформанси), дефинирајќи што мора да биде познато и колку е сигурна информацијата на секое ниво на развиеност. Секое ниво ја зголемува доверливоста на BIM моделот и ја проширува неговата примена – од рани студии на изводливост, преку координација и изведба, до управување со објектот и претставува основа за усогласување на очекувањата помеѓу различните учесници во проектот.



Слика 2.3. Нивоа на развој на BIM моделите. Извор: <https://www.pentagonsolutions.com/sv/blog/beharska-detalj-niva-utveckling-i-konstruktion-byggnad-framgang-en-detalj-i-taget-lod/>

Според овој пристап, постепениот развој на BIM моделот од концептуална репрезентација до целосен as-built модел се разработува преку неколку нивоа LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 350, LOD 400, LOD 500. Овие нивоа овозможуваат јасна диференцијација на намената, точноста и достапните атрибути за секој модел, создавајќи основа за сигурна координација, анализа и понатамошна интеграција во GIS системи.

LOD 100 – Концептуално ниво (Conceptual Design, Pre-design)

LOD 100 претставува прва фаза од развојот на моделот. На ова почетно ниво, елементите се прикажани со приближни параметри како површина, висина, волумени или симболички репрезентации без точни димензии и без дефинирана геометрија. Податоците се ориентациони, а моделот е наменет за изводливост, рани финансиски процени и општа визуелизација. Пример: зградата се моделира како едноставен блок што го дефинира габаритот и позицијата, без внатрешни компоненти.

LOD 200 – Приближно ниво (Schematic Design)

На LOD 200 ниво геометријата станува појасна, но сè уште елементите се моделирани со основни форми и димензии, но со толеранции и одреден степен на поедноставување. Локацијата, ориентацијата и големината се приближно точни, но не финално дефинирани. Атрибутните податоци се делумно пополнети и можат да вклучуваат предложени материјали, функционални класификации или иницијални технички параметри. На ова ниво се формализира архитектонската намера и се овозможува шематско планирање, евентуална рана координација и просторни анализи. Пример: ѕидови, врати и основна опрема се поставуваат приближно за да се анализира распределбата на просторот. LOD 200 е соодветен за пред-дизајн, за координација со други дисциплини на основно ниво и за урбани, енергетски и просторни анализи како дел од BIM-GIS интеграција.

LOD 300 – Детално ниво (Detailed Design, BIM 3D)

LOD 300 претставува ниво на кое објектите се со целосно дефинирана геометрија со точни димензии, позиција, форма и ориентација, погодна за изработка на детални цртежи и инженерски пресметки. Елементите се геометриски конзистентни и соодветствуваат со идната изведба на градбата. Атрибутните податоци се целосно пополнети до степен што овозможуваат прецизни конструкции, пресметки на количини, техничка координација и детекција на грешки. Пример: сидови, прозорци, инсталации и MEP системи се моделирани со реални димензии и точни материјали. Ова ниво е најчесто pogodно за BIM-GIS трансформации (пример IFC → CityGML), како и за подготовка на 3Д катастарски податоци, бидејќи ја обезбедува потребната точност за просторни анализи.

LOD 350 – Градежна документација и координација (Construction Documentation and Coordination)

LOD 350 нивото го надградува LOD 300 ниво со дополнителни геометриски и тополошки информации кои овозможуваат детална интердисциплинарна координација. Елементите содржат, врски, точки на прицврстување, отвори, конекции со други системи (на пр., MEP компоненти), како и дополнителни детали за нивната интеракција со соседни структури. Ова е критично ниво за детекција на конфликти, точна координација меѓу архитектонски, конструктивни и инсталационски модели, како и подготовка за конструктивни решенија. LOD 350 е особено важен за дигитални близнаци и за системи кои бараат висока тополошка конзистентност.

LOD 400 – Изведбено ниво (Construction Stage)

LOD 400 нивото го опишува моделот со точност што ја одразува реалната изведба, вклучувајќи детални конструкциски елементи, методи на монтажа, производни спецификации и параметри за вградување. Атрибутните податоци ги опфаќаат точните материјални својства, производители, сериски броеви, детали за опрема и логистика на изведба. Ова ниво обезбедува база за координација со изведувачи и производители, но исто така претставува фундаментален дел од 4Д (време) и 5Д (трошоци) BIM моделирањето.

LOD 500 – Модел на изведена состојба (As-Built Model)

LOD 500 претставува највисоко ниво на развиеност и се користи за модели кои ја рефлектираат реално изградената состојба на објектот, верификувана преку мерења или ласерско скенирање. Геометријата и информациите во моделот се точни и финални, што го прави LOD 500 основа за оперативно управување, дигитални близнаци и долгорочно планирање на одржување. На ова ниво, моделот ги содржи сите релевантни атрибути, вклучувајќи информации за гаранции, одржување и експлоатациони параметри.

Ваквото дефинирање на нивоата на развиеност на BIM моделите е важно за нивната успешна примена во GIS околина, затоа што само модели од повисоки нивоа, како што се LOD 300 и повисоко обезбедуваат доволна геометриска прецизност и семантичка структура за трансформација. На тој начин, LOD претставува техничка врска која го поврзува инженерскиот BIM модел со просторните и правно-регулаторните системи.

Од друга страна, покрај Ниво на развиеност (Level of Development) често се користи и терминот Ниво на деталност (Level of Detail). Нивото на деталност се однесува на степенот на визуелна и графичка разработеност на BIM моделот, без да укажува дека

информациите поврзани со елементот се точни, целосни или технички верификувани. Нивото на деталност се однесува на количината на детали додадени во 3D BIM моделот, како што се димензии, текстури, бои и слични графички компоненти. За разлика од Level of Development, оваа рамка не е стандардизирана и се применува исклучиво како квалитативен опис на степенот на визуелна деталност (ниско, средно, високо ниво).

Со тоа, Level of Development и Level of Detail заедно обезбедуваат целосен пристап кон развојот на BIM моделите – комбинирајќи информациска точност со адекватна графичка репрезентација.

2.1.5. Ограничувања и предизвици на BIM

И покрај неговата брза еволуција и значајната трансформација што ја предизвикува во архитектонската, инженерската и градежната индустрија, BIM се соочува со низа технички, организациски и нормативни ограничувања кои ја отежнуваат неговата целосна примена. Овие предизвици произлегуваат од комплексноста на BIM моделите, високите барања за стандарди и интероперабилност, недостигот од квалификуван кадар и различните нивоа на зрелост на BIM процесите кај институциите и организациите. Разбирањето на овие ограничувања е клучно за правилно позиционирање на BIM во научноистражувачки и инженерски контексти, како и за поставување реални очекувања за неговата интеграција со други дигитални системи, особено GIS.

Техничките ограничувања претставуваат значајна пречка за ефективна имплементација. BIM моделите се карактеризираат со голем обем на податоци и комплексни параметарски структури, што често резултира со проблеми при визуелизација, складирање, вчитување и обработка, особено кај проекти со високи нивоа на LOD. Различните софтверски платформи (на пр., Revit, ArchiCAD, Tekla) применуваат сопствени формати, структури и интерни правила, што доведува до ограничена интероперабилност и варијации во трансферот на моделите. Иако IFC е меѓународен отворен стандард, неговата примена остава простор за толкување, а преносот на сложени објекти, материјални својства и параметри не секогаш е беспрекорен. Дополнително, BIM моделите често не се геореференцирани со доволна прецизност, што создава значителни проблеми при интеграција со GIS и 3D катастар.

Организациските и процесните предизвици произлегуваат од различните нивоа на имплементирање на BIM во институциите и приватните компании. Успешното имплементирање на BIM бара структурирани работни текови, јасно дефинирани улоги, процедури и стандарди, како и континуирана координација меѓу интердисциплинарните страни. Недостатокот од формален BIM Execution Plan (BEP), слаба внатрешна комуникација, неизградено искуство и неподготвеност за промена на традиционалните процеси водат до нефункционална или делумна примена на BIM. Според Succar (2009), BIM зрелоста е директно зависна од организациската култура, степенот на дигитална трансформација и интердисциплинарната соработка – компоненти кои во многу контексти сè уште не се оптимално развиени.

Нормативните и правните ограничувања претставуваат уште една критична димензија. Во голем број држави сè уште недостасуваат официјални регулативи кои го признаваат BIM моделот како правно валиден документ, особено кога станува збор за 3D катастар, издавање одобренија за градба или техничка документација. Ова создава правна несигурност и ја ограничува употребливоста на BIM во административните и

регулаторните процеси. Иако ISO 19650 го стандардизира управувањето со информации во градежни проекти, неговата примена не е унифицирана, а толкувањето и имплементацијата значително варираат по земји и институции.

Покрај овие системски предизвици, постојат и оперативни ограничувања кои произлегуваат од човечки фактори: недостиг на адекватна едукација, нееднакво ниво на дигитални компетенции меѓу тимовите, временски притисоци и неточни или непотполно внесени податоци. Квалитетот на BIM моделот директно зависи од дисциплината и прецизноста на учесниците, што значи дека дури и најдобро поставената BIM методологија може да биде нарушена од лошо практикување. Ова е особено видливо кај алатки за clash detection, quantity take-off или интеграција со системи за управување, каде мал пропуст во атрибут или параметар може да резултира со сериозни грешки во анализа или планирање.

Ограничувањата на BIM стануваат особено видливи во контекст на BIM-GIS интеграција, каде различните податочни модели, координатни референтни системи, нивоа на LOD и семантички структури создаваат технички и логички несогласувања. Овие предизвици ја нагласуваат потребата од стандардизација, интероперабилни формати (IFC, CityGML, LandInfra, LADM), нови методи за просторна трансформација и усогласување на геометриските и семантичките дефиниции во двата системи.

И покрај овие ограничувања, BIM останува централна технологија во дигитализацијата на градежната индустрија. Препознавањето на неговите предизвици претставува предуслов за нивно надминување и создавање поефективни модели на интеграција.

2.2. GIS (Geographic Information System)

Потребата од пронаоѓање решенија и од донесување одлуки, кои се базираат на состојба на објекти и на настани во просторот, претставува сериозен предизвик, имајќи предвид дека таквите одлуки и решенија е потребно да се базираат на реални показатели за нивните: локација, големина, геометрија, но и за други непросторни податоци, кои целосно ги опишуваат појавите и настаните. Во секој момент на одредено подрачје се случуваат голем број настани и најголем дел од нив можат да бидат лоцирани просторно. Колку сознанијата за просторните феномени се поголеми, толку подобри ќе бидат и одлуките кои ќе се донесуваат врз основа на податоците за нив. Се работи за процес во кој просторниот податок игра важна улога. Денес, како никогаш претходно, потребата за информации е многу голема и континуирано расте, технологијата се развива со највисоко темпо од постоењето на човештвото, што наметнува динамика на работа, која во овој процес, секој учесник сака да ја следи, а за тоа се потребни современи системи, кои овозможуваат донесување на брзи и на релевантни одлуки. Токму во ваквите процеси на донесување одлуки, каде што просторниот податок е примарен, се лоцирани и географските информациски системи или геоинформациските системи.

2.2.1. Основни принципи на GIS

Основен принцип во GIS е дека просторната локација е примарен идентификатор: објектот се дефинира преку координати и просторни релации (близина, пресек, содржаност). Ова води до втор принцип—просторна анализа: GIS не служи само за

мапирање, туку за извлекување знаење преку моделирање на процеси и просторни шеми (Longley et al., 2015).

Трет принцип е слоевитост (layer model): реалноста се претставува преку тематски слоеви (парцели, објекти, патишта, хидрографија), кои може да се комбинираат во просторни операции. Четврти принцип е тополошка конзистентност, особено кај векторски податоци: граници без празнини, правила за поврзување, валидни полигони и мрежи.

Клучна концепција во GIS е и размерот: ист феномен може да се претстави различно во зависност од размерот и намената. Ова е директно поврзано со генерализација и нивоа на деталност, што подоцна станува критично при поврзување со BIM модели (Goodchild, 1992; Longley et al., 2015).

2.2.2. Архитектура и структура на GIS

GIS архитектурата типично се реализира како:

- Податочен слој (data layer): просторни бази на податоци (geodatabase), датотеки (shapefile, GeoPackage), и просторни DBMS решенија (PostGIS, Oracle Spatial).
- Апликативен слој (logic/services): просторни операции, гео-процесирање, индекси (R-tree), правила за валидност, сервисно ориентирани архитектури.
- Презентациски слој (visualization/client): desktop GIS (ArcGIS Pro, QGIS), web GIS, 3D прегледувачи и dashboards.

Современите GIS системи се силно поврзани со стандарди за услуги и размена, како OGC спецификации (WMS/WFS/WCS/3D Tiles-екосистеми во пракса), што овозможува дистрибуирано управување и интеграција со други домени. Исто така, GIS е неразделен од координатни референтни системи (CRS), трансформации и метаподатоци, бидејќи просторното совпаѓање е суштинска претпоставка за анализа и одлуки (Longley et al., 2015).

Структурно, GIS базата на податоци најчесто е организирана во тематски datasets/feature classes и домени на атрибути, каде што геометријата и атрибутите се одделни, но поврзани преку идентификатори. Овој модел е оптимизиран за пребарување и просторни операции, но не секогаш е природен за „богата“ објектна семантика како во BIM.

2.2.3. Типови на податоци во GIS

GIS работи со повеќе типови просторни податоци:

- Векторски податоци: точки, линии и полигони (и нивни 3D варијанти). Погодни се за дискретни објекти како парцели, оски на патишта, инфраструктурни елементи.
- Растерски податоци: решетки (grid) за континуирани феномени како висински модели (DEM), температури, индекси од далечинска детекција.
- TIN/површински модели: триангулирани нерегуларни мрежи за терен и површини.
- Мрежи и графови (network datasets): за транспорт, водовод, енергетика и анализа

на поврзаност/проток.

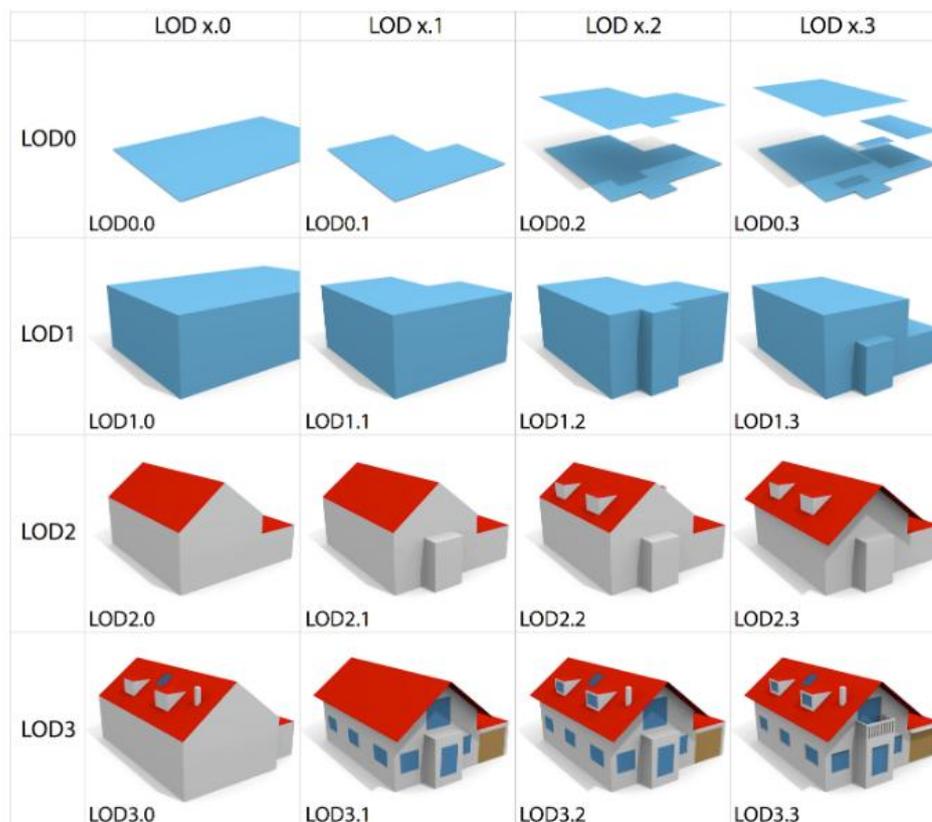
- 3D репрезентации: multipatch/солиди, воксели, 3D tiles, како и облаци од точки (LAS/LAZ) кои стануваат централни во LiDAR-базирани работни текови и 3D градски модели.

Овој спектар на податоци ја прави GIS природна платформа за интеграција на повеќе извори (UAV, LiDAR, теренски мерења, административни регистри), но истовремено наметнува строги правила за геометриска валидност и конзистентност во 3D.

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

Во GIS, „ниво на деталност“ (LoD) најчесто се поврзува со размер, генерализација и апликативна намена. За 3D градски модели, широко е прифатен концептот на CityGML LoD0–LoD4 (Kolbe, 2009; Gröger & Plümer, 2012), каде што:

- LoD0/LoD1 претставуваат поедноставени волумени/терен и екструдирани блокови,
- LoD2 додава кровни форми и поосмислена надворешна геометрија,
- LoD3 воведува детални фасади и архитектонски елементи,
- LoD4 (во традиционалната рамка) вклучува и ентериер/простории (во понови работни текови ова често се разгледува и преку IndoorGML).



Слика 2.4. Нивоа на деталност во GIS. Извор: Biljecki et al., 2016

Клучно е дека GIS-LoD не е истото што и BIM-LoD: BIM-LoD зборува за доверливост и проектна зрелост на елементот, додека GIS-LoD зборува за степен на генерализација и

репрезентација за одредена анализа/визуелизација (Biljecki et al., 2016). Овој концептуален јаз е една од причините зошто BIM-GIS интеграцијата бара јасни правила за трансформација: кои BIM елементи да се задржат, кои да се агрегираат и како да се зачува семантиката без да се наруши 3D валидноста.

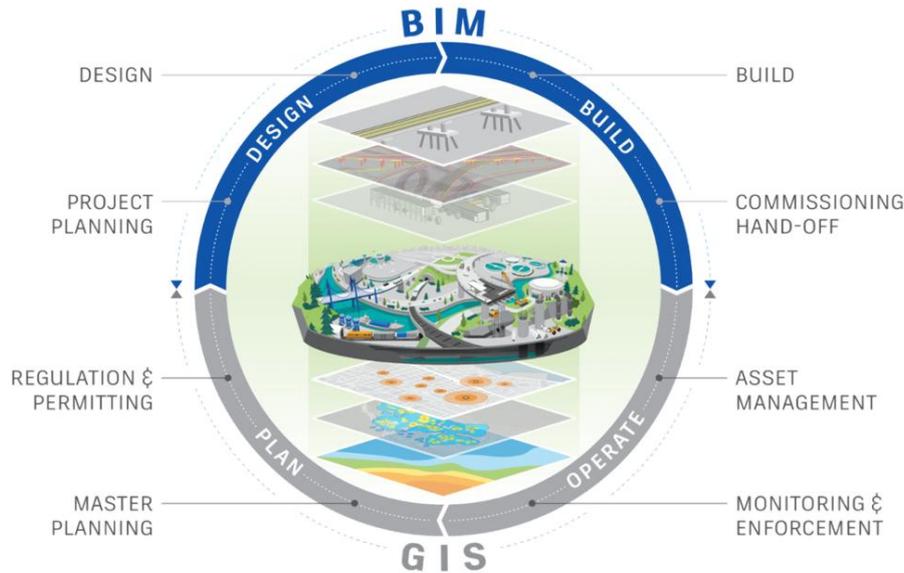
2.2.5. Ограничувања и предизвици на GIS

GIS системите, и покрај зрелоста, имаат ограничувања релевантни за 3D моделирање и интеграција со BIM:

- 3D топологија и валидност: 3D модели бараат затворени солиди, неконфликтни површини и строга валидност—услови кои не секогаш се исполнети при реални податоци или конверзии од BIM/скенирања.
- Семантичка плиткост кај класични GIS модели: традиционалните GIS слоеви често имаат ограничена семантика споредено со BIM (на пример, „објект“ како полигон со неколку атрибути), што е предизвик за моделирање на комплексни градежни системи.
- Хетерогеност и квалитет на податоци: GIS интегрира многу извори со различна точност, резолуција и временска ажурност; неопределеноста и несигурноста директно влијаат врз анализите и заклучоците.
- CRS, трансформации и вертикални датумски системи: грешки во геореференцирање, особено во висинска компонента, се критични за 3D катастар, поплави, видливост и урбани анализи.
- Скалабилност и перформанси во 3D: реалистични градски модели и облаци од точки бараат специјализирани индекси, 3D-tile структури и оптимизации за складирање и споделување.

2.3. Споредбена анализа на BIM и GIS

BIM и GIS претставуваат две технолошки решенија за моделирање и управување со просторни податоци кои користат геометрија и атрибутни податоци како основа за дигитална репрезентација на објектите. Иако двете технологии работат со просторни податоци, тие се развиени за различни домени и цели, што резултира со разлики во концептуалната рамка, моделите на податоци, методите на репрезентација и нивната примена. Со цел јасно разграничување на нивните карактеристики, ограничувања и области на примена, извршено е систематско споредување на BIM и GIS технологиите, што претставува основа за понатамошна анализа и нивна интеграција.



Слика 2.5. Домени на дејствување на BIM и GIS. Извор: <https://blogs.autodesk.com/infrastructure-reimagined/BIM-GIS-integration-smarter-designs-better-outcomes/>

Споредбата на BIM и GIS технологиите може да се изврши преку повеќе аспекти, со цел целосно согледување на нивните карактеристики и разлики. Анализата може да се базира на концептуалната рамка и доменската ориентација на системите, моделите на податоци и логичката структура, како и на начинот на геометриска и семантичка репрезентација на просторните објекти. Дополнително, споредбата може да се прошири на аспектите на просторна референца, ниво на деталност, аналитички и функционални можности, како и применетите стандарди и формати за размена на податоци. Ваквиот повеќекритериумски пристап овозможува систематска и структурирана споредбена анализа од теоретски и технички аспект.

Со цел систематско прикажување на разликите помеѓу BIM и GIS, Табела 2.1 ја презентира нивната споредбена анализа во однос на различните аспекти на споредба.

Табела 2.1. Компарација на BIM и GIS

Аспект на споредба	BIM	GIS
Концептуална рамка	Објектно ориентиран систем за параметарско моделирање на градежни објекти и нивните составни елементи низ животниот циклус.	Просторно ориентиран систем за управување, анализа и визуелизација на геореференцирани податоци во поширок просторен контекст.
Фокус	Детален модел на објект	Просторен контекст
Домен на примена	Проектирање, координација, изведба и управување со објекти.	Просторно планирање, анализа, мониторинг и донесување одлуки.

Модел на податоци	Објектно-ориентиран модел со јасна хиерархија и релации помеѓу елементите.	Feature-based модел со тематски слоеви и атрибутни табели.
Геометриска репрезентација	Параметарска геометрија со висока геометриска точност.	Точки, линии, површини, 3D елементи оптимизирана за просторна анализа.
Просторна резолуција	Ниво на деталност достигнува сантиметарска или милиметарска прецизност	Резолуцијата зависи од просторниот модел (0.1-1 m за LiDAR, 10-30 m за сателитски снимки).
Просторна референца	Претежно локални координатни системи поврзани со проектната локација.	Глобални или проектирани координатни системи.
Семантичка структура	Семантиката е интегрален дел од моделот преку параметри и својства на објектите.	Семантиката е организирана преку атрибутни табели поврзани со просторните објекти.
Ниво на развиеност/деталност	Високо ниво на деталност (LOD 300-500).	Прилагодливо ниво на деталност (LoD0-LoD4).
Аналитички можности	Конструктивни, енергетски и технички анализи на објектно ниво.	Просторни, статистички и мрежни анализи на повеќеслојни податоци.
Размер и опфат на анализата	Објект и комплекс.	Парцела, населба, град, регион.
Стандарди и формати	IFC (ISO 16739), RVT, COBie.	CityGML, GML, GeoPackage, OGC стандарди.
Типична употреба на податоците	Детална техничка документација и управување со објекти.	Просторна анализа, планирање и поддршка на политики.
Ограничувања (теоретски аспект)	Ограничен просторен контекст и аналитички функции на поголеми размери.	Ограничена конструктивна и геометриска деталност на објектно ниво.

Концептуалните разлики помеѓу BIM и GIS произлегуваат од нивната основна намена и доменска ориентација. BIM се заснова на објектно-ориентиран пристап каде примарна цел е дигиталната репрезентација на поединечни објекти, додека GIS е заснован на просторен концепт, при што примарен фокус е просторната локација и просторните односи помеѓу различни феномени во дефиниран координатен референтен систем. Може да се каже дека BIM го третира просторот како внатрешна компонента на објектот, додека GIS го третира објектот како елемент во рамките на географскиот простор. Оваа концептуална разлика ја дефинира нивната различна примена, но и ја поставува основата за нивно заемно дополнување во комплексни просторни апликации.

BIM како модел кој обезбедува висока геометриска прецизност и детална семантичка репрезентација на конструктивните и функционалните елементи на објектите наоѓа примена во доменот на проектирање, координација, изведба и управување со

градежни објекти. GIS, од друга страна, се применува во доменот на просторно планирање, управување со земјиште, инфраструктурни системи и анализа на просторни појави, каде што примарна улога има просторниот контекст и аналитичката обработка на податоците на различни размери. Нивната комбинирана употреба овозможува поцелосно разгледување на објектите како дел од поширокиот просторен систем.

Разликите во концептот на двете технологии се одразуваат во нивните модели на податоци. BIM се заснова на објектно ориентиран модел на податоци со јасно дефинирана хиерархиска структура, во кој секој градежен елемент е моделиран како поединечен објект со сопствени својства, параметри и логички релации со другите елементи во моделот. Овие релации, се интегрален дел од моделот и овозможуваат конзистентно управување со информациите низ различни фази од животниот циклус на објектот. GIS, од друга страна, користи feature-based модел на податоци, во кој просторните објекти се дефинирани како географски карактеристики со геометрија, атрибути и просторна референца. Податоците се организираат во тематски слоеви, а односите помеѓу објектите се воспоставуваат преку атрибутни табели и експлицитно дефинирани просторни и тополошки правила.

BIM моделите се погодни за детална репрезентација и техничка анализа на објекти, додека GIS моделите обезбедуваат ефикасна репрезентација и анализа на просторни информации во поширок просторен контекст.

Геометриската репрезентација претставува една од клучните разлики помеѓу BIM и GIS технологиите и е директно поврзана со нивните концептуални и податочни модели. Во BIM, геометријата се базира на параметарска репрезентација, при што градежните елементи се моделираат како тродимензионални објекти со дефинирана форма, волумен и конструктивна логика. Геометриските форми се создаваат преку параметри и правила, што овозможува висока геометриска точност и конзистентност при измена на моделот. Во GIS, геометриската репрезентација се заснова на користење точки, линии, полигони и 3D елементи чија основна улога е да ја опишат локацијата, обликот и просторниот однос на географските објекти.

BIM геометријата е „прецизна и конструктивна“, додека GIS геометријата е „аналитичка и генерализирана“ (El-Mekawy et al., 2012).

Степенот на деталност на геометриската репрезентација на просторните објекти се определува преку просторната резолуција. Кај BIM таа е поврзана со параметарската геометрија и нивото на развиеност на елементите, додека кај GIS е експлицитно дефинирана преку степенот на генерализација и резолуцијата на просторните податоци.

Со цел да се обезбеди просторна точност и интероперабилност на податоците, основен принцип на кој се темели GIS е просторната референца која се реализира преку употреба на глобални или проектирани координатни референтни системи. Секој просторен објект е геореференциран, што овозможува интеграција на податоци од различни извори, просторна анализа и споредливост на податоците. Спротивно на ова, кај BIM точната локација на објектите во просторот не е од примарно значење, па се потпираат на локалната просторна ориентација, каде геометриските објекти најчесто се дефинираат во локален координатен систем поврзан со проектната локација, при што фокусот е ставен на релативната позиција и точноста на конструктивните елементи.

Споредба меѓу двете технологии може да се направи и врз основа на семантичка репрезентација. Таа се однесува на начинот на кој значењето, својствата и релациите на просторните објекти се дефинираат и организираат во рамките на BIM и GIS системите. Иако и двете технологии користат атрибутни податоци за опис на објектите, нивниот пристап кон семантиката се разликува во зависност од концептуалниот модел и доменот на примена.

Во BIM, семантиката е интегрален дел од објектниот модел и е тесно поврзана со параметрите, својствата и типологијата на градежните елементи. Секој објект содржи богата семантичка структура која ги опишува неговите физички, функционални и технички карактеристики, како и релациите со други објекти во моделот.

Во GIS, семантичката репрезентација се реализира преку атрибутни табели и тематска класификација на просторните објекти. Семантиката е организирана на ниво на слоеви и класи, при што акцентот е ставен на описот на просторните феномени и нивните односи, наместо на деталната внатрешна структура на објектите.

Нивото на геометриската и семантичката сложеност на моделите во BIM и GIS се изразува преку нивото на развиеност односно деталност (LOD/LoD). Иако во двата домени се користи истиот термин, неговото значење, примена и терминологија се разликуваат.

Во BIM, Level of Development (LOD) се однесува на степенот на развиеност и сигурност на елементи на моделот во однос на нивната геометрија, позиција и семантички податоци. LOD концептот опфаќа нивоа од концептуална репрезентација до детални модели погодни за изведба и управување, при што секое ниво LOD100 - LOD500 се однесува за јасно дефинирана точност и употребливост на податоците во различни фази од животниот циклус на објектот.

Во GIS, Level of Detail (LoD) се користи за да се опише степенот на геометриска и тематска генерализација на просторните објекти, најчесто во контекст на 3D градски модели и просторна визуелизација. Овој концепт овозможува репрезентација на ист објект на различни нивоа на апстракција LoD0 - LoD4, зависно од размерот и целта на анализата, при што фокусот е ставен на просторниот контекст, а не на конструктивната деталност.

Важен аспект во споредбата на BIM и GIS технологиите се нивните аналитичките можности кои се директно поврзани со нивните концептуални и податочни модели. Иако и двете технологии поддржуваат одредени форми на анализа, типот и обемот на аналитичките функции значително се разликуваат.

Во BIM, аналитичките функции се насочени кон објектно ориентирани и технички анализи, како што се проверка на судири помеѓу елементи, конструктивни анализи, енергетска ефикасност и симулации поврзани со фазите на проектирање и изведба. Во GIS, аналитичките можности се фокусирани на просторна и тематска анализа, вклучувајќи операции како преклопување на слоеви, анализа на близина, мрежни анализи и просторна статистика. GIS анализите се оптимизирани за обработка на големи количини просторни податоци и за идентификација на просторни обрасци и односи во поширок географски контекст.

Согласно нивните аналитички можности, BIM првенствено е ориентиран кон анализи со ограничен просторен опфат, најчесто на ниво на поединечен објект, дел од

објект или објектен комплекс, додека GIS овозможува анализи со значително поширок просторен опфат, притоа опфаќајќи парцели, населби, урбани целини, региони или држави.

Анализите кај BIM се изведуваат на микро-размер, со висока геометриска и семантичка деталност, што овозможува прецизно разгледување на конструктивните, функционалните и техничките карактеристики на објектите. Анализите кај GIS се изведуваат на среден и макро-размер, при што фокусот е ставен на просторните односи, дистрибуции и обрасци во поширок географски контекст, а деталноста на поединечните објекти е подредена на целокупниот просторен опфат.

Стандардите и форматите за размена на податоци имаат клучна улога во примената и меѓусебната употребливост 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.

Во BIM доменот, доминантен меѓународен стандард за размена на податоци е IFC, дефиниран со ISO 16739. IFC овозможува објектно ориентирана, параметарска и семантички богата репрезентација на градежните елементи, нивните својства и релации, со цел интероперабилност помеѓу различни BIM софтверски платформи. Покрај IFC, се применуваат и формати како COBie, кои се насочени кон структурирана размена на податоци релевантни за управување, одржување и експлоатација на објектите.

Во GIS доменот, стандардите главно се развиени во рамките на ISO 191xx серијата и OGC. Овие стандарди го дефинираат начинот на просторна референца, геометриска репрезентација и тематска организација на податоците. Формати како GML, CityGML и GeoPackage овозможуваат размена на географски и 3D просторни податоци со експлицитна просторна референца и дефинирани просторни и тополошки односи, што е основа за просторна анализа и интеграција на податоци од различни извори.

Анализата укажува дека BIM и GIS функционираат врз различни принципи на организација и интерпретација на просторните информации, што е резултат на нивната различна доменска ориентација. BIM ја структурира информацијата околу градежниот објект и неговите својства, додека GIS ја организира информацијата околу географскиот простор и просторните односи. Ваквата разлика не претставува ограничување, туку создава услови за заемно дополнување, при што деталноста на BIM и просторниот контекст на GIS обезбедуваат комплементарна основа за примена во комплексни просторни и управувачки системи. Нивната интеграција во комплексни просторни системи ја нагласуваат 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 процесна дисциплина. Двата домени користат различни модели на податоци, различни координатни системи и различни нивоа на деталност, што ја прави нивната поврзаност невозможна. Ова се должи на фактот што BIM и GIS традиционално се развиваат како два различни технолошки екосистеми: BIM со фокус на инженерството, моделите и конструкцијата, а GIS кон просторната анализа, базите на податоци и инфраструктурното управување. Без стандардизиран механизам за комуникација, овие системи би останале „информациски острови“ со ограничена употребливост и значителни пречки во интеграцијата (Noardo et al., 2020).

Како резултат на тоа, 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 информациите. На тој начин се постигнува интероперабилност меѓу двата системи и се овозможува податоците генерирани во BIM контекст да се интегрираат во просторни системи без губење на точност, конзистентност или функционалност и обратно, GIS моделите да се користат како референтен просторен контекст во BIM апликации.

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 доменот, 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 се однесува на способноста различни софтверски системи, формати и работни средини да разменуваат податоци и притоа тие податоци да можат конзистентно да се протолкуваат и практично да се употребат за конкретна задача. Во литературата ова најчесто се нагласува како премин од „споделување датотека“ кон „споделување значење“: податоците не треба само да се префрлат од една околина во друга, туку и да останат функционални за пребарување, филтрирање, просторни операции и извлекување заклучоци (Liu et al., 2017; Song et al., 2017; Zhu & Wu, 2022).

Во пракса, интероперабилност значи дека истиот објект ќе може да се препознае, позиционира и анализира без да се изгуби неговиот идентитет и улога во целната апликација (Noardo et al., 2020). За да се појасни на што точно се однесува интероперабилноста, во GeoBIM таа се разгледува на повеќе нивоа, а најчесто како синтаксичка, семантичка и процесна/организациска.

Синтаксичката интероперабилност се однесува на тоа дали податоците може технички да се прочитаат и префрлат (формат, структура, кодирање), 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 (организациска) 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 (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020; Zhu & Wu, 2022).

Важно е да се напомене дека овие аспекти не се заменливи, туку се комплементарни една со друга, можно е да се постигне синтаксичка размена, а сепак да се пропушти семантичката и процесната употребливост (моделот е невалиден, неусогласен или не може повторливо да се ажурира).

Иако преминот меѓу BIM и GIS главно изгледа како техничко прашање—дали датотеката може да се отвори и прикаже во друга средина, 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 опишување на објектот, додека GIS е ориентиран кон просторна анализа, тематска организација и управување со база на податоци. Како резултат, 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 LoD/LOD 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 информацијата. BIM (преку IFC) 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 класи. 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. Прегледните студии 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 е геометријата и нејзината формална валидност во 3D GIS. 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, GIS моделите најчесто бараат јасно дефинирани површински елементи и затворени тридимензионални објекти со тополошка коректност, (затвореност, површини кои меѓусебно не се судираат, без 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 алатките 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 на апсолутно „без загуба“ пренесување на сите детали, туку на минимална и контролирана загуба во однос на целната намена. Тоа значи дека при конверзија (на пр. IFC→CityGML/GIS) приоритетно се зачувуваат геометриската валидност, клучните семантички класи и основните односи/атрибути што се потребни за анализа, пребарување и поврзување со надворешни регистри, додека секундарните детални информации може 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 целиот 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 детализација, туку 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 ја оневозможи валидацијата или да доведе до неконзистентни резултати при последователни просторни операции.

Третата група препреки се однесува на геореференцирањето и усогласувањето на LoD/LOD. BIM моделите многу често се создаваат во локален координатен систем (или со непотполни информации за позиционирање), додека GIS бара експлицитен координатен референтен систем и конзистентна висинска референца. GeoBIM benchmark резултатите покажуваат дека токму тука се јавуваат варијации меѓу алатки и работни текови—особено околу читање/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/LOD мора 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/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 функционираат како „мост“ меѓу домените: тие обезбедуваат заеднички структури и правила врз кои може да се дефинираат трансформации кои може да се повторуваат, семантички мапирања и QA/QC проверки, така што интеграцијата да може да се провери и да се одржува 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 информациите за објектите и просторот се структурираат, именуваат, кодираат и разменуваат меѓу различни системи. Тие 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 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 (Argyrou 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 време, 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 (Liu et al., 2017; Zhu & Wu, 2022).

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 (Argyrou 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 микро-ниво и ја формализираат инженерската семантика, просторната структура и атрибутите—најрепрезентативен пример е IFC како ISO стандард (International Organization for Standardization, 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 придимензионално моделирање на урбаната средина, преку кој се дефинираат класи, атрибути и просторни односи

на објектите во градот.

- 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 (Sun et al., 2019).

Спецификации за сервиси и рамки за просторна референца и квалитет (OGC/ISO) обезбедуваат механизми за публикување и размена преку сервиси, како и правила за координатна референца, валидација и QA/QC. Без овие елементи, дури и „точна“ конверзија може да биде непрактична: моделот ќе се прикаже, но нема да може да се проверува и употребува на конзистентен начин 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 алатки и ја намалува зависноста од еден производител, особено кога податоците треба да се архивираат и повторно да се употребуваат низ повеќе години. Затворените стандарди, иако често се оптимизирани за конкретни платформи, може да внесат ограничувања во размената и во проверувањето 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) 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 информации може контролирано да се трансформираат и да се поврзат со GIS средина, што понатаму ќе биде клучно и за дискусијата за CityGML и за техниките на интеграција.

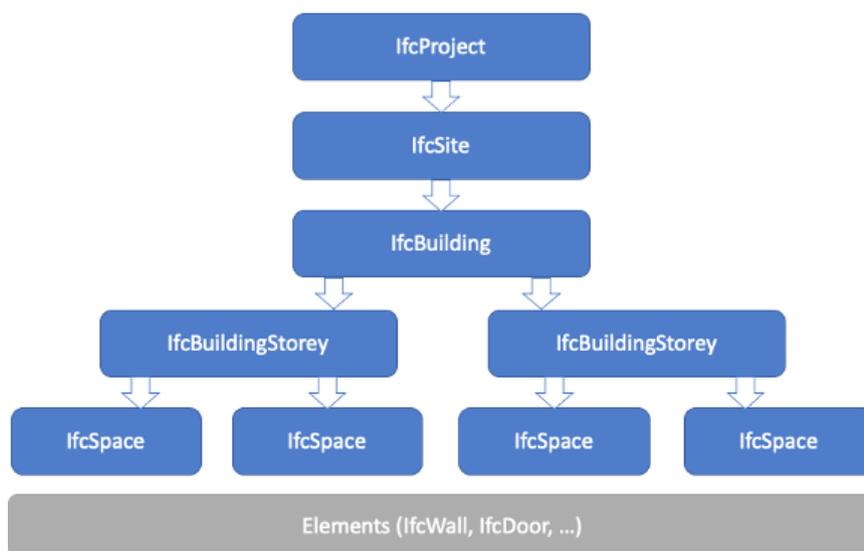
3.3. IFC како основен BIM стандард за BIM-GIS интеграција

IFC (Industry Foundation Classes), стандардизиран како ISO 16739-1:2024, се смета за основен „јазик“ на openBIM затоа што обезбедува неутрална и независна од производител шема за размена и споделување информации за објекти и инфраструктура низ целиот животен циклус (проектирање, градба, 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 (ISO, 2024).

Моќта на IFC произлегува од тоа што не стандардизира само „форма“, туку објектно-ориентирана семантика и односи. Шемата ги опишува објектите (на пр. елементи, простори, системи), нивните карактеристики и меѓусебни релации, а паралелно поддржува и Property Sets/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 преку различни софтверски екосистеми (buildingSMART International, n.d.).

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/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). Оваа хиерархија е прикажана на Слика 3.1, која 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 модели 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 целосно „без загуба“ ретко е возможно, 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 алатки е важен чекор во BIM–GIS работните текови. GeoBIM проектите и 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 Oñori 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 ревизија, ажурирање и споредување на верзии во GIS средина.

3.4. CityGML како основен GIS стандард за 3Д модели на урбани средини во BIM-GIS интеграција

CityGML е OGC стандард наменет за моделирање, размена и анализа на тридимензионални објекти во GIS средина, при што воспоставува унифицирана шема за репрезентација на објектите со јасна тематска класификација (на пр. Building, Transportation, Vegetation), просторни односи и семантички структури погодни за просторни операции и анализи на урбани средини (Gröger et al., 2012; Open Geospatial Consortium [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 et al., 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 (на пр. 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, како и 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 et al., 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/тела и правилни гранични површини, особено кога целта е повисока LoD репрезентација (на пр. близу до LOD3) (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/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 во GeoBIM.

Табела 3.1. Споредба на IFC и CityGML

Стандард / спецификација	IFC (ISO 16739)	CityGML (OGC)
Домен	BIM / AEC	3Д GIS / Модели на урбани средини
Што носи (што стандардизира)	Инженерска семантика (класи и релации), просторна структура (site-building-storey-space), атрибутен модел (Property Sets), детална геометрија на елементи	Објектен модел со тематска класификација, просторен контекст, LoD концепт за урбано ниво, структурирани површини/обвивки
Интероперабилност што ја поддржува	Размена на BIM модели меѓу алатки; основа за трансформација во GIS/CityGML преку мапирање на геометрија и атрибути	Интероперабилност на 3Д урбани модели во GIS; поддршка за анализа, визуелизација и сервиси на урбано и регионално ниво
Релевантност за 3Д катастар	моделирање на „внатрешни“ просторни единици (простории/зони) и податоци релевантни за 3Д катастар и управување со објекти (International Organization for Standardization, 2024; Sun et al., 2019)	Контекстуални проверки и интеграција со урбани/катастарски слоеви; погоден за надземна репрезентација и просторни анализи (Gröger et al., 2012; OGC, 2021)

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 микро-ниво, 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 (International Organization for Standardization, 2024; Liu et al., 2017). CityGML, напротив, е изразено макро-ниво: 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 et al., 2012; OGC, 2021). Оттука, тие не се конкурентни стандарди, туку комплементарни – едниот обезбедува детална инженерска и внатрешна репрезентација, а другиот обезбедува урбан контекст и 3D GIS рамка.

За 3D 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 градско ниво (Sun et al., 2019). Во практика, преминот меѓу нив се реализира преку техники за трансформација и семантичко мапирање, поткрепени со QA/QC, што е и причината зошто стандардизацијата сама по себе не е доволна: потребни се јасни работни текови и критериуми за валидност и конзистентност (Arroyo Ohori et al., 2018; Noardo et al., 2020).

Сумирано, стандардите во GeoBIM 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/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 прегледните истражувања кои укажуваат дека BIM-GIS интеграцијата не е единечен чекор, туку збир од комплементарни постапки 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 прегледните истражувања, иако терминологијата меѓу авторите варираат (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:

Податочно ниво (data-level): се решава „како“ податоците да станат употребливи во целиот домен преку трансформација на геометрија, организација на атрибути и добивање структури погодни за GIS операции; токму 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/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/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 на значење 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).

Пред да се разгледа секоја група поединечно, 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/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 3Д 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 референтни 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 CRS,
- поставување параметри за трансформација (поместување, ротација, примена на фактор на размер каде што е потребно) и
- проверка преку референтни точки како на пример, градежни контури (footprints), контролни точки или други независни извори што овозможуваат да се детектира и коригира систематско поместување (Diakit  & Zlatanov, 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 3Д 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 дупликати што би предизвикале проблеми кај 3Д операции. GeoBIM 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 (Agoyo Ohoji et al., 2018). Од тука произлегува потребата валидацијата да не се третира како еднократна проверка, туку како контролирана серија тестови со јасни критериуми за прифаќање.

Практично, QA/QC 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).

Pre-processing и post-processing како итеративна контрола

Просторната усогласеност и контрола на квалитет може да се разгледуваат како две комплементарни фази, пред-трансформациона (pre-processing) и пост-трансформациона (post-processing), бидејќи проблемите се појавуваат и „пред“ и „по“ конверзијата. Во pre-processing фазата 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 дупликати, очигледно искривена геометрија или неконзистентни поставки). Со тоа се обезбедува „чист податок за влез“ и се избегнува сценариото каде GIS проблемите всушност потекнуваат од недоследни почетни параметри.

Post-processing фазата 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/или 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. footprint или контролни точки). Според резултатите од GeoBIM Benchmark, токму ваквите работни текови – со подготовка, проверка и документирано известување – се покажуваат како најстабилни, бидејќи ја намалуваат

варијабилноста на резултатите меѓу различни 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 (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020; Zhu & Wu, 2022).

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/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/класи што директно поддржуваат операции: обвивка, кров, фасади, отвори, простории, конструктивни елементи или функционални зони—во зависност од задачата. Тука се јавуваат две типични стратегии: (i) агрегација, каде повеќе BIM елементи се претставуваат како една GIS единица (на пр. за ниво на урбани средини) и (ii) 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 LoD/LOD 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 LoD 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 (најчесто 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 алатки можат различно да ја интерпретираат IFC геометријата. GeoBIM benchmark резултатите 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/теселација → тематско раслојување и атрибутен минимум → валидација на излезот → вчитување во GIS структура што ја прави методологијата транспарентна и споредлива меѓу различни студии на случај.

Иако трансформацијата на ова ниво формално не е „семантички“ 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: 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 *schema mapping*: се дефинира кои IFC ентитети и Property Sets се пресликуваат во кои GIS/City model 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 LoD/LOD: ист BIM елемент може да е преситен за ниво на урбани средини, но критичен за внатрешна структура или за катастарска интерпретација. Тука 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 (на пр. преку правила и граматика за пресликување), но истовремено се признава дека „целосно без загуба“ е ретко реалистично и треба да се контролира според случајот на употреба (Stouffs et al., 2018).

Кога целната апликација бара повеќе значење од тоа што го нуди стандардната целна шема, се користи посредување преку референтни модели/онтологии или систематизирани правила (на пр. референтна онтологија/медијатор за врзување на IFC и CityGML концепти), со што се прави пресликувањето поексплицитно и полесно за одржување (El-Mekawy & Östman, 2010).

Во контекст на 3Д катастар, семантичкото усогласување е пресудно затоа што „просторните единици“ не се само геометрија, туку носители на функционално/административно значење: 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/сервисна интеграција (*system/service-level*)

Системската/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/модел-сервер, додека GIS претставувањата и аналитичките слоеви се управуваат во просторна база 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 искуствата и 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 алатки и работни текови (Arroyo Ohori 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, системи за управување со средства), каде што моделите не се користат само за преглед, туку како дел од поширок информациски екосистем (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 системско/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 информации меѓу различни системи; улогата на отворените стандарди—пред сè IFC и CityGML—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 хоризонтална основа за доверливи резултати (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020; Stouffs et al., 2018). Следниот дел е посветен на главните домени каде интегрираниот BIM-GIS систем има најголема практична вредност, преку обезбедување единствена основа за просторни анализи, визуелизација и поддршка на одлучувањето.

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 таков контекст, традиционалната поделба помеѓу BIM, кој доминира со детален инженерски и архитектонски опис на објектите, и GIS, кој ги управува просторните, контекстуални и територијални податоци, станува недоволна за да ги задоволи барањата на современото дигитално општество. Иако секоја технологија оперира во свој длабоко специјализиран домен, потребата за нивно поврзување произлегува од фактот дека ниту еден инженерски или урбанистички процес не е изолиран од просторот и неговите зависности (Bielecki et al., 2015).

Потребата за BIM-GIS интеграција е засилена од трендовите на глобална дигитална трансформација, развојот на дигитални близнаци, автономни инфраструктури, паметни градови и 3Д катастарски системи. Овие концепти бараат постојано ажурирани, просторни и семантички поврзани модели кои може 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 технички, правни и процеси за управување. Овие домени вклучуваат урбанизам и просторно 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.

Дополнително, интегрираниот модел ја овозможува и анализата на сенки и соларни потенцијали, што е клучно за процена на енергетските можности на објектите, оптимизирање на поставување на фотоволтаични системи и оценување на влијанието на околината. Овие симулации се поддржани од современи 3Д GIS платформи кои работат со реално време на сончева позиција 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 рутини. Овие симулации се базираат на топологијата и структурните својства на објектот, што овозможува реалистично сценарио на движење на вода, чад, топлина или луѓе (Zhou et al., 2020).

Една од најважните можности е 3Д визуелизацијата и навигацијата, каде корисниците можат да ги истражуваат просторите, структурите и околината во реалистичен, геореференциран контекст. Ваквите визуелизации претставуваат важна поддршка за архитектонско планирање, мониторинг врз објекти, истражувачки цели и комуникација помеѓу засегнати страни. GIS околината исто така овозможува прецизни пресметки на волумени, површини и просторни односи, со што се отвораат можности за

квантитативни анализи кои се особено важни во 3Д катастар, енергетска ефикасност и моделирање на урбани средини.

Особено значаен домен е 3Д катастар, кој станува суштински за современите урбани средини со комплексни вертикални и подземни структури. Точната тродимензионална репрезентација на правата, ограничувањата и одговорностите 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 инфраструктура 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 информации за геометрија, материјали, височини, 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 информирање одлучување.

Интегрираниот BIM-GIS пристап исто така овозможува полуавтоматизирана проверка на усогласеност со урбанистичко-планската документација. Параметри како висински ограничувања, регулациони линии, максимална дозволена густина и функционална намена може 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 височина и климатски услови, комбинирани со BIM параметрите за геометрија на објектот, овозможуваат изработка 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). Ова поддржува сценарија за развој кои ја минимизираат пренатрупаноста 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 точни податоци, што води кон повисоко ниво на учество и јавна отчетност. Овие дигитални алатки го модернизираат начинот на кој

урбанизмот комуницира со граѓаните и создаваат услови за по инклузивни процеси на планирање.

Во еден интегриран BIM-GIS систем GIS компонентата обезбедува и веб-базирани 3Д визуелизации, што претставува значајна алатка за транспарентност, јавна комуникација и поддршка при донесување одлуки. Преку веб-платформи како Cesium, ArcGIS Online или Three.js, 3Д моделите можат да станат достапни за локални самоуправи, инвеститори и граѓани, што значително ја зголемува инклузивноста и учеството во урбанистичките процеси.

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.

Интегриран BIM-GIS систем овозможува:

- геореференцирање на инфраструктурните модели,
- поврзување на BIM елементите со просторни слоеви (геологија, хидрологија, ограничувачки зони),
- управување со подземна инфраструктура во 3Д,
- симулации на сценарија за сообраќај, хидраулика, ризици и климатски влијанија,
- оптимизација на траси и трошоци базирани на реалните теренски услови.



Слика 4.1. Интегрирано BIM-GIS решение за сообраќајници и железници

Како резултат, интеграцијата обезбедува повисока точност во проектирањето и значително намалување на ризикот при изведбата.

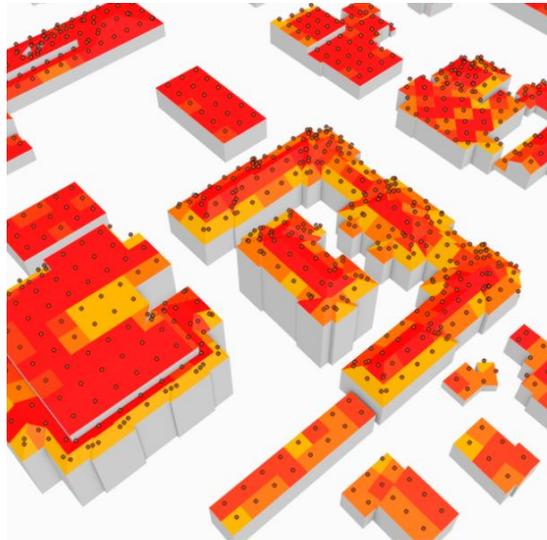
Во контекст на инфраструктура, BIM-GIS моделот може да биде употребен за оптимизација на инфраструктурните системи, вклучително и водоводни, транспортни или енергетски мрежи. Преку мрежните GIS анализи, можно е да се процени капацитетот, пропусноста, ризиците од преоптоварување, како и да се анализираат сценарија за реконфигурација (Sun et al., 2019). Особено значајна е и улогата на тополошката анализа, која опфаќа операции како пресек (intersection), допир (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 град или квартал,
- анализа на соларен потенцијал, ветрови и микроклима,
- процена на ризици од поплави, 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.

4.4. Дигитални близнаци (Digital Twins)

Користењето на BIM во сеопфатен GIS систем претставува основа за развој на т.н. дигитални близнаци. Дигиталниот близнак 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 високо детална, динамичка 3Д репрезентација на една зграда 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 (Khajavi et al., 2019). Благодарение на BIM, системот 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 или присуство. Овие податоци се дополнуваат со временски серии кои го документираат однесувањето на објектот низ време, 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 (Voje 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 податоците за објектите, инфраструктурата, мобилноста, природната средина и урбаните процеси. За разлика од дигиталниот близнак на објект, кој се фокусира на локален инженерски контекст, градскиот дигитален близнак 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 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 катастар

Катастарските 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 отпечатоци врз планот. 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.

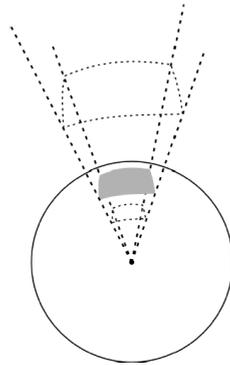
Традиционалните 2Д катастарски системи создаваат ограничувања кои не можат да се надминат со примена на основните принципи на регистрација кои самите ги имаат поставено. Оттука се наметнува потребата од еволуција на катастарските системи и инкорпорирање на модели кои ќе можат да ја претстават недвижноста како просторна единица во три димензии и ќе овозможат јасно разграничување на правата во вертикала. 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. Римскоправниите 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, кое 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 задржало 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 (Stoter et al., 2013).

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“. 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*, познат 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, сè 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 сè поизразени, особено во развиените земји, каде урбаната средина се карактеризира со изградба на сè 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 сè 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, текстуални 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 (на пр., 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, која може да биде корисна за преглед на локацијата, но не ја отсликува реалната просторна комплексност.

Овој проблем станува уште поизразен кога се разгледуваат посебните делови од згради (станови, деловни простории, 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, 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 итн. 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, прикажат правата и ограничувањата. Слично, 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 сооднос на објектите, а следствено на тоа и регистрацијата на правата станува нецелосна, не до крај дефинирана, 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

На крај, ограничувањето на 2Д репрезентацијата се гледа и во неможноста за воспоставување 3Д тополошки односи и автоматизирана валидација. Во 2Д не може сигурно 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.



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. Прво, принципите 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. Второ, самата орто публикација, како основа на 2Д катастарските прикази, воведува значителни рестрикции во разбирањето и анализата на просторните настани, бидејќи овозможува исклучиво хоризонтален поглед на просторот и ја игнорира неговата волуметриска природа. Трето, користењето на одвоени мануели, 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 тродимензионален 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 слика 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. Приспайи за 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 и Lemmen (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. Други автори (Bennett, Kalantari) дополнително дискутираат транзициони сценарија, институционални предуслови и правни импликации предизвикани од премин кон тридимензионални катастарски системи, со цел да се зачува правната сигурност и континуитетот на постојните системи.

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 (на пр. BIM/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 катастар со дополнителни дескрипции (анотации, анекси, дополнување), Хибриден 3Д катастар и Целосен 3Д Катастар. 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, приклучоци) 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 итн.) 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 сл., 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 итн.), при што во катастарската регистрација се внесува 3Д геометријата на самиот објектот 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 катастар

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 длабина, се регистрира просторна единица која прецизно го опфаќа обемот на сопственоста или правото – на пр. волумен на стан, деловен простор, волумен на подземна гаража, волумен на коридор итн.

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

- Комбиниран 2D/3D модел
- 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 итн., 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 LOD и минимален сет на атрибутни податоци,
- формати и интероперабилност (за BIM и 3Д GIS структури), 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 допринесе јасна, детална и недвосмислена регистрација на недвижностите и правата врз нив.

5. АКВИЗИЦИЈА НА ПРОСТОРНИ ПОДАТОЦИ ЗА 3Д МОДЕЛИРАЊЕ

5.1. Ласерска технологија за аквизиција на просторни податоци

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 станал интегрален дел од тоталните станици, каде се комбинираат електронско мерење на растојание и мерењата на агли, што овозможи 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 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. 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 простор. Во современи услови, ласерското скенирање се разви 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 тродимензионално 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 3D координати на површините во опкружувањето.

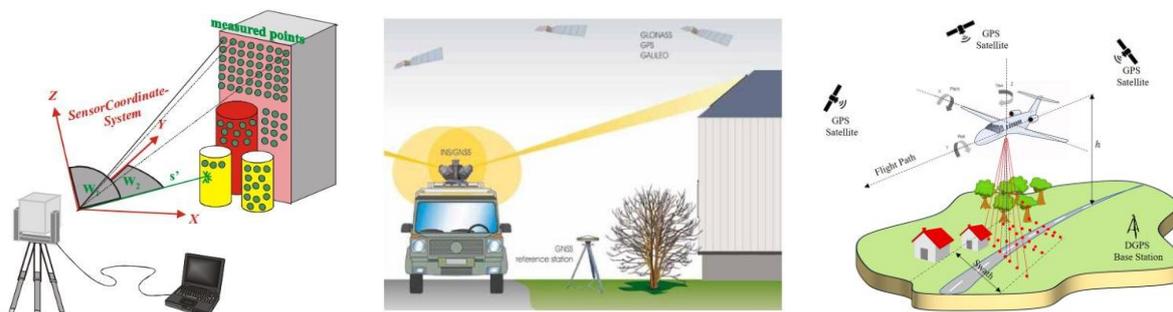
За геодетски цели, ласерското скенирање се реализира преку инструменти и системи кои се состојат од неколку клучни компоненти. Овие компоненти заедно го формираат интегрираниот систем кој ја изведува целокупната операција на мерење. Во основа, секој ласерски скенер, меѓу другото, се состои од:

- 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.

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 ќе бидат дискутирани трите најважни групи:

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



Слика 5.1. TLS vs. MMS vs. ALS

Во продолжение ќе бидат презентирани најпрво компонентите на системите за ласерско скенирање, а потоа секој од презентираниите системи ќе биде подетално разработен. Преку разбирањето на принципите на нивната конструкција, сензорските интеграции и методите за просторна реконструкција, се добива целосна слика за потенцијалите и ограничувањата на ласерското скенирање како современа геодетска технологија.

5.2.1. Основни компоненти на еден ласерски скенер и начин на пресметување на координати на поединечни точки

Современиот ласерски скенер претставува мултисензорски систем кој комбинира оптички, електронски, механички и позиционирачки компоненти со цел да обезбеди автоматизирано, прецизно и густо тридимензионално скенирање на објектите и просторот. Независно дали се работи за терестички (TLS), мобилни (MMS) или системи за скенирање од воздух (ALS), основните функционални елементи на секој ласерски скенер се слични, бидејќи мерењето на растојание, позицијата на инструментот и ориентацијата на зракот се засноваат на истите принципи. Во продолжение ќе бидат претставени основните компоненти на системите за ласерско скенирање како и нивната меѓусебна зависност. Секој дел од системот игра важна улога во формирањето на конечниот резултат, а тој резултат во суштина е голем број на точки добиени со рефлексија на секој испратен поединечен ласерски зрак, и се нарекува облак од точки.

Ласерски извор на светлина

Ласерскиот извор е основната компонента на системот за ласерско скенирање. Тој генерира монохроматски, кохерентен и насочен зрак кој се испраќа кон објектот кој е предмет на опсервација. Кај системите за скенирање, наменети за добивање на просторни податоци, најчесто употребувани се диодните ласери и ласерите со цврста состојба, со бранови должини од 905 nm, 1064 nm или 1550 nm. Изборот на бранова должина е резултат на компромис помеѓу безбедносни фактори, атмосферската пропустливост и рефлективните карактеристики на материјалите (Shan & Toth, 2018). Во импулсните ласерски системи (ToF), ласерот емитува краткотрајни импулси со големина од неколку наносекунди, додека кај фазните системи емитува континуиран модулиран сигнал. Квалитетот на ласерот, неговата стабилност и дивергенција директно влијаат врз дометот и точноста на инструментот (Wehr & Lohr, 1999).

Оптички систем за проекција

Оптичкиот систем за проекција ја дефинира геометријата и патеката на ласерскиот зрак. Овој систем се состои од леќи, огледала, призми и оптички филтри кои го формираат зракот, го колимираат и го насочуваат кон површината на објектот. Кај триангулациските системи, оптичкиот систем често создава линиска проекција, овозможувајќи снимање на цел профил во еден кадар, додека кај класичните терестички ласерски системи (TLS) и системите за снимање од воздух (ALS) зракот се пренасочува од точка до точка.

Оптичката конфигурација во ласерскиот скенер се однесува на целиот сет од оптички елементи, леќи, огледала, призми и филтри, кои го формираат, насочуваат и стабилизираат ласерскиот зрак. За скенерот да биде прецизен, овие елементи мора да бидат поставени и усогласени со многу мала толеранција. Ако се случи најмало физичко поместување или деформација во овие делови, на пример поради промена на температурата (термичка експанзија на материјалот), зракот може да се отклони за мал агол или да го промени својот фокус. Таква мала промена во оптичката патека може да доведе до значајна грешка во пресметаните растојанија или агли, затоа што скенерот ќе „мисли“ дека зракот е испратен во еден правец, а всушност ќе биде испратен во друг.

Оптиката, исто така, ја контролира големината на отпечатокот од зракот (дијаметарот на ласерскиот зрак) кој во суштина е директно зависен од дивергенцијата на

зракот. Овие два параметри влијаат на повеќе карактеристики на скенерот како на пример:

- дали ќе се добие силен и чист повратен сигнал,
- дали скенерот ќе разликува и ќе може да разликува и регистрира повеќе детали од објектот,
- дали повратниот импулс ќе биде остар, јасен или деформиран,
- дали ќе се појават повеќекратни враќања на испратениот импулс.

Со други зборови, ако оптиката не е стабилна, прецизна и добро контролирана, целото скенирање ќе има намалена точност и квалитет. Прецизноста на оптичката конфигурација е од суштинско значење, бидејќи секое нарушување на оптичката патека (на пример, поради термички варијации) може да резултира со грешки во растојанијата и аглиите (Lichti, 2013).

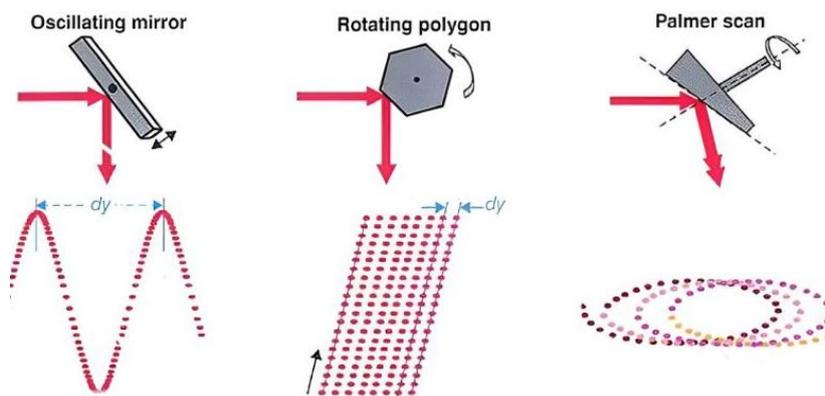
Детектор на повратни сигнали (сензор)

Детекторот е електро-оптичка компонента која го регистрира примениот ласерски сигнал. Кај пулсните системи (ToF), детекторот го регистрира времето на пристигнување на секој импулс врз основа на што подоцна се одредува времето на патување на зракот, додека кај фазните системи ја мери фазната разлика меѓу испратениот и примениот сигнал. Најчести детектори се APD (avalanche photodiodes) и високочувствителни CMOS/CCD сензори.

Квалитетот на детекторот е клучен, бидејќи тој треба да детектира слаби сигнали во услови на шум, ослабен сигнал од атмосферски влијанија и дифузни рефлексии. Карактеристики како спектрална чувствителност, брзина на реакција, електронски шум и динамички опсег директно влијаат на точноста и максималниот домет (Vosselman & Maas, 2010).

5.2.2. Механички систем за скенирање

Механичкиот систем за скенирање го определува начинот на кој ласерскиот зрак се пренасочува низ околината со цел да се опфатат објектите кои се предмет на скенирање. Наместо зракот да биде фиксен, механичкиот скенирачки механизам овозможува контролирано движење на проекцијата на зракот во хоризонтална и вертикална насока, така што секој испратен импулс се насочува кон различна точка во просторот. Во геодетските LiDAR системи најчесто се користат два основни типа механички системи за насочување: ротирачки огледала и полигонални огледала, кои овозможуваат создавање различни модели на скенирање (scan patterns) и покривање на околината со висока густина на точки.



Слика 5.2. Типични механички системи за скенирање кај LiDAR

Ротирачките огледала функционираат така што едно огледало или целата глава на скенерот ротира непрекинато околу вертикална оска, додека второ огледало или механизам овозможува дополнително вертикално отклонување. Овој систем овозможува создавање на 360° хоризонтално скенирање, а вертикалната осцилација го покрива потребниот вертикален опсег. Ротирачките огледални механизми се карактеризираат со стабилност, висока точност на аглите, механичка робусност и повторливост, што ги прави идеални за терестрички ласерски скенери (TLS) каде инструментот е статичен и каде е клучно скенирањето да биде прецизно и рамномерно. Поради нивната стабилност, овие системи создаваат униформни и контролирани траектории, со минимални вибрации и висока точност.

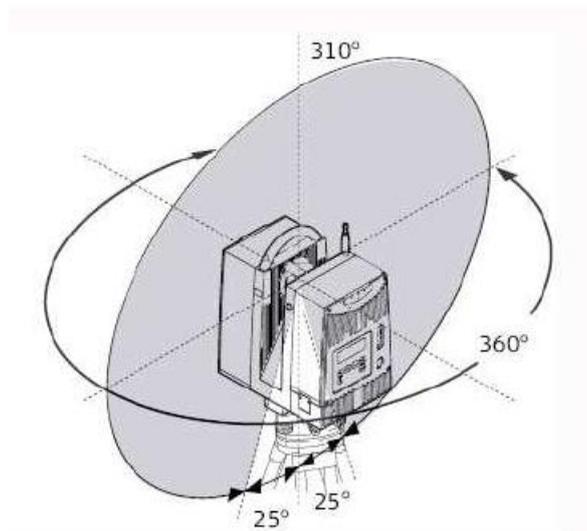
Полигоналните огледала, пак, се состои од тело во форма на многуаголник (петгоаголник, шестоаголник) кој има своја ротациска оска околку која ротира. Кога полигоналното тело ротира со висока брзина, секоја страна на многуаголникот ја дефлектира светлината под различен агол, со што се создаваат многу брзи и повторливи линии на скенирање. Овој тип механизам овозможува илјадници до стотици илјади отклонувања во секунда, што е особено важно кај снимањата од воздух (ALS) и мобилните скенери (MMS), каде платформата се движи со значителна брзина и е потребна висока фреквенција на зрачење за да се постигне доволна густина на податоци. Полигоналните огледала се оптимизирани за динамични услови, но за сметка на ова тие имаат нешто поограничен вертикален опсег во споредба со ротирачките огледала и можат да бидат чувствителни на вибрации и механички нарушувања.

Во компаративна смисла, ротирачките огледала обезбедуваат поголема стабилност и пошироко аголно покривање, што ги прави наменети за статички скенери и ситуации каде геометриската точност е приоритет. Полигоналните огледала, напротив, нудат исклучително висока брзина на скенирање и подеднакви повторливи профили, што е критично во мобилните и воздушните LiDAR системи. Двата механизми претставуваат клучни елементи во различни апликации: ротирачките огледала во TLS системите, а полигоналните огледала во ALS и MMS системите. Соодветниот избор на механизам директно ја определува геометриската стабилност, динамичката изведба и квалитетот на облакот од точки што се добива при ласерското скенирање.

5.2.3. Терестрички лазерски скенер (TLS)

Терестричките лазерски скенери (TLS) претставуваат една од најпрецизните и најстабилните технологии за тридимензионално снимање на објекти и затворени простори кои имаат голема примена во геодезијата, градежништвото, архитектурата итн. TLS системите овозможуваат директна, високо детализирана и геометриски блиска до реалниот модел, репрезентација на физичките структури преку создавање густ облак од точки кој содржи координати и атрибутни податоци за секоја снимана 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 барана голема геометриска прецизност (Vosselman & Maas, 2010).

Терестричкиот лазерски скенер (TLS) претставува најстабилната и најпрецизната категорија од расположливите системи за лазерско 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 онај кој е покриен од постољето и стативот на кој е поставен инструментот. Кога инструментот е поставен на статив, висината на инструментот во однос на теренот изнесува околу 1.5m, а опсегот на скенирање изнесува 270° , тогаш се работи за мал круг со дијаметар од околу 3m околу инструментот кој не е опфатен со скенирањето.



Слика 5.3. Геометрија на видното поле (Field of View) на TLS. Извор: Vosselman & Maas, 2010

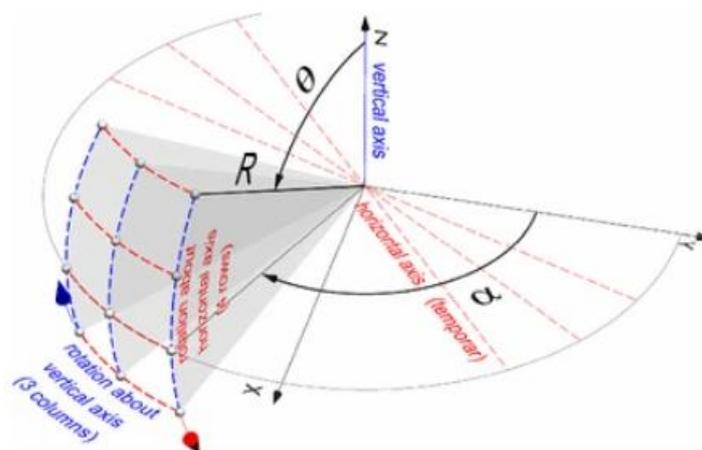
Хоризонтална ротација

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 агловните 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 (Lichti, 2013).

Една од клучните предности на хоризонталната ротација е униформноста во аголната распределба. Со оглед дека TLS инструментите најчесто снимаат во рамномерни аголни чекори, ова овозможува создавање на облак од точки со стабилен просторен распоред. Така, 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 терестичките 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 3D мрежа од точки (Kersten et al., 2018).



Слика 5.4. Шематски приказ на вертикалното отклонување на ласерскиот зрак. Извор: Kersten et al., 2018

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.

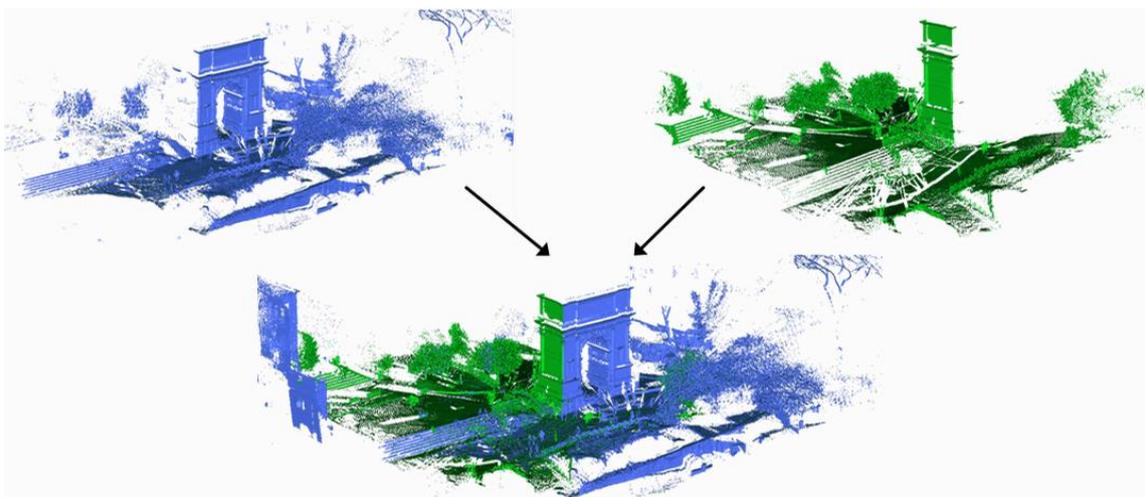
Предностите на можност за вертикално отклонување на терестричкиот скенер се:

- 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 практиката, 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 терестичките 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, подредат, 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 постпроцесинг.

Процесот преку кој повеќе облаци од точки, добиени од различни позиции на инструментот, се спојуваат во една 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, 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 инструменталната 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 3D трансформација (најчесто седумпараметарска Хелмертова трансформација) за усогласување на сите скенови (Soudarissanane et al., 2011). 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.



Слика 5.6. Терестрички ласерски скенер

Конечно, кога објектите, околината која се скенира, нуди доволно геометриски карактеристички еленебти, 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.

5.2.4. 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 5.7. 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 (Inertial Measurement Unit), која го мери забрзувањето и аголната брзина со висока фреквенција од 100 до 500 Hz, обезбедувајќи непрекината информација за roll, pitch и yaw (Grejner-Brzezinska 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 одомерската 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 (Petrie, 2010). 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 наголем 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 (високо-фреквентни, 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 (Glennie, 2007). На тој начин секоја точка добива 3D позиција во глобален координатен систем.

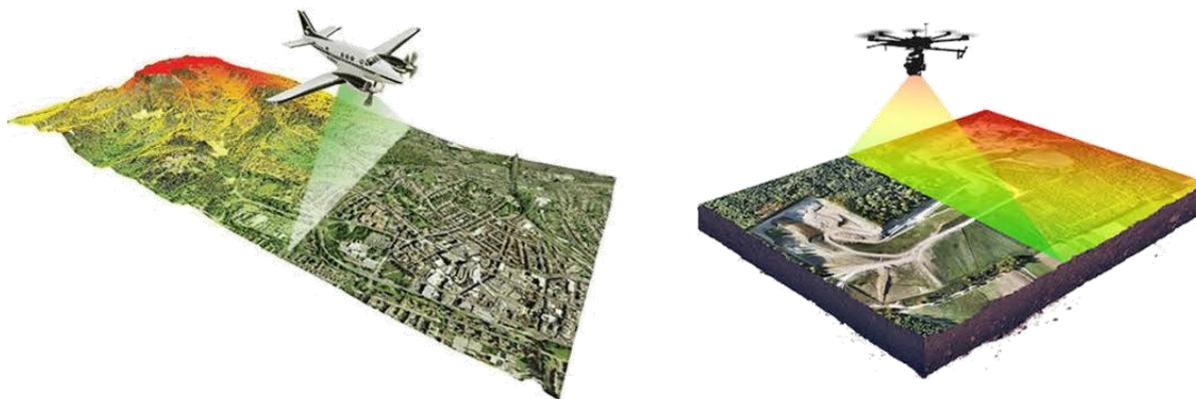
Во идеални услови MMS системите постигнуваат точност од 1–3 cm, што е доволно за голем број инженерски и урбанистички апликации (Puente et al., 2013). Главната предност на MMS, покрај брзината, е континуитетот на снимањето, нема потреба од поставување инструменти, ориентација, одделни скенирачки позиции 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 геопросторен систем кој овозможува високо ниво на деталност и метричка валидност, како што е неопходно за современите BIM, GIS и инфраструктурни апликации.

5.2.5. Авионско ласерско скенирање (ALS)

Airborne Laser Scanning (ALS), или авионското 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 (Wehr & Lohr, 1999). Кога овие пресметки се комбинираат со стабилизирано позиционирање и ориентација на платформата, се добива густ и облак од точки кој опфаќа големи површини со високо ниво на деталност (Baltsavias, 1999).

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 структурни слоеви (Nyuprä et al., 2008). Второ, системот за позиционирање, кој се состои од GNSS антена и приемник за апсолутна локација и IMU единица која ги мери аголните 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).



Слика 5.8. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало

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 3D моделите, подобро класификација на облакот од точки, визуелна инспекција, препознавање на материјали и комбинирана анализа на LiDAR и фотограметрија (Leberl et al., 2010). Здружувањето 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.

Карактеристики на снимањето во ALS

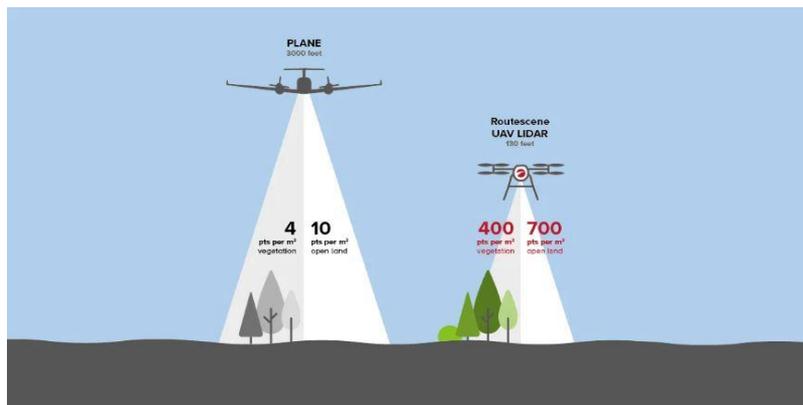
ALS снимањето е дефинирано од неколку клучни параметри како што се висината на лет, брзината на лет, начин на скенирање во смисла на движење на зракот по теренот и аголот на снимање. Повисоките летови овозможуваат поголемо покривање, но помала густина на точки, додека ниските летови овозможуваат густина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

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). Понатаму, 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 (Glennie et al., 2013).



Слика 5.9. LiDAR скенирање од авион и беспилотно летало

Беспилотните летала овозможуваат 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 (Jaakkola et al., 2010). Ниската висина на лет и стабилноста на платформата овозможуваат снимање дури и на мали архитектонски детали кои претходно беа тешко достапни. Паралелно, интеграцијата на високо-прецизни RTK/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 летните линии. 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 (Höfle & Pfeifer, 2007).

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.

5.2.6. 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 осумдесетите години на дваесеттиот век, кога истражувачите од областа на роботиката се обидуваат да го решат проблемот на одредување 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 Hugh Durrant-Whyte и John Leonard, кои го дефинираат концептот во почетокот на 1990-тите и го поставуваат теоретскиот темел на алгоритамот 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 терестичкиот ласерски скенер (TLS), SLAM уредот со движење и скенирање низ просторот или објектот, алгоритамот автоматски ја реконструира траекторијата и околината. Овој метод овозможи 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 GNSS сигнал нема, 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 акумулацијата на грешката на отклонување од 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 јазли.

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 (колони), 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).

Кога облакот од точки би се состоел само од шум, односно од точки од кои неможе да се препознаат карактеристични геометриски облици, системот не би можел да изведе еднозначно локализирање. Затоа 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, Burgard & Fox, 2005).

Како многу круцијален 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 видни 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, 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 на врз основа на облаците од точки ја корегира акумулираната грешка. Оваа фузија најчесто се реализира преку проширени Калманови филтри (EKF) или преку фактор-графови (factor graphs). 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 пресметковната сложеност.

Најголем дел од високопрецизните LiDAR-SLAM системи применуваат хибридна архитектура: а тоа значи дек а се користи feature based SLAM пристапот кој се надополнува до примена на ICP алгоритмот. Feature-based пристапот се користи за глобално усогласување, т.е. за стабилна иницијална регистрација, додека ICP се користи за локално фино подесување, со што се минимизира преостанатата грешка. ICP претставува класичен

и често користен алгоритам за регистрација на облаци од точки. Неговата основна идеја е да се најдат парови „најблиски точки“ меѓу два последователни облаци и да се пресмета ригидна трансформација (ротација и транслација) која го минимизира нивното меѓусебно растојание (Besl & McKay, 1992). Овој метод е прецизен, но бара релативно добар почетен однос меѓу двата облаци од точки. Дополнително, ICP е побавен и помалку робуствен во сцени со малку геометриски детали или значителен шум. Овој пристап ги комбинира предностите на двата методи – брзина, стабилност и висока прецизност – овозможувајќи SLAM да функционира и во сложени ентериерни и екстериерни сценарија (Liu et al., 2021).

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 et al., 2018).

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

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

Резултатот од еден вакив принцип на работа и алгоритамска конструкција е драматично подобрување на точноста и консистентноста на целиот модел. Просторно 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, тогаш SLAM решението може да биде директно референцирано во државен или глобален координатен систем (ДКС, ETRS89). 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, габаритни површини и комплексни 3D структури, особено кога се комбинираат со TLS и UAV LiDAR за целосна реконструкција на објектот.

Современите SLAM системи донесоа една од најзначајните промени во аквизицијата на просторни податоци во последните две децении. Традиционално, ентериерното снимање се изведуваше со терестички ласерски скенери (TLS), кои иако нудат исклучително висока метричка точност, бараат комплексна организација на снимањето: 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 трансформираше овој процес. Со интеграција на брзи LiDAR сензори, IMU единици и оптимизацијата 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, беше 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 „сенки“ во геометријата (Previtali et al., 2020). Оваа промена ја направи технологијата идеална за Scan-to-BIM процеси користени во 3D 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.

Прво, рамните фасади без детали (стаклени површини, еднолични цементни ѕидови, големи индустриски хали) имаат многу малку карактеристични геометриски форми кои може да послужат како референтни во процесот на скенирање. Без доволно рабови, агли или други карактеристични форми, алгоритмот нема референтни точки за стабилна одометрија и регистрација.

Второ, отворените простори, паркинзи, дворни површини, по дефиниција се околина кои во основа имаат релативно мал број на статични објекти и мал број на лесно препознатливи форми. Недостатокот на карактеристични објекти (постови, канделабри, дрвја) го намалува квалитетот на регистрација на облаците од точки и ја зголемува зависноста од одометријата, што води кон поголемо отклонување.

Трето, високите згради создаваат ситуации каде уредот гледа само ограничен дел од фасадата, а вертикалните линии често се слични и тешко се разликуваат, што доведува до потешка регистрација на облаците од точки. Исто така високите делови од зградите неможат да бидат соодветно скенирани.

Четврто, кај некои LiDAR сензори, силната сончева светлина може да го зголеми шумот или да влијае врз детекторот, намалувајќи го SNR (Signal to Noise Ratio) и прецизноста на повратниот сигнал.

Петто, кај габаритното снимање се јавуваат долги праволиниски сегменти на движење без можност за создавање loop closures. Бидејќи SLAM ја корегира траекторијата токму преку овие јамки, отсуството на преклопни сегменти доведува до забрзано акумулирање на грешки. Во такви услови, класичните LiDAR-SLAM системи често достигнуваат поголеми грешки, 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 комбинирани 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 преставува 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 се 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 истражувањата 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 Aircraft System). 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 3D 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 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 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 (Gharebaghi et al., 2021). Современите мобилни SLAM скенери, рачни, 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“ (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 строгодефиниран методолошки протокол. Истражувањата покажуваат дека правилно планирање на траекторијата, контролирање на брзината и ориентацијата и создавање на затворени траектории на снимање (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 патеката 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

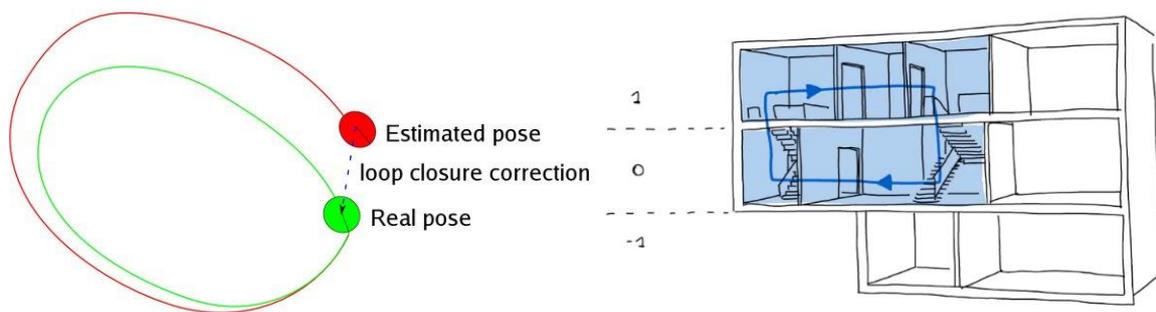
SLAM и TLS може да даде облак со поголема густина и повисоко ниво на точност (Argan et al., 2021; Chrbolková et al., 2025).

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 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 closure), фундаментален принцип кај SLAM скенирањето. 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 ѕидовите (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 ѕидови, прозорци и отвори, и
- кружно движење низ центарот за да се снимат таванот, мебелот и деталите што не се видливи од периметарската патека.

Овој метод („периметар + 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 движат бавно и да се создаде затворање на јазли на двете нивоа. Вертикалните патеки се повеќе склони 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 континуираниот отклон. Кога просторијата содржи долги празни ѕидови, 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 дојолниелно 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 ѕидови.* Празните, рамни површини создаваат недостиг на геометриски карактеристични елементи. При скенирањето треба да се избегнува движење паралелно до празни ѕидови 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 покрај 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 околната на објектот задно 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, SLAM технологијата за снимање на надворешноста на објектите се смета за комплементарна, а не замена за TLS или UAV-LiDAR снимање. 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, Stengel & Schultmann, 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. Според препораките на Soudarissanane et al. (2011), планирањето треба да вклучува анализа на геометријата на објектот, препознавање делови со потенцијални „сенки“ 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, минимален број на „сенки“ (неопфатени делови) и доволно преклопување во однос на соседните скенови. Согласно начинот на скенирање со TLS, како погодни локации може да се посочат следните:

- *Аглии на проспориите.* Тие овозможуваат скенерот да има широк агол на видливост, па со една станица се опфаќаат две до три видни површини, таван и под.
- *Почетокој и крајој на коридориите.* 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 проспирани 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 (Lichti, 2013). За разлика од SLAM скенерите, кои честопати се соочуваат со проблеми при снимање на еднолични површини, мазни ѕидови 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 преклопувачки сегменти (Besl & McKay, 1992). 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.

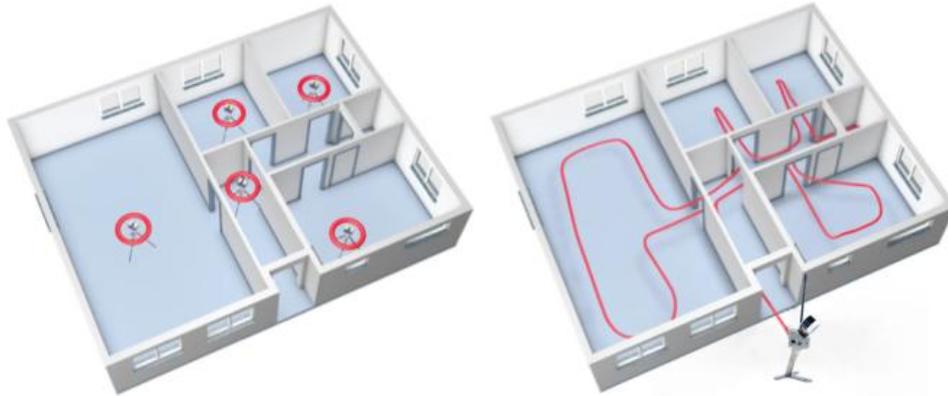
Токму затоа, за проекти каде е потребна висока точност, најчесто се применува регистрацијата базирана на маркери. Во оваа техника се поставуваат сферични или плоснати маркери на различни точки во просторот, при што TLS ги снима нивните позиции со висока точност. Маркерите мора да бидат видливи од најмалку 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 средина, а се со цел на создавање на модел на објектот кој се третира. TLS овозможува препознавање дури и на најситните детали: неправилности во ѕидовите, 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 недостапни 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 параметрите 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, точноста и употребливоста на финалниот облак од точки.

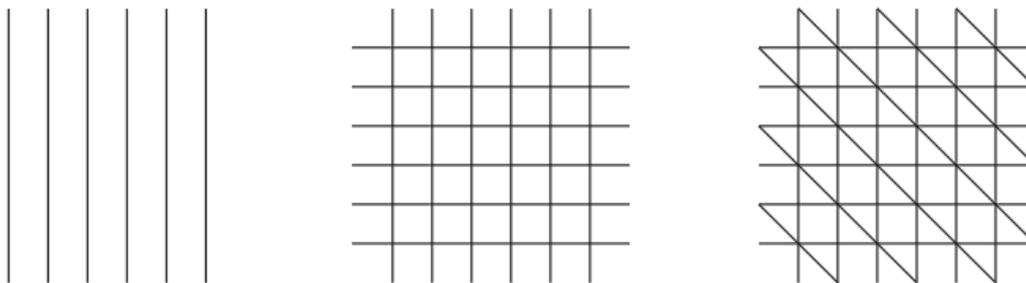
Првиот аспект што мора да се разгледа се условите под кои се изведува снимањето. Иако LiDAR технологијата не е зависна од природното осветлување, доброто и стабилно осветлување значително ја подобрува контролата и ја намалува веројатноста за неочекувани одблесоци или рефлексии од стаклени и метални површини. 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 фазата 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 (Baltsavias, 1999). 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 видови. 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 сенки 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 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. Траектории на снимање со UAV-LiDAR (grid pattern, cross-flight, и double-grid)

Grid pattern претставува основна и најчесто користена шема на лет кај UAV LiDAR, каде дронтот ја покрива целната површина со серија паралелни летни линии во една доминантна насока, со однапред дефинирано растојание меѓу трасите (overlap). 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 делумни „сенки“ 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 ѕидовите, 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 кровот (Baltsavias, 1999).

Следниот метод, cross-flight, го проширува grid pattern моделот 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 сенки 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 (Shan & Toth, 2018).

Најкомплетниот и методолошки најпрепорачлив пристап за UAV-LiDAR снимање на објекти е double-grid моделот. 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 сенки, обезбедува покриеност под наклон и создава најголема можност за реконструкција на веродостојни BIM модели (Wehr & Lohr, 1999). Оваа техника наметнува подолго време за летање, но резултатот е високо квалитетниот, густ облак од точки.

Методолошки гледано, трите модели на прелет не треба да се гледаат како конкурентни, туку како комплементарни стратегии. 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 архитектонските услови, 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 посакваните 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 симања. 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, итн.

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 интеграција 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 дел од

технологиите кои треба да создадат комплетна геометриска целина. 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 податоците: 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 скеновите (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, појава на ghosting артефакти и нестабилни рефлексии со низок интензитет, што наложува агресивно чистење од шум, 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 точност од неколку сантиметри е предуслов (Zlot & Stentz, 2016; Bachmann et al., 2021).

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, зони во сенка, варијации во густината и можни несогласувања меѓу ленти (strip misalignment). Затоа, методологијата за обработка подразбира класификација (терен, згради, вегетација), филтрирање на ниски и високи абнормални точки, корекција на лентите и генерирање DTM и DSM модели, кои потоа служат како референтна основа за кровната и фасадната геометрија (Wehr & Lohr, 1999; Shan & Toth, 2018).

TLS (Terrestrial Laser Scanning) обезбедува највисок квалитет на податоци, со минимален шум и многу висока густина и точност. Главен предизвик тука не е филтрирањето, туку регистрацијата на поединечните скен позиции, нивна fine-adjustment оптимизација и разумна редукција на густината (decimation) за да се овозможи ефикасна употреба во Revit и други BIM платформи. 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 (Wehr & Lohr, 1999).

Претпроцесирањето најпрво подразбира филтрирање на шумот кој е неизбежен производ на секој ласерски систем, но е особено присутен кај SLAM скенирањето поради динамичкото движење 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 статистички филтри кои го намалуваат бројот на абнормални точки без 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 (Zlot & Stentz, 2016). 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 фигури од движење и неструктурирани кластери (Bachmann et al., 2021; Karam et al., 2020). Затоа, задолжителен чекор е филтрирање на точки со низок интензитет и комбинирање на овој критериум со статистички филтри како Statistical Outlier Removal (SOR) 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, шумот најчесто е поврзан со атмосферски услови (влажност, прашина, магла), дифузни одбивања и мулти-рефлексии од кровни и метални материјали. За нив се применуваат слични статистички филтри, но со фокус на елиминација на изолирани точки и неприродни вертикални структури.

Во делови од облакот каде густината е преголема, чест случај кај TLS и UAV-LiDAR, но и кај SLAM ако операторот се движел пребавно или се направени повеќекратни скенирања на иста локација, се применува down sampling, најчесто преку voxel grid или uniform sampling. 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 дрвја), кои би можеле да ја нарушат регистрацијата помеѓу SLAM и UAV-LiDAR податоците (Shan & Toth, 2018).

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

Следниот критичен чекор е внатрешна регистрација на сите SLAM снимања во единствен локален координатен систем. Во практиката, снимањето често се изведува во повеќе одделни сесии (на пр. ентериер по катови, габарит околу објектот, подрум), кои иако се интерно конзистентни, не се нужно 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 RMS грешката помеѓу најблиските парови точки (Besl & McKay, 1992; Salvi et al., 2007). Клучен предуслов е постоење на преклопни зони (overlaps), скали, ходници, врати, фасадни сегменти, кои се појавуваат во два или повеќе облаци.

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, трем, 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 се создаваат заеднички геометриски карактеристики.

Кога операторот повторно поминува низ веќе скениран простор, се формира т.н. loop closure. Во рамките на graph-based SLAM, секоја позиција на скенерот е јазол во просторна мрежа, а loop closure додава ограничување помеѓу две позиции што опишуваат ист простор. Ова му овозможува на алгоритмот да ја „зацврсти“ траекторијата, да ги коригира акумулираните грешки и да обезбеди стабилен локален модел за ентериерот и габаритот на објектот.

6.2.4. Геореференцирање на SLAM моделот кон глобален координатен систем

Откако ќе се добие единствен SLAM облак (ентериер + габарит), тој типично е во локален координатен систем. Иако поодредени системи 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 кон глобално референцирани облаци од точки (UAV-LiDAR или TLS) во државен координатен систем (на пр. EPSG 6316).

Постои трипартитен пристап за поврзување на SLAM и UAV-LiDAR облаците:

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, облаците 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 марки (сфери, маркери) видливи и за SLAM и за UAV-LiDAR (на кровни тераси, предни платоа, фасадни елементи). Таргетите се геодетски измерени со GNSS или тотална станица, а нивните координати се користат за пресметка на 3Д трансформација, најчесто 7-параметарска Хелмертова трансформација помеѓу локалниот SLAM и државниот координатен систем (Shan & Toth, 2018).
3. Feature-based и ICP регистрација. Во отсуство или како дополнение на маркерите, се користат геометриски карактеристики на околината како рабови на фасади, агли, подни платформи, скали, парапети, кои се видливи и во SLAM и во UAV-LiDAR облаците. Софтверите овозможуваат избор на кореспондирачки точки и површини и при што се прави пресметка за трансформација со минимизирање на RMS грешката. Често се применува хибриден пристап: таргетите обезбедуваат груба стабилна трансформација, а ICP се користи за фино прилагодување (Vosselman & Maas, 2010; Besl & McKay, 1992).

По изведување на трансформацијата, целиот SLAM облак 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 прецизно BIM моделирање и за интеграција во GIS, а сето тоа во контекст на регистрацијата на правата на сопственост.

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

Во фазата на интеграција, комбинираниот SLAM облак (ентериер + габарит) и UAV-LiDAR облакот (кров, 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.

Во овој чекор се дефинира приоритет по зони: SLAM ентериерот и делот од габаритот има приоритет за внатрешната геометрија и приземните фасади, додека UAV-LiDAR има приоритет за кровот, горните фасади и поширокиот контекст. Резултатот е континуиран облак од точки без „прекини“ или скокови во координатите, кој го опфаќа целиот објект и неговата непосредна околина.

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 овозможува процена на хоризонталните и вертикалните отстапувања. Доколку грешките се во рамките на претходно дефинираните толеранции (на пример 2-3 cm за инженерски BIM модели), интегрираниот модел се смета за метрички валидна основа за понатамошно моделирање (Kersten et al., 2018).

6.2.6. Интегрирање на SLAM облак за ентериер и габарит со UAV-LiDAR

Во контекст на конкретната методологија, како рекапитулација на претходно презентираниот постапка за интеграцијата на SLAM облакот за внатрешноста и габаритот на објектот со UAV-LiDAR облакот за надворешноста може да се каже дека се реализира преку следните чекори:

1. Создавање единствен локален SLAM модел. Се обработуваат сите ентериерни и екстериерни SLAM снимања: филтрирање на шум и точки со низок интензитет, стабилизација на хоризонталните рамнини и внатрешна регистрација преку планирани преклопувања на поединечните скенирања и loop closures. Резултат е единствен SLAM облак од точки во локален координатен систем кој ги опфаќа внатрешноста и делумно габаритот на објектот .
2. Геореференцирање на SLAM моделот кон UAV-LiDAR координатниот систем. Во преклопните зони (фасадата, влезниот дел, тераси) се идентификуваат заеднички геометриски структури или таргети видливи и во SLAM и во UAV-LiDAR облакот. Врз основа на нив се реализира 3D трансформација (обично 7-параметарска Хелмергова трансформација) со која локалниот координатен систем на SLAM облакот од точки се поврзува со државниот координатен систем во кој веќе се наоѓа UAV-LiDAR облакот од точки (Shan & Toth, 2018; Vosselman & Maas, 2010).

3. Спојување и глобална оптимизација. Трансформираниот SLAM облак се спојува со UAV-LiDAR облакот во единствен 3Д модел. Во зоните на преклопување се применува финална ICP оптимизација со цел да се минимизираат локалните отстапувања и да се обезбеди непрекината фасадна и кровна геометрија.
4. Контрола на точност и подготовка за BIM. Комбинираниот облак се верификува со независни контролни точки. По потврда дека точноста е во рамките на целните толеранции, облакот се извезува во формати погодни за BIM (на пр. RCP/RCS) и станува основа за формирање на интегриран BIM модел кој ја опфаќа внатрешната и надворешната геометрија, со можност за понатамошна интеграција во GIS и 3Д катастарски системи.

На овој начин, различните технологии (SLAM за ентериер и контактна зона на објектот, теренот и околината на објектот), UAV-LiDAR за обезбедување на податоци за кровот и поширок контекст, а по потреба и TLS за високодетални сегменти) се интегрираат во единствен геореференциран облак од точки, кој истовремено обезбедува геометриска деталност и глобална позициска стабилност, што пак е предуслов за прецизно BIM моделирање и за понатамошна употреба во GIS и 3Д катастарски системи.

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 (Eastman, Teicholz, Sacks & Liston, 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 користените групи параметри се:

- **Геометриски параметри**, како висина, ширина, дебелина, должина или наклон, кои ја дефинираат физичката форма и димензија на елементот (Sacks et al., 2018).
- **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 подготвка 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 (Clemen & Gruber, 2020).

Позиционирање 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:

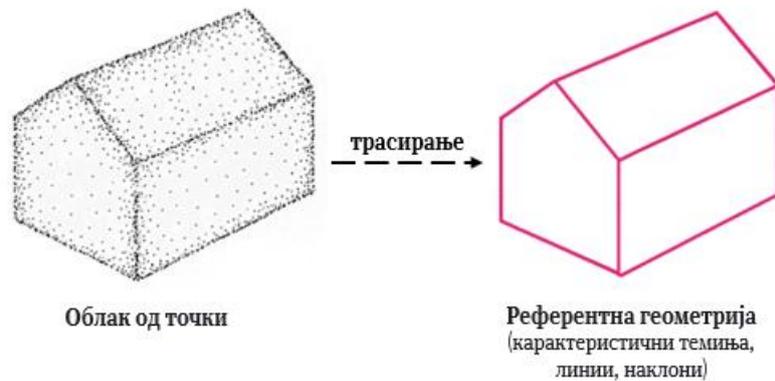
- усогласување на моделот со координатниот систем во кој се реализира проектот,
- коректно преклопување со GIS податоци (катастар, ортофото, DTM/DSM),
- конзистентност во трансферот на податоци преку IFC и последователна конверзија во CityGML или други GIS формати.

Со правилно поставување на координатниот систем, BIM моделот станува дел од поголема просторна рамка, што е критично за сите понатамошни GIS анализи, 3D 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 ѕидови, 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“. Овие чекори се доследни на стратегиите за моделирање што ги опишуваат Macher, Landes и Grussenmeyer (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 16739-1:2018 (IFC) и анализирани од Stouffs, Tauscher и Biljecki (2018).

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 „banana effect“ (благо закривување на облакот од точки кај прави, рамни објекти) најчесто во долги коридори или тунели, мали вертикални отстапувања или локални деформации на површини, тие 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 Previtali et al. (2019), 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. Како што потенцираат Tang et al. (2011), оваа фаза бара балансирање помеѓу

реалната сложеност на облакот од точки и логичката структура што ја бараат BIM и GIS платформите.

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 и CityGML (Barazzetti et al., 2015).
- 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 (Macher, Landes & Grussenmeyer, 2017).

Баланс меѓу автоматизација и експертска интервенција е неопходен затоа што 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 ѕидови и вертикални елементи

Реконструкцијата започнува со моделирањето на ѕидовите 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 ѕидовите често имаат мали отклонувања, се применува мануелно извлекување на линии и поставување референтни рамнини за прецизност (Previtali et al., 2019). Овие ѕидови се дефинираат како IFC елементи (IfcWall), што е предуслов за нивно правилно претставување во CityGML како WallSurface во LoD2 или LoD3 модели (Kolbe, 2019).

Моделирање на плочи, ѕидови 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 (ISO 16739-1:2018). 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 ѕидот 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, 2019).

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, одмаралишта 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. Како што потенцираат Stouffs, Tauscher и Biljecki (2018), 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 „ѕидот 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

станови, 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. Како што укажуваат Tang et al. (2011), овие методи овозможуваат рана детекција на грешки како изместени ѕидови, 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; 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 (Isikdag & Zlatanova, 2009).

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

- IfcRelContainedInSpatialStructure – ја дефинира хиерархијата меѓу зградата, катовите, просториите и нивните елементи. Оваа релација мора да биде конзистентна за да се трансформира во CityGML Building → BuildingPart → Storey → Room.
- IfcRelSpaceBoundary – ги дефинира границите на просториите и нивната поврзаност со околните елементи. Ова е критично за трансформација во 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 BAUnits.

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 ѕид, 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/LoD3 модели, затоа што CityGML и IFC стандардите бараат геометријата да биде тополошки чиста и дефинирана како затворен волумен. Следно, се проверува дали постојат *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, пренос или автоматизирана анализа. Понатаму, се бараат случаи на *overlapping faces* – преклопување на површини кои не треба да се преклопуваат. На пример, два ѕида со истата положба или двапати внесена плоча. Ова создава дупликации 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 микро-пукнатини меѓу обвивките, алгоритмите за конверзија кон CityGML многу често не го распознаваат како валиден податок. На крај, се проверува дали има *invalid intersections*, односно нерегуларни пресекувања меѓу различни елементи, пример, греда што „влегува“ во ѕид 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 CityGML, IFC4 и ISO 16739-1:2018 строго пропишуваат дека LoD2/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 неспоени рабови меѓу ѕид и плоча, микро-празнини кај отвори или мали тополошки аномалии, можат да го нарушат процесот на генерирање 3D solids во CityGML 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 (Eastman et al., 2018).

6.3.5. Подготовка на BIM модели 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 забележуваат Isikdag и Zlatanova (2009), токму 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.

Проверка за дупликации и неоптребни елементи

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

- дупли видови, плочи, итн.,
- линиски помошни елементи што се користени само за моделирање,
- референтни рамнини и линии, точки и линии за контрукција,
- 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 solids при генерирање CityGML или IndoorGML модели (Stouffs et al., 2018). Затоа моделот мора да биде исчистен од сите елементи кои не ја носат примарната геометриска или семантичка информација.

Стандарди за нивоа на деталност (LOD)

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/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 (Kolbe, 2019).
- IndoorGML LoD1/LoD2 се добиваат преку структурирани IFC Spaces, нивните површини дефинирани со граници и навигациската топологија.

Премногу детализирани елементи (LoD 350/400) 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 3D катастарски полигони. Затоа, хармонизацијата на LOD е суштинска за компатибилност.

Проверка на координатниот систем и геореференцирање

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 (ETRS89, MGI, UTM)
- проверен за неправилно поставени точки (Stoter et al., 2011).

Неправилното или непотполно геореференцирање е една од најчестите причини за неуспешни BIM-GIS конверзии. GIS системите не можат да обработат модел кој не содржи апсолутни координати, ниту пак може да се генерира CityGML „envelope“ без јасно дефиниран координатен систем.

Експортирање во IFC формати

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 (swept solids наместо faceted meshes),
- подобро мапирање на простори и затворени површини.

IFC4 е напдно компатибилен со CityGML 3.0, ESRI BIM-to-GIS workflows и со IndoorGML, што го прави во моментот најстабилна верзија за интероперабилни системи (ISO 16739-1:2018).

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 тематски 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 ги 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, координатен контекст 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 (Liu et al., 2017; Noardo et al., 2020).

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, менаџирање со недвижности, дигитални близнаци или анализа на инфраструктурни системи, изборот на соодветен формат и методологија е критичен 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 (CityGML, 3D Tiles, geodatabase, GeoJSON) се состои од три последователни фази: раслојување, структурирање и семантичка трансформација.

Раслојување на BIM елементите во GIS категории (Decomposition/Layer Separation)

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 темели, 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 (Sun et al., 2019).

Структурирање, претворање на геометријата во GIS елементарни форми (Topological and Geometric Structuring)

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 (Stoter et al., 2017). Површинските surface модели, кои вклучуваат фасади, кровни рамнини и подни плочи, 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).

Семантичка трансформација (*Semantic Mapping & Harmonization*)

Покрај геометријата, BIM моделот содржи богата семантичка структура која треба да биде задржана и прилагодена за GIS. Атрибутите за материјали, намени и типови на елементите стануваат дел од GIS атрибутните полиња и поддржуваат анализи како енергетска ефикасност и симулации на пожари (Noardo et al., 2020). Податоците за нивоа и висини (storeys, elevations) се критични за тридимензионално позиционирање и овозможуваат тополошка сегментација и коректно поврзување на елементите во 3Д координатен систем (Kutzner & Kolbe, 2018).

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 (Liu et al., 2017). Колку повеќе BIM атрибути се зачуваат, толку поголем е аналитичкиот капацитет на интегрираниот GIS модел.

6.4.3. Пристапи на конверзија од IFC во GIS

Во практиката, се издвојуваат три главни пристапи за конверзија од IFC во GIS:

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

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

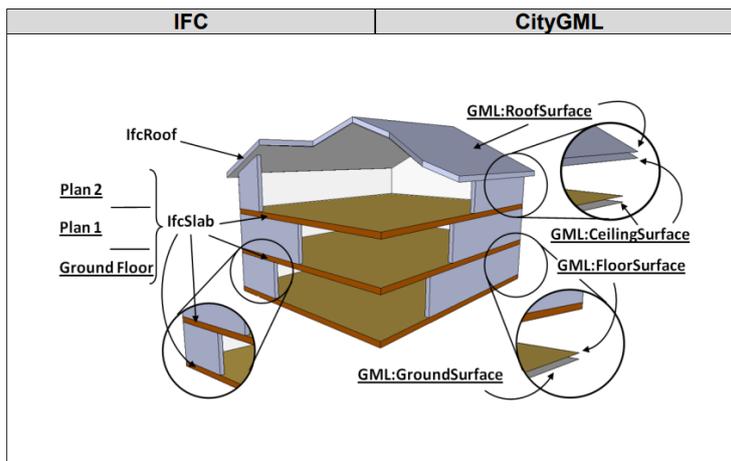
Конверзија IFC → CityGML/CityJSON

Конверзијата на IFC кон CityGML или неговиот еквивалент заснован на JSON-формат, CityJSON, е методолошки најсоодветна кога целта е изградба на тридимензионални модели на урбани средини, дигитални близнаци на урбани средини или 3Д катастарски системи. CityGML, развиен под OGC, претставува најшироко прифатен меѓународен стандард за 3Д модели на згради и урбани средини (Kolbe, 2009; Kutzner & Kolbe, 2018). Неговата структура овозможува репрезентација на згради 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 (Biljecki et al., 2016).

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

- IfcWall → WallSurface,
- IfcRoof → RoofSurface,
- IfcOpeningElement → Opening,
- IfcSpace → BuildingRoom (во CityGML 3.0).



Слика 6.6. Поврзување на IFC и CityGML врз основа на концепти за заеднички елементи на градбата. Извор: El-Mekawy et al., 2012

Овој процес е комплексен бидејќи IFC е објектно-ориентиран и често содржи семантички податоци што немаат директен еквивалент во CityGML (Donkers et al., 2016). Критична точка на конверзијата е создавањето волуметриски конзистентни полиедри, што е задолжителен предуслов за валиден CityGML модел. Заради тоа, 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.

CityGML има и неколку ограничувања:

- не поддржува детални MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) системи, па тие најчесто се исклучуваат или поедноставуваат (Kutzner & Kolbe, 2018);
- бара строга тополошка валидност, што го ограничува директниот трансфер на комплексни BIM геометрии;
- семантичката богата структура на IFC често се редуцира поради разликите во концептуалните модели.

Во рамките на истражувањето, конверзијата од BIM и IFC кон GIS и CityGML 3.0 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 и подруми), како и простори (волумени) што се третираат како заеднички делови (ходници, скали и комуникации).

Првиот сеџмен 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 слоеви (парцели, административни единици инт.) и да се користат за просторни анализи.

Во **вториот сеџмен** 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 основните идентификатори за понатамошно поврзување со други податоци, првенствено GlobalId како единствен идентификатор на зградата, како и именување и класификација или намена, со цел секој CityGML објект да остане поврзан со изворниот BIM запис.

Третиот сеџмен ја воспоставува вертикалната и функционалната поделба која е суштинска за модел на недвижности применлив во системите за администрирање со недвижности. 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.

Четириот семен 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 (MultiSurfaces) 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.

Петтиот семен 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 ѕидните површини. Структурните елементи (греди, столбови, темели) и инсталациите се третираат како секундарни во примената на моделите во системите за администрирање со недвижности и се пренесуваат само доколку постои конкретна потреба од нив.

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 (PostGIS, FileGDB, GeoPackage)

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, QGIS или PostGIS.

Просторните бази на податоци обезбедуваат стабилна просторна инфраструктура со поддршка за 3Д тела (solids), линии, полигони, облаци од точки и атрибутни податоци (Zlatanova et al., 2020).

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 (Sun et al., 2019). 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 соодност 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.

Подготовка на влезниот IFC модел

Првата фаза е насочена кон проверка на квалитетот и структурната подготвеност на IFC моделот пред неговото импортирање во GIS околина. Во оваа фаза се спроведува систематска инспекција 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 indoor моделирање, анализа на простории или формирање катастарски единици; и
- атрибутната конзистентност на елементите, односно унифицираноста 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 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 дупликации 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.

Просторна усогласеност и геореференцирање

Втората фаза се однесува на тоа каде и како е позициониран моделот во простор 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 врска 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 кој се прикажани останатите просторни податоци што ќе се користат во проектот.

Доколку IFC веќе содржи податоци за геореференцирање, тие се читаат преку контекстот на проектот: во IFC4/IFC4.3 геореференцирањето се опишува преку IfcMapConversion (транслација/ротација/размер) класата која носи параметри за трансформација од локалниот во посакуваниот или државниот координатен систем или го посочува EPSG кодот на координатниот систем во кој се сместени податоците преку класата IfcCoordinateReferenceSystem. Во таков случај, ArcGIS може да го позиционира моделот конзистентно со избраниот координатен систем и да го прикаже правилно уште во BIM workspace.

Кога IFC моделот нема експлицитно геореференцирање односно не е дефиниран координатниот систем и трансформација кон државниот координатен систем, ArcGIS Pro применува пристап типичен за GIS каде просторната референца и позицијата се задаваат преку придружни датотеки. Најпрво се доделува референтен координатен систем преку .prj датотека. Со тоа ArcGIS добива информација во кој координатен систем треба да се интерпретираат координатите на моделот (на пример државен координатен систем). Меѓутоа, .prj не го „поместува“ моделот, односно ако BIM е изработен во локален координатен систем (околу 0,0,0), тој и понатаму ќе остане релативно позициониран, само ќе биде формално врзан за оној координатен систем кој е посочен во *.prj.

Затоа, кога реалните координати не кореспондираат со местоположбата на моделот, се креира WLD3 world file, кој дефинира афина 3Д трансформација потребна за правилно позиционирање. WLD3 датотеката во себе содржи парови на координати, во локален и државен координатен систем преку кои ArcGIS согласно математичкиот модел на афина трансформација ги пресметува трансформационите параметри и ги аплицира на целата BIM содржина.

Читање на IFC како BIM file workspace (инспекциска фаза)

Работниот тек на процесот на конверзија IFC → GIS започнува со преглед на содржината на податоците структурирани според IFC стандардот, така што IFC не се конвертира веднаш, туку најпрво се отвора како BIM file workspace, што во суштина значи само едноставен преглед на содржината во read only мод на работа. Тоа значи дека ArcGIS Pro автоматски го „распакува“ моделот на начин разбирлив за GIS и ти го прикажува во

Catalog 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 бидат симболизирани, селектирани и врз нив да се реализираат просторни анализи, но геометријата и атрибутните податоци не може да се менуваат директно во тој workspace, затоа што IFC останува оригинална изворна датотека, додека ArcGIS само ја чита и визуелизира.

Овој чекор е суштински бидејќи овозможува интерпретација на IFC моделот во GIS логика без интервенција врз изворните податоци. При читање на IFC како BIM file workspace, 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.

Материјализација во FileGDB со BIM File To Geodatabase

Следен чекор во процесот е реалната конверзија во оперативен GIS формат, која се реализира со алатката BIM File To Geodatabase. Со оваа постапка, read-only структурата од BIM workspace 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 кои може да бидат едитирани, што овозможува додавање или отстранување полиња, пресметка на нови атрибути, креирање индекси 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 алатка и истиот процес, ArcGIS Pro поддржува и append/merge логика. Доколку се внесуваат повеќе BIM/IFC извори (или повеќе дисциплински групи) 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 workspace, каде слоевите се виртуелни прегледи над 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.

Најнапред, во FileGDB може да се креираат просторни и атрибутни индекси, со кои значително се подобрува ефикасноста на пребарување, селекција и геопроцесирање над големи сетови на 3Д објекти. Ова е особено важно кога IFC моделот содржи илјадници елементи, каде операции како филтрирање по тип, ниво или идентификатор би биле споредни или бавни без индексирање.

Потоа, просторната база на податоци овозможува пресметка на геометриски деривати (површини, волумени, габарити) 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 или регистри на објекти. Ова овозможува директно воспоставување на просторни односи (пресек, содржаност, припадност) помеѓу 3Д моделот и официјалниот просторен контекст, што е неопходно за административна употреба.

Конечно, просторната база на податоци создава услови за имплементација на структура согласно потребите на системите за администрирање со недвижности, која вообичаено не е идентична со BIM структурата. Преку креирање нови тематски слоеви (на пр. за зграда, единици, заеднички делови, граници) и врски помеѓу тематските слоеви, може експлицитно да се моделираат хиерархиите и врските меѓу објектите (Building-Storey-Unit-Room, како и врски со парцели и записи за правата врз недвижностите). На тој начин, FileGDB не служи само за визуелизација на BIM геометријата, туку за трансформација на BIM податоците во аналитички и административно применлив 3Д модел во GIS околина.

Пост-процесирање: нормализација на атрибути и подготовка на доменска шема

Петтата фаза се реализира по извршеното импортирање на податоците во FileGDB и претставува клучна пост-процесна етапа 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 со 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. станбено, деловно, заедничко, комуникациско).

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 подтипови 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 подтипови стан, деловна просторија, помошна просторија), што е корисно за симболизација, 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 (building body), просторни единици (units), заеднички делови (common parts) и граници (boundaries). 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. Воедно, се воведуваат атрибути специфични за катастар (на пр. ID на единица, тип на сопственост, поврзаност со парцела, кат итн.), со што се овозможува поврзување со бази на податоци во кои се регистрирани податоците за носителите на правата и правата врз недвижностите.

Клучен дел од петтата фаза е поставувањето на relationship classes, 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. unit-rooms, unit-common parts), или меѓу единици и парцели, објекти во катастар. 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 база во која податоците се:

- атрибутно конзистентни и стандардизирани,

- индексирани,
- 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.

Контрола на квалитет (QA/QC)

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 merge/append функциите, и
- 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, real-time rendering 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 и CityGML, 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 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 3Д катастарот. BIM ја обезбедува деталната физичка структура, GIS ја дава просторната локација и контекст, а LADM ја дефинира нормативната правна компонента. Тројната синергија создава можност за автоматизирани трансформации: од параметарска BIM геометрија кон тополошки валидни GIS објекти (CityGML), а потоа кон правни LADM класи како LA_SpatialUnit, LA_BAUnit и LA_RRR (Rajabifard et al., 2019).

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 19152:2012). 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 (простории, апартаменти);
- 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 (Zlatanova et al., 2016).

Усогласување IFC → CityGML → LADM

Интеграцијата помеѓу IFC, CityGML и LADM претставува комплексен процес на трансформација на податоците кој вклучува геометриско поедноставување, семантичко усогласување и правно-административно моделирање. Трите стандарди се развивани за различни цели: IFC за градежната индустрија, CityGML за урбано моделирање и LADM за катастар и управување со земјиште, па поради тоа постојат изразени разлики во нивната структура, ниво на деталност, геометриски парадигми и семантичка организација. Усогласувањето служи за воспоставување кохерентен работен тек (workflow) кој овозможува автоматизирано или полуавтоматско претворање на BIM модели во тополошки валидни 3Д катастарски единици.

Усогласувањето се темели на следниве принципи:

- Геометриско усогласување – конверзија на параметарски IFC геометрии (sweeps, CSG, B-Rep) во полигони и површини потребни за CityGML LoD2/LoD3.
- Семантичко усогласување – поврзување на IFC класи со CityGML тематски нивоа (Building, BuildingPart, Room).
- Тополошка конзистентност – верификација дека создадените CityGML геометрии се затворени, без празнини, пресекувања или невалидни B-Rep структури.

- Правно моделирање – трансформација на внатрешните простории од CityGML во LADM LA_SpatialUnit и нивна поврзаност со LA_RRR, LA_BAUnit и LA_Party.
- Одржување на семантичката траса (provenance) – зачувување на линковите кон оригиналниот IFC модел (GUID, IfcPropertySet), што е клучно за ажурирање и Life-Cycle Management.

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 изработка на BIM модел, па се 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-SLAM, PPK-SLAM), 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.

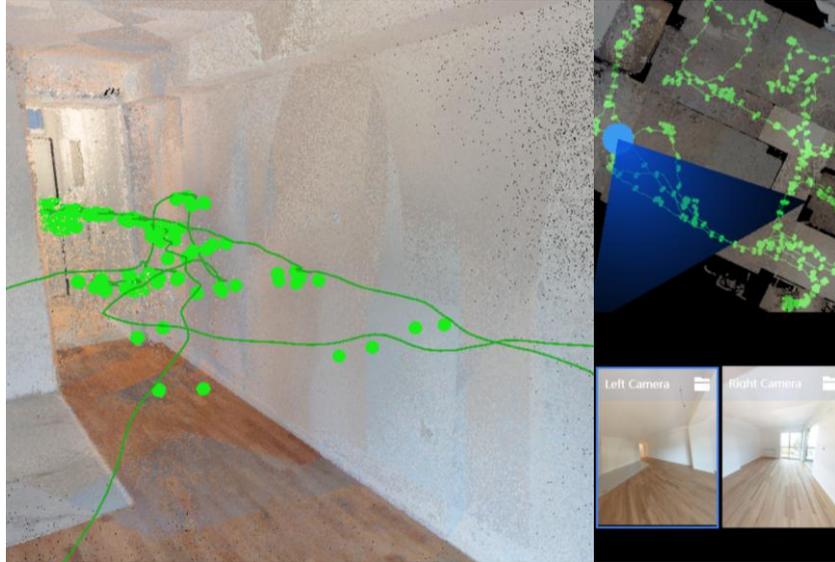
7.1.1. Аквизиција на просторни податоци

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 професионални домени, вклучувајќи архитектонско проектирање, градежништво, геодетски мерења, мониторинг и документирање на објекти. Дополнително, можноста за брза аквизиција на 3D 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.

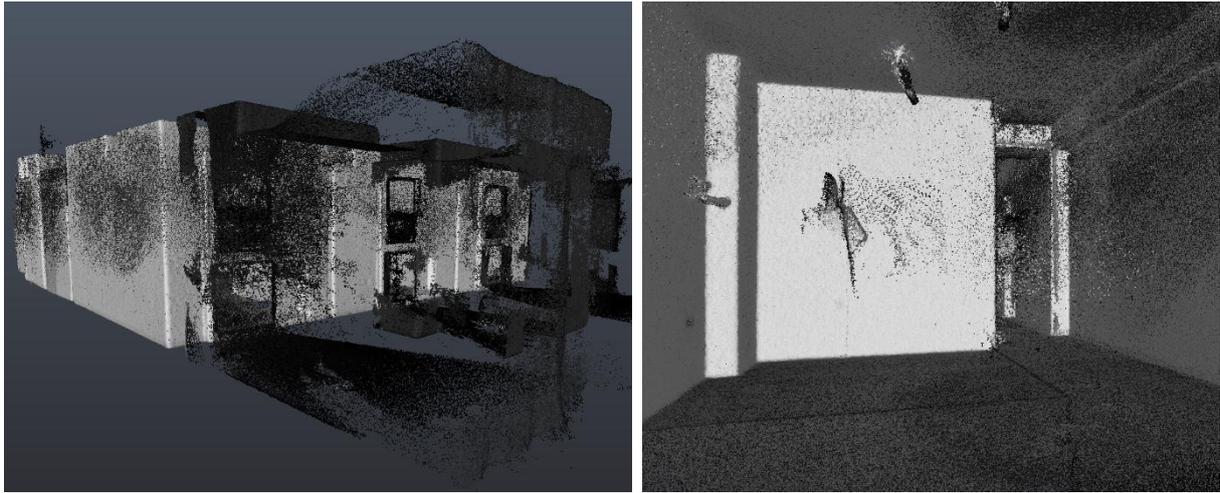
Средната густина на добиениот облак од точки изнесува околу $42\,500\text{ pt/m}^2$, што е многу висока резолуција и е повеќе од доволна за моделирање на сидови, плочи, отвори, прозорски профили, греди, столбови и слично и формирање на BIM модел со ниво на деталност LOD 300-350 („*as-built*“, односно 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 рефлексија 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 рефлексијата на ласерскиот импулс. Посветлите точки означуваат повисок интензитет, додека потемните соодветствуваат на понизок интензитет на рефлексија. 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 рефлексија.



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 ѕидови, 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 ѕидовите, 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 премеер 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 ѕидовите, подовите, таваните, отворите и другите елементи, со постојана проверка на усогласеноста помеѓу моделот и реалната состојба.

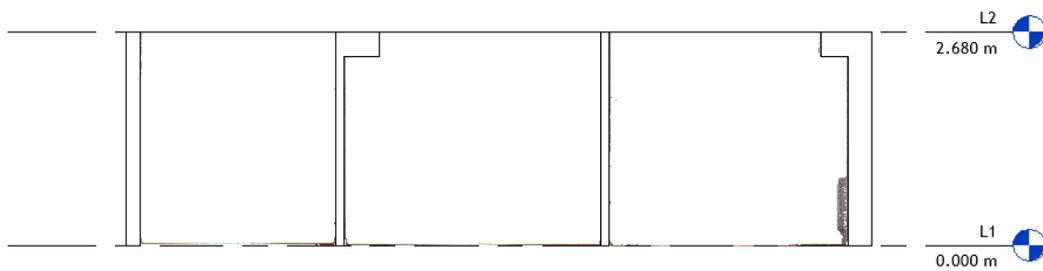


Слика 74. Хоризонтален пресек на облакот од точки во ВІМ околина

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 стан



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

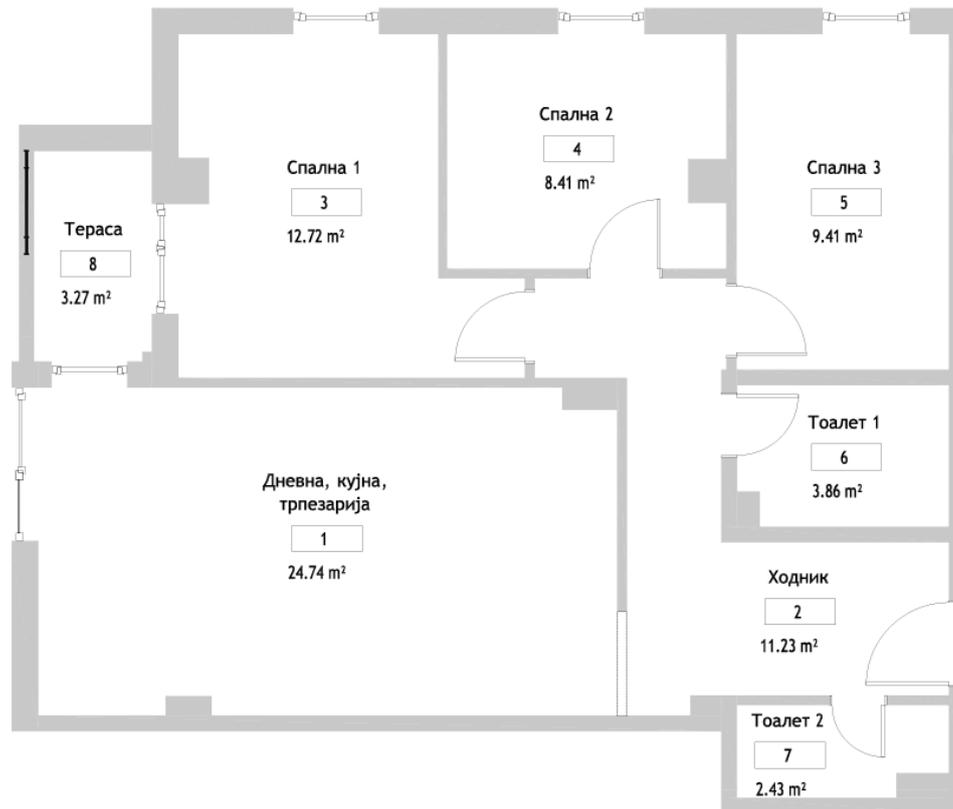
На Слика 7.5 е прикажан вертикален пресек на облакот од точки добиен со ласерско скенирање, кој овозможува јасна визуелизација на висинските карактеристики на просторот, вклучително положбата на подот, таванот и вертикалните конструктивни елементи. На Слика 7.6 е прикажан вертикален пресек на облакот 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 ѕидовите, 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 стан

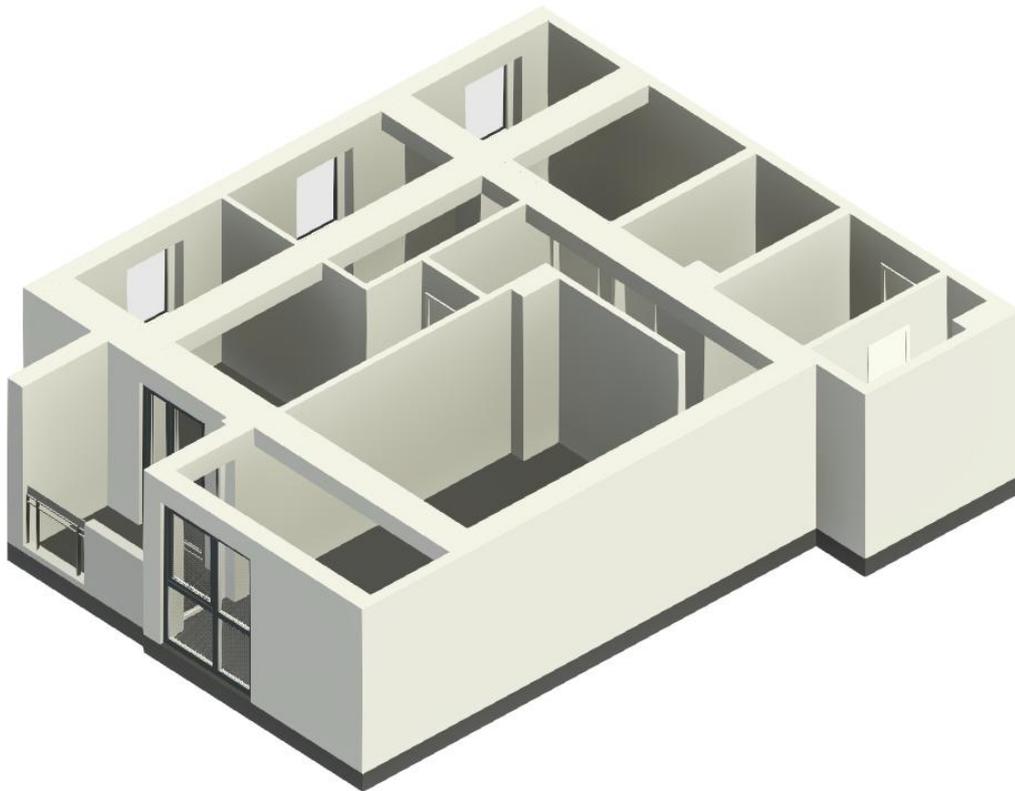
Секоја просторија во BIM моделот, согласно IFC стандардот, е дефинирана како посебен простор, односно *IfcSpace*, со јасно утврдени геометриски граници и придружни атрибутни и семантички податоци. Овие простори претставуваат основна единица за просторна анализа и овозможуваат структурирано управување 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 посебен дел (IfcSpace)	Намена на посебен дел	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
1	Дневна, кујна, трпезарија	24.74	66.78
2	Ходник	11.23	30.33
3	Спална 1	12.72	34.34
4	Спална 2	8.41	22.71
5	Спална 3	9.41	25.41
6	Тоалет 1	3.86	10.42
7	Тоалет 2	2.43	6.57
8	Тераса	3.27	8.82

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 ѕидови, 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 стан

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 катастар на недвижности*, претставува стандардна постапка при регистрација на внатрешната површина на објекти со намена – станбен објект. 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, со цел 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 посебен дел (просторија)	Намена на посебен дел	Класичен пречер [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		
1,42	1,43	-0,01		
4	Спална 2	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 посебен дел (просторија)	Намена на посебен дел	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 ВМ моделот. 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 ВМ 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 ВМ моделот е базирана врз статистичка анализа на растојанијата добиени со класично мерење со ласерски уред за мерење должини и соодветните растојанија во ВМ моделот. За секое мерено растојание е дефинирана разликата помеѓу класичното мерење (референтна вредност) и соодветната вредност од ВМ моделот, како:

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

каде, ΔL_i е отстапувањето на i -тото растојание, $L_{\text{ref},i}$ е растојанието од класичниот премер (референтна вредност), а $L_{\text{ВМ},i}$ е растојанието извлечено од ВМ моделот. Негативен предзнак на ΔL означува дека ВМ дава поголема вредност во однос на референтната, додека позитивен предзнак означува дека растојанието во ВМ 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 ВМ моделот се речиси идентични со класично измерените, со занемарлива тенденција растојанијата во ВМ моделот да бидат минимално подолги.

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

$$\overline{\Delta L} \pm t_{0,975, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

и истиот 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 ВМ 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 $s \approx 0,01207$ m ($\approx 1,21$ 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 $MAE \approx 0,91$ cm, додека $RMSE \approx 1,20$ 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 ± 2 cm. Дополнително, праговите покажуваат дека околу 73% од растојанијата се во ± 1 cm, а околу 36% се во ± 5 mm, што е добар индикатор за висока конзистентност на ВМ 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, ВМ ќе отстапува од класичниот премер приближно $\pm 2,3$ – $2,4$ 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 ВМ 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 ВМ 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 ВМ 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 ѕидови, 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 методологијата 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 ортофото 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. Ортофото 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: неможноста 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 добиени од BIM моделот формиран врз основа на облакот од точки добиен со ласерското скенирање со 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 контролна точка), со што се создава силна геометриска врска за корекција на акумулираното отстапување и стабилизирање на решението. Овој процес овозможува облакот 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 35 000 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

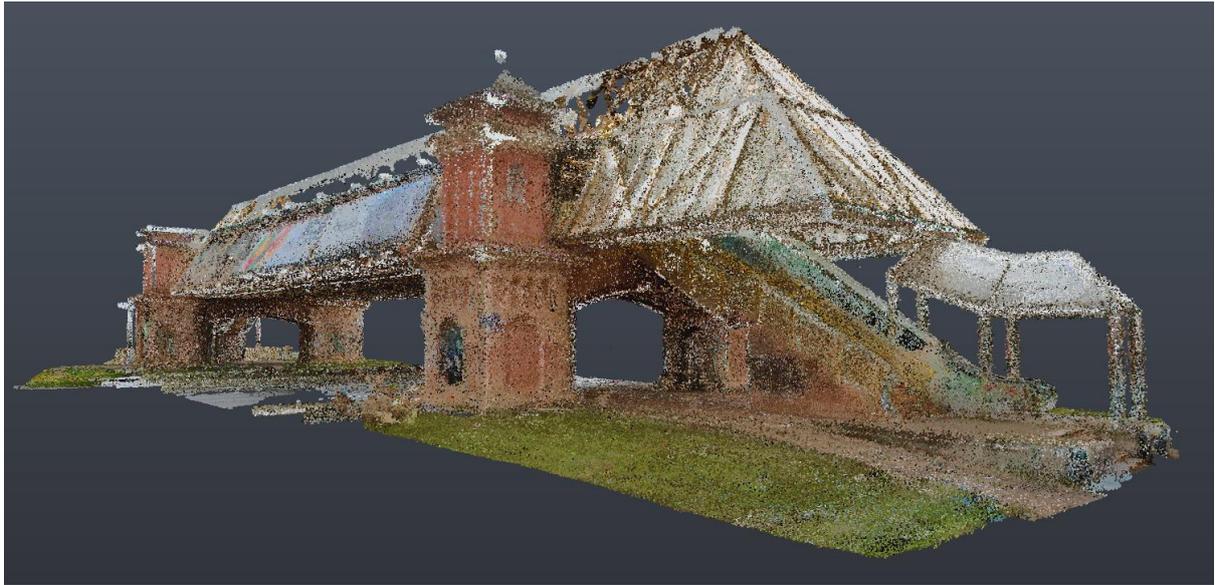
Согласно воспоставената методологија, следен чекор е процесирање на облаците од точки добиени со ласерско скенирање од првиот чекор. Овој чекор ги опфаќа процесите на интеграција на податоците добиени од различните скенирања, регистрација во државен координатен систем, отстранување на шум и груби грешки, 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 контролни 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 редувантноста 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 се прикажани обработените облаци 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

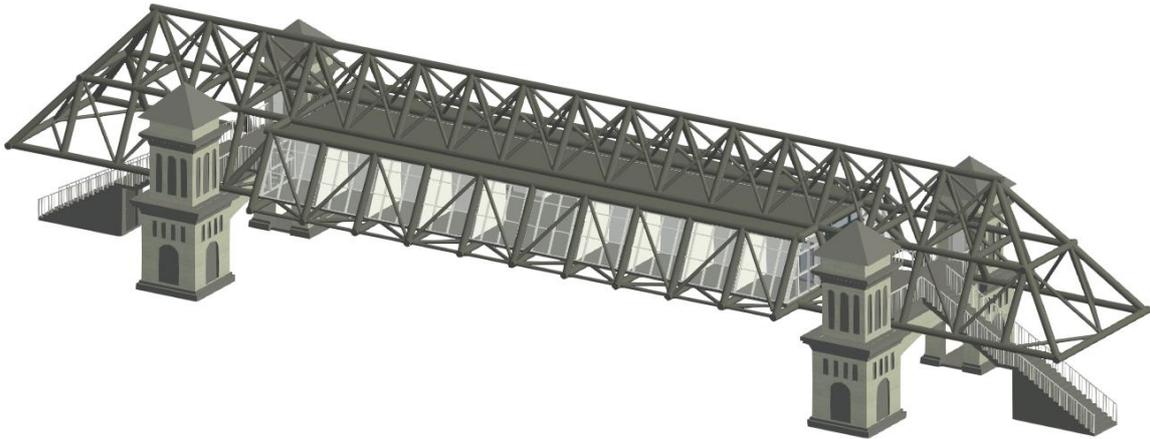
Постапката за формирање на BIM модел за пешачкиот мост „Влајко“ врз основа на обработениот облак од точки започнува со систематска анализа и интерпретација на геометриските и просторните податоци содржани во скенираниот сет на податоци. За разлика од станбени објекти, каде доминираат рамни, ортогонални 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 слично), 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 GNSS контролни точки. Ваквото геореференцирање обезбедува моделот да претставува „as-is“ репрезентација со дефинирана просторна референца, што е клучно за понатамошна интеграција со GIS.

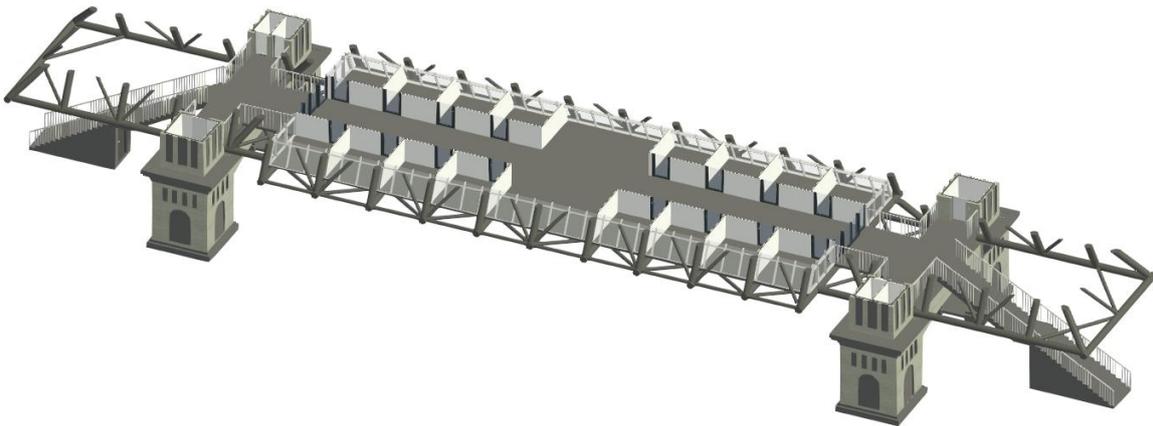
За прецизно препознавање и моделирање на карактеристичните носечки елементи, облакот од точки се анализира преку серија попречни и надолжни пресеци, како и локални пресечни рамнини во зони со сложени споеви и промени на геометријата. Попречните пресеци овозможуваат јасно препознавање на висинската распределба 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 ритамот 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.



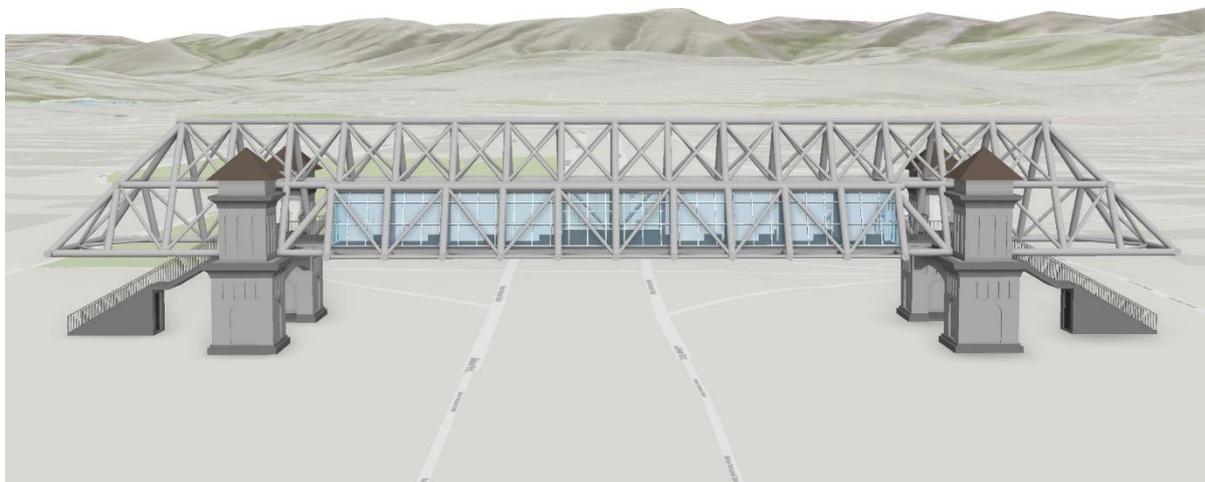
Слика 7.17. 3Д поглед на BIM моделот на мост „Влајко“



Слика 7.18. Хоризонтален пресек на BIM модел на мост „Влајко“

7.2.4. Интеграција на BIM и GIS

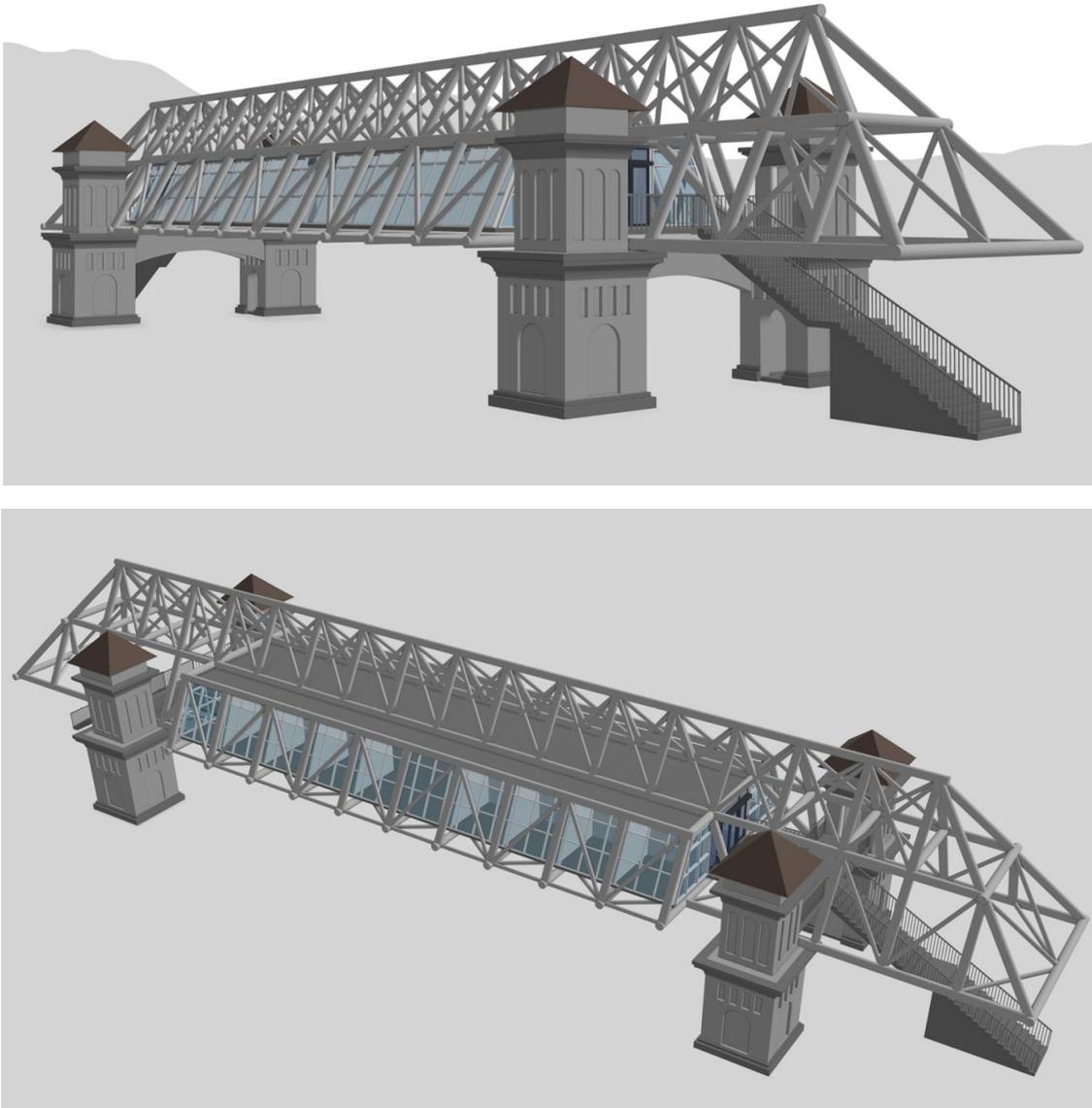
Интеграцијата на BIM моделот на пешачкиот мост „Влајко“ во GIS околина е последниот чекор од предложената методологија и претставува трансформација на објектно-ориентиран инженерски модел во просторен информациски модел подготвен за 3Д анализа и катастарски сценарија. За разлика од вообичаените BIM работни 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

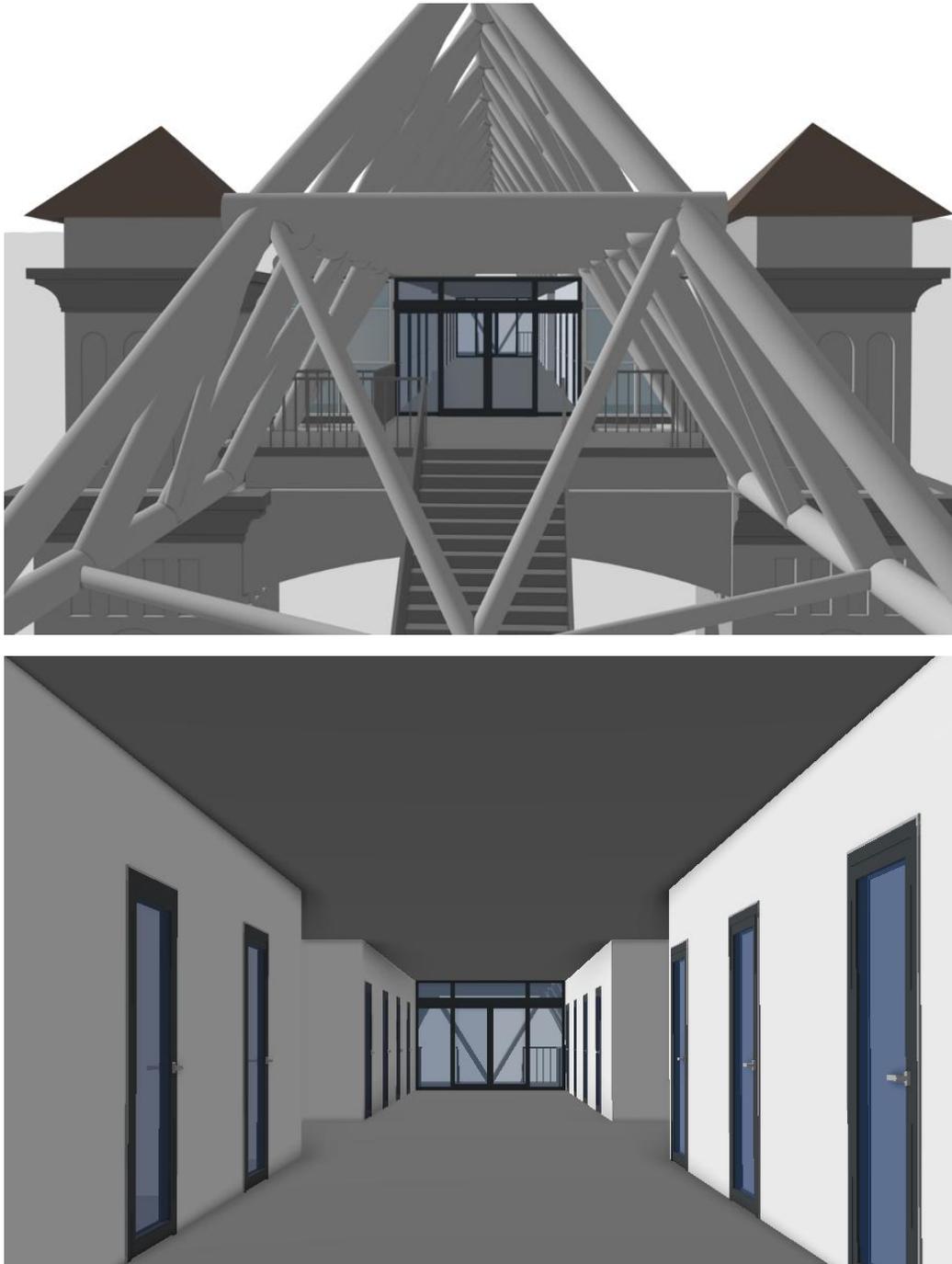
Интеграцијата на BIM моделот на пешачкиот мост „Влајко“ во GIS околина се изведува без потреба од дополнително геореференцирање, бидејќи истиот веќе е формиран врз основа на геореференциран облак од точки. Во процесот на моделирање, геометриската основа, односно облакот од точки е веќе поставен во државен координатен референтен систем, па и BIM елементите се креирани и позиционирани во истиот просторен контекст. Дополнително, при трансформација во IFC4, моделот задржува информации за координатниот референтен систем преку стандардните механизми за просторно референцирање (ProjectedCRS), при што е наведен и EPSG кодот за системот. Во конкретниот случај се користи EPSG 6316, односно државниот координатен референтен систем, што овозможува 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, атрибути и 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.



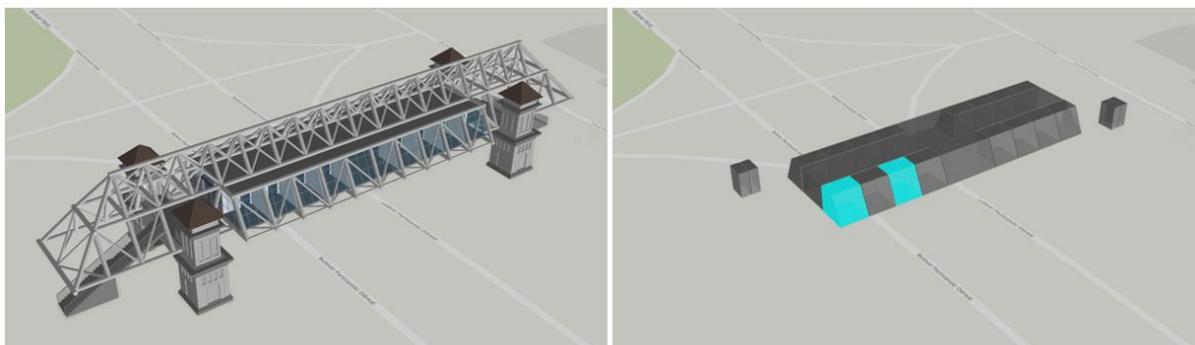
Слика 7.21. Интегриран BIM-GIS модел на мост „Влајко“ (3Д поглед кон внатре)

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 Табела 7.5 е дадена атрибутната табела на дефинираните просторни единици во објектот „Влајко“.

Табела 7.5. Атрибутивна табела со податоци за посебните единици во објектот „Влајко“ од интегрираниот BIM-GIS модел

Единствен идентификатор на објект	Единствен идентификатор на станбена	Станбена единица (IfcZone)	Намена на посебен	Број на посебен дел	Кат (Level)	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
22_1_1	1_1	1	Деловен простор	1	Кат 1	9	21
22_1_1	1_2	2	Деловен простор	2	Кат 1	9	21
22_1_1	1_3	3	Деловен простор	3	Кат 1	9	20
22_1_1	1_4	4	Деловен простор	4	Кат 1	9	20
22_1_1	1_5	5	Деловен простор	5	Кат 1	9	20
22_1_1	1_6	6	Деловен простор	6	Кат 1	9	20
22_1_1	1_7	7	Деловен простор	7	Кат 1	9	20
22_1_1	1_8	8	Деловен простор	8	Кат 1	9	21
22_1_1	1_9	9	Деловен простор	9	Кат 1	9	21
22_1_1	1_10	10	Деловен простор	10	Кат 1	9	21
22_1_1	1_11	11	Деловен простор	11	Кат 1	9	21
22_1_1	1_12	12	Деловен простор	12	Кат 1	9	20
22_1_1	1_13	13	Деловен простор	13	Кат 1	9	21
22_1_1	1_14	14	Деловен простор	14	Кат 1	9	20
22_1_1	1_15	15	Деловен простор	15	Кат 1	9	21
22_1_1	1_16	16	Деловен простор	16	Кат 1	9	21
22_1_1	1_17	17	Тоалет	17	Кат 1	2	5
22_1_1	1_18	18	Тоалет	18	Кат 1	2	5
22_1_1	1_19	19	Тоалет	19	Кат 1	2	5
22_1_1	1_20	20	Тоалет	20	Кат 1	2	5
22_1_1	1_21	21	Пешачки коридор	21	Кат 1	152	405

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 мостот „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.



	OBJECTID *	Shape *	BaseCategory	ID_Objekt	ID_Edinica	ID_Prostor	Namena	Kat	Povrshina	Volumen
1	1	MultiPatch	Spaces	7640_1_1	1_1	1	Деловен простор 1	Кат 1	9	21
2	2	MultiPatch	Spaces	7640_1_2	1_2	2	Деловен простор 2	Кат 1	9	21
3	3	MultiPatch	Spaces	7640_1_3	1_3	3	Деловен простор 3	Кат 1	9	20
4	4	MultiPatch	Spaces	7640_1_4	1_4	4	Деловен простор 4	Кат 1	9	20
5	5	MultiPatch	Spaces	7640_1_5	1_5	5	Деловен простор 5	Кат 1	9	20
6	6	MultiPatch	Spaces	7640_1_6	1_6	6	Деловен простор 6	Кат 1	9	20
7	7	MultiPatch	Spaces	7640_1_7	1_7	7	Деловен простор 7	Кат 1	9	20

Слика 7.22. Формирани 3Д волумени во интегрираниот BIM-GIS модел на мостот Влајко

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 извори. 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. На повисоко ниво, објектот како целина (мостот како инфраструктурен ентитет) може да се организира како LA_BAUnit, која ги „држи“ поврзаните просторни единици и нивните права. Во таа смисла, BIM елементите (IfcObject и неговите поткласи) 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 претставува носителите на правата, додека LA_Source може да ги евидентира изворните документи и докази (проектна документација, геодетски премер, инженерски елаборати, одобренија, договори).

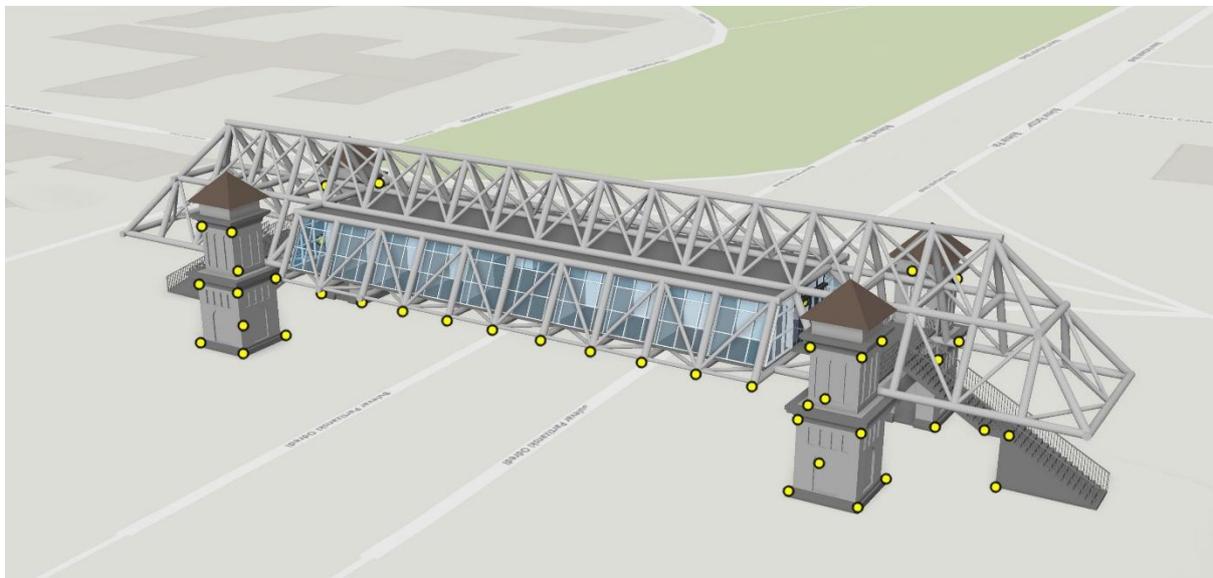
Трансформацијата во просторна база на податоци и слоевита GIS структура овозможува и технички проверки кои се тешко изводливи во чиста BIM околина: тополошки контроли на просторни единици (преклопувања, празнини, неконзистентни граници), просторни пресекувања со надворешни слоеви (терен, пристапни коридори, 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 инфраструктурни недвижности, каде што просторот се дефинира тридимензионално, а правата врз недвижностите се поврзуваат со реални, мерливи 3Д единици.

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. Како втор модел за тестирање и валидација на предложената методологија, мостот „Влајко“ е избран од повеќе 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.

Проценката 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 Y, X и Z-оска од интегрираниот BIM-GIS модел и е извршена нивна директна споредба со соодветните координати добиени со класичен геодетски премер. Во Табела 7.7 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	4651472.90	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	262.90	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	264.10	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	267.70	-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 контролни 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 пример (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 практична слика корисно е да се разгледа уделот на точки што се „внатре“ 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:

$$\Delta Y: [-8.35 \text{ cm}, +8.49 \text{ cm}],$$

$$\Delta X: [-9.19 \text{ cm}, +9.19 \text{ cm}],$$

$$\Delta Z: [-9.01 \text{ cm}, +9.32 \text{ cm}].$$

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 преклопувања со други слоеви, просторни анализи, мерења на растојанија и тополошки релации во урбан контекст.

Втората мерка е целосно 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 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 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%	[-2.41 cm, +2.32 cm]	[-2.41 cm, +2.32 cm]	[-2.41 cm, +2.32 cm]

Табела 7.8. Комбинирани индикатори за позициска точност (рамнина и 3D 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 ВМ моделирање (идеализација на линии, рамнини и агли).

Во контекст на 3Д катастар и интегрирани просторни модели, резултатите го поддржуваат заклучокот дека интегрираниот ВМ-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 ВМ моделот со површините регистрирани во Геодетско-катастарскиот информативен систем на АКН и утврдено е нивно целосно совпаѓање. Во Табела 7.6 се дадени површините на посебните делови од интегрираниот ВМ-GIS модел, додека во Табела 7.10 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 ВМ-GIS модел се со површините регистрирани во ГКИС на АКН, што дополнително ја потврдува валидноста на применетата Scan-to-ВМ процедурата 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	К1	1	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	2	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	3	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	4	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	5	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	6	Сопственост
100797	7640	1	9	Партизански Одреди Бб.Н.Влае 2	1	К1	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 објект-систем-елемент, 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 простори односи. Исто така направена е анализа на конзистентноста на атрибутните податоци и

нивната стабилност во процесот на трансформацијата и размена помеѓу различни софтверски алатки. Проверено е присуството и исправноста на клучните идентификатори (GlobalId), како и основните описни атрибути поврзани со намена, ниво (етажност), 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 мапирање 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/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 е проверката на потенцијалот за поврзување со податоци за права врз недвижностите и моделирање во согласност со принципите на LADM. Концептуално, IfcSpace/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 и поврзаните класи). 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/регистарски записи, интеграција со парцели и други надворешни недвижности во GIS, и изведување на проверки за просторни конфликти и преклопувања меѓу правни простори.

По извршената евалуација и валидација, моделот на пешачкиот мост „Влајко“ се потврдува не само како геометриски и просторно референцирана дигитална репрезентација на реалната состојба 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 хошелски комплекс

Третиот модел претставува сеопфатна студија на случај во рамки на експерименталниот дел од трудот, затоа што методологијата се проверува во услови што реално ја репрезентираат урбаната морфологија и природниот контекст истовремено: повеќе објекти во заеднички просторен систем, наклонет терен, разновидни висини и форми на објекти, како и изразена хетерогеност на покривката (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 целосната 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, за детално тестирање на методологијата е избран еден објект кој содржи две функционални единици, со што се добива можност да се анализираат и просторните односи и логиката на поделба на недвижноста на функционални целини. Објектот е особено интересен поради неговата тридимензионална конфигурација, во која катовите се делумно преклопени и не се распоредени како едноставни, хоризонтално независни нивоа. 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 или за катастарската регистрација, 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 микро ниво (во избраниот објект) и интеграција на повеќе објекти во единствен 3Д просторен модел на макро ниво. 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 од 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 од воздух (долни делови на фасади, настрешници, пристапни патеки и тераси во сенка). 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 истиот ласерски скенер користен во вториот модел за пешачкиот мост Влајко. Со ова снимање е добиен високорезолуциски облак од точки кој ги опфаќа внатрешните простори, комуникациите и конструктивните елементи, овозможувајќи појасно дефинирање на геометријата релевантна за моделот 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 се недоволно покриени 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 и каде што класичните статички поставувања би биле помалку ефикасни.

Ласерското скенирање на надворешноста на повисоките делови од објектите, нивната кровна конструкција и надворешна геометрија, како и на околниот простор и конфигурација на теренот е реализирано со скенирање од воздух со DJI Matrice 350 RTK и Zenmuse L2 LiDAR сензор. DJI Zenmuse L2 е напреден LiDAR-систем кој комбинира LiDAR-модул, високо-прецизен IMU и RGB фотограметриска камера во единствен компактен сензорски пакет. Оваа интеграција овозможува синхронизирана аквизиција на геометриски и визуелни 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 надзорот на квалитетот за време на кампања на летање. Техничките перформанси на LiDAR-модулот вклучуваат опсег на детекција до 450 m при 50% рефлексивност и 0 klx, или 250 m при 10% рефлексивност и силно амбиентално осветлување од 100 klx. Системот работи со фреквенција на емисија од 240 kHz, поддржувајќи до пет враќања по ласерски импулс, што е особено корисно за пенетрација низ вегетација и извлекување на теренски точки. Областа на скенирање изнесува $70^\circ \times 75^\circ$ во нерепетитивен режим, овозможувајќи широко покривање и снимање на фасади, додека репетитивниот режим со FOV 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. Ласерскиот сноп има мала дивергенција од 0.6×0.2 mrad, што резултира со точкаст дијаметар од само 4×12 cm на 100 m, што придонесува за стабилна и детализирана просторна репрезентација. 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 висококвалитетна фотограметриска документација и автоматска колоризација на облакот од точки. Оваа можност е особено важна за 3Д реконструкции, визуелна интерпретација и комбинирани GIS-BIM 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/DNG формат. Генерираните податоци се компатибилни со DJI Terra, која поддржува експорт во LAS, PLY, PCD, PNTS и S3MB формати, со што системот нуди целосна софтверска интеграција за постпроцесирање, класификација на терен, DEM генерирање и структурни анализи. Со маса од 905 g, IP54 заштита и работен температурен опсег од -20°C до $+50^\circ\text{C}$, Zenmuse L2 е дизајниран за стабилни операции во различни теренски и климатски услови. Во комбинација со RTK позиционирање ($1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ хоризонтално), системот обезбедува исклучително висока апсолутна прецизност, што е критично за топографски мерења, инженерски надзор, 3Д катастар и моделирање на инфраструктурни објекти. Како интегрирано, воздушно LiDAR решение, Zenmuse L2 овозможува брза, високопрецизна и мултисензорска аквизиција на 3Д податоци, со што претставува оптимален избор за картографирање на сложени структури, анализи на вегетација, геоморфологија, генерација на DEM и реконструкција на големи површини со висока просторна резолуција.



Слика 7.25. Скенирање на хотелски комплекс, лево – рачен скенер, десно – беспилотно летало со LiDAR скенер

Суштинската предност на комбинираниот пристап е што обезбедува комплементарност на податоците: воздушниот LiDAR ја дава „горната“ и контекстуалната геометрија со целосна покриеност на покривите и теренот, додека SLAM скенирањето ја обезбедува деталноста „одблиску“ во зоната на фасадите и во ентериерите. Со фузија на овие податоци се добива геореференциран облак од точки со висока густина и минимизирани празнини, што е предуслов за сигурна реконструкција и за последователна BIM-GIS интеграција.

Посебен акцент е ставен на формирање прецизен дигитален модел на теренот (DTM), бидејќи теренската конфигурација директно влијае врз правилното позиционирање на објектите во тридимензионален простор. Во контекст на интегриран 3Д модел, точната висинска компонента (Z) е подеднакво значајна како и хоризонталните координати (X и Y), особено кога комплексот е поставен на наклонет терен и кога е потребно да се анализираат пристапност, коти на под, контактни линии со терен и просторни односи меѓу објектите. Следствено, комбинираниот ласерско скенирање обезбедува стабилна основа за изработка на BIM модел на селектираниот објект, LOD1 моделирање на останатите објекти и нивна прецизна интеграција во GIS околина во единствен координатен систем.

7.3.2. Процесирање на облаци од точки

Вториот чекор од методологијата опфаќа процесирање на облаците од точки со цел да се обезбеди стабилна и комплетна основа за Scan-to-BIM моделирање. Во конкретниот модел се користат два комплементарни извори: LiDAR скенирање од воздух, кое обезбедува висока покриеност и деталност на кровната геометрија и горните делови од

објектот, и LiDAR скенирање со рачен SLAM скенер, кое овозможува густ и континуиран облак од точки за фасадните детали и внатрешните простори преку непосредно движење околу и во објектот.



Слика 7.26. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух од хотелскиот комплекс



Слика 7.27. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер од хотелскиот комплекс

На Слика 7.25 е прикажан облак од точки добиен со UAV-LiDAR скенирање дава конзистентен облак од точки за објектите 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. Наспроти тоа, Слика 7.26 го прикажува облакот од точки добиен со SLAM скенирање со повисока густина на точки во непосредно скенираните области и подобро дефинирани фасадни детали, при што во периферни зони и кај вегетација може да се појави поголема дисперзија и шум.



Слика 7.28. Облак од точки добиен со LiDAR скенирање од воздух за селектираниот објект



Слика 7.29. Облак од точки добиен со ласерско скенирање со SLAM рачен скенер за селектираниот објект

Интеграцијата започнува со регистрација и геореференцирање на двата облака во единствен координатен систем преку референтни точки на терен (GCPs), со што се обезбедува апсолутна просторна усогласеност и можност за поврзување со други просторни слоеви. Потоа се применува фино порамнување (cloud-to-cloud) за минимизирање на резидуалните разлики помеѓу сетовите, при што посебно се контролира SLAM облакот поради можни систематски деформации и акумулирано отклонување при

подолги траектории. На ниво на избраниот објект, Слика 7.27 ја нагласува предноста на LiDAR скенирањето од воздух во деталното опишување на кровната конструкција, гребените и наклоните, но истовремено укажува на празнини во долните фасадни појаси и под конзолите поради ограничена видливост. Комплементарно, Слика 7.28 го прикажува SLAM облакот каде што е поизразена читливоста на фасадните површини и архитектонските детали во „човечка“ висина, со што се надополнуваат слабостите на воздушниот запис и се оправдува фузијата на двата извора во единствен, конзистентен просторен производ.

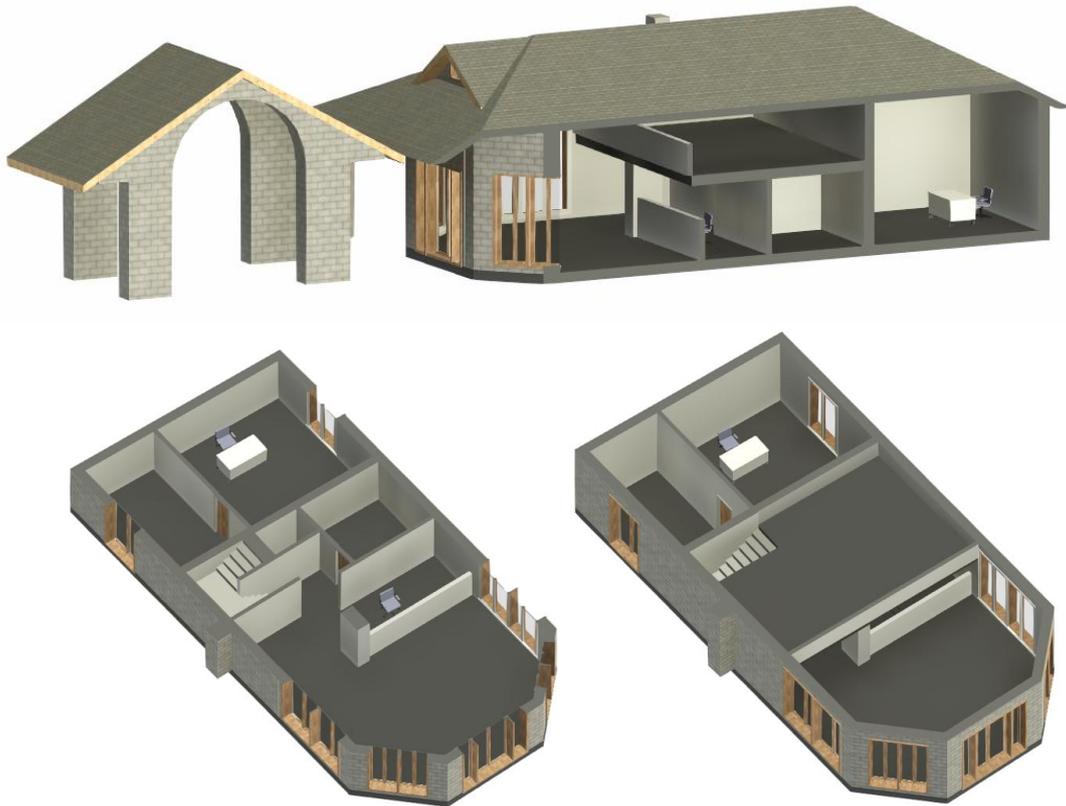
По усогласувањето следи стандардна обработка и структурирање на податоците, аналогно на пристапот применет кај моделите на станот и пешачкиот мост. Најнапред се отстрануваат груби грешки и шум преку филтри за изолирани точки и кластер-аномалии, како и преку ограничување на облакот на област од интерес и контролирана редукција на густината за да се оптимизира обработката без губење на критични рабови и детали. Потоа се спроведува сегментација и тематска организација (терен/околина, кровни рамнини, фасадни површини, отвори и нерелевантни објекти како вегетација), со цел да се добијат стабилни сегменти погодни за извлекување на основни геометриски форми и за параметарско BIM моделирање. Излезот од овој чекор е интегриран, исчистен и тематски структуриран облак од точки, кој овозможува конзистентна реконструкција на надворешноста и внатрешноста во заеднички координатен систем.

7.3.3. Креирање на BIM модел

Постапката на формирање на BIM модел за селектираниот објект од хотелскиот комплекс започнува со систематска анализа на интегрираниот облак од точки, добиен со фузија на податоци од SLAM рачен ласерски скенер и UAV LiDAR. Во фазата на обработка, облакот 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 координатна поставеност. Ова е клучно за понатамошна BIM-GIS интеграција, 3Д просторни анализи и 3Д катастарски сценарија, каде позицијата и ориентацијата на објектот мора да бидат повторливи во различни системи. За разлика од мостовска конструкција со доминантна линеарна конструктивна логика, кај овој објект морфологијата е архитектонски условена и се карактеризира со комплексен габарит и комбинирање на повеќе волумени. Поради ваквата геометрија, квалитетот на прочистувањето, сегментацијата и проверката на конзистентноста меѓу SLAM и UAV облаците од точки директно влијае врз точноста на позиционирањето и димензионирањето на BIM елементите, особено во зоните на фасадни прекршувања, кровни преоди и отвори.

Препознавањето и моделирањето на карактеристичните елементи се потпира на анализа преку хоризонтални пресеци по нивоа и вертикални (попечни и надолжни) пресеци низ критични зони, со што се контролираат габаритот, висинските односи, плочите, кровната геометрија и приклучоците кон пристапниот дел. Моделирањето се изведува постепено, од глобална кон детална геометрија: најпрво се воспоставуваат референтните поставки (ориентација, нивоа, оски), потоа се моделира примарната обвивка (надворешни ѕидови, плочи, покрив), а во следните чекори се додаваат внатрешни прегради, отвори и секундарни архитектонски компоненти. Просториите се

дефинираат како параметарски просторни единици со атрибути, што овозможува автоматско извлекување квантитативни показатели и нивна употреба во анализи. Во текот на целиот процес се спроведува континуирана контрола на усогласеноста со облакот од точки преку пресеци и визуелна инспекција во критичните зони, со итеративни корекции на локални отстапувања. Конечниот резултат е геореференциран BIM модел со соодветно ниво на деталност и точност, подготвен за GIS интеграција и 3Д катастарски примени (Слика 7.29).



Слика 7.30. BIM модел за селектираниот објект од хотелскиот комплекс

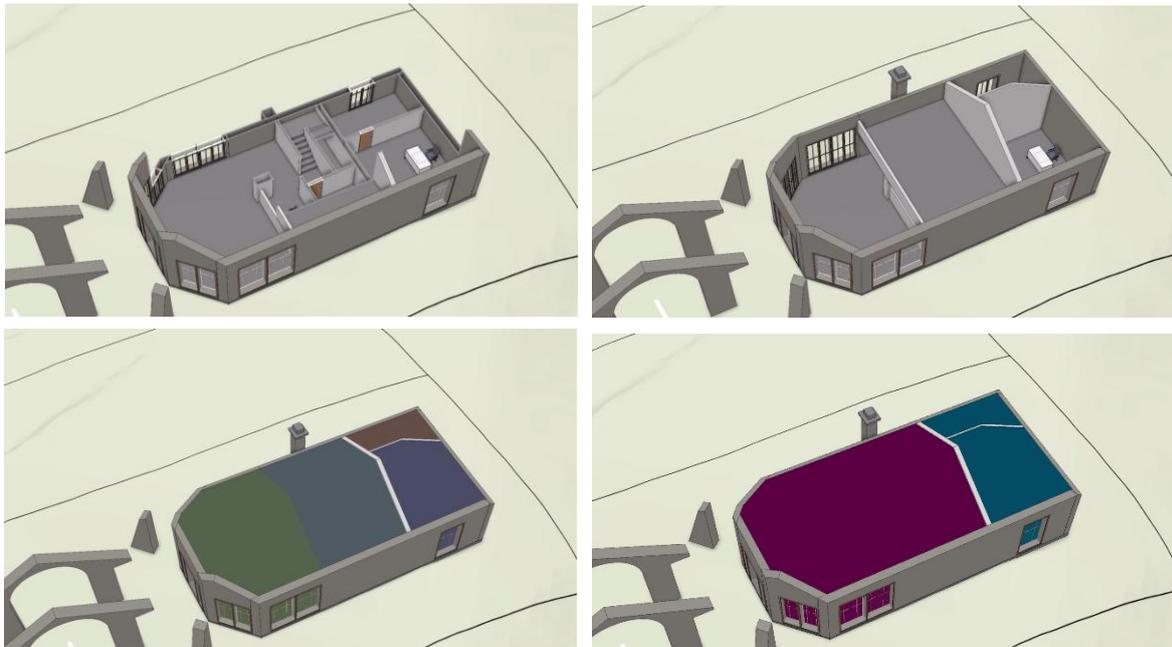
Формираниот BIM модел овозможува:

- 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, услужен простор), што овозможува анализа на намената и користењето на просторот во контекст на катастарска регистрација.

7.3.4. Интеграција на BIM и GIS

BIM моделот на објектот е интегриран во просторна околина во која останатите згради од хотелскиот комплекс се моделирани со ниво на деталност LOD1, врз основа на облакот од точки добиен со ласерското скенирање од воздух. За BIM моделот да може да се импортира во GIS околина, истиот е мигриран во IFC формат (верзија IFC4), кој овозможува интероперабилна комуникација и размена на податоци помеѓу BIM и GIS системите. Со импортирање на IFC датотеката во GIS околина, автоматски се генерираат одделни тридимензионални GIS слоеви за секој тип на објект (сидови, подови, покриви, простории и др.). На овој начин, геореференцираниот BIM модел интегриран во GIS околина овозможува просторна анализа, визуелизација и управување со податоци, неопходни за воспоставување и одржување на 3Д катастарски системи.

Интеграцијата на BIM моделот во IFC формат во GIS околина е успешно реализирана преку создавање на multipatch feature class, при што е задржана деталната просторна геометрија на секој внатрешен простор. Секоја просторија во објектот е преземена како IfcSpace, што овозможува прецизна репрезентација на внатрешната структура. Преку примената на зонирање (IfcZone) дефинирано во IFC шемата, поединечните простории се логички групирани во целини, со што се формирани посебни единици врз кои се регистрираат правата на недвижностите.



Слика 7.31. Дефинирани просторни сегменти во рамките на BIM

Сите зони се просторно и семантички поврзани со основниот објект (IfcBuilding), обезбедувајќи јасна хиерархиска структура што кореспондира со реалната организација на објектот. Моделот е точно геореференциран и поврзан со соодветната 2Д катастарска парцела, што создава основа за формирање на 3Д катастарски систем.

Од IFC датотеката се извлечени атрибути како што се површина на кат, волумен на просторија и други параметри, кои се зачувани во атрибутната табела на multipatch објектите во GIS околината. На овој начин, секој катастарски просторен елемент може да се поврзе со база на податоци што ги содржи правата, одговорностите и ограничувањата, овозможувајќи интеграција со податоците од катастарскиот систем.

Табела 7.10. Атрибутивна табела со податоци за станбените единици во анализираној објект

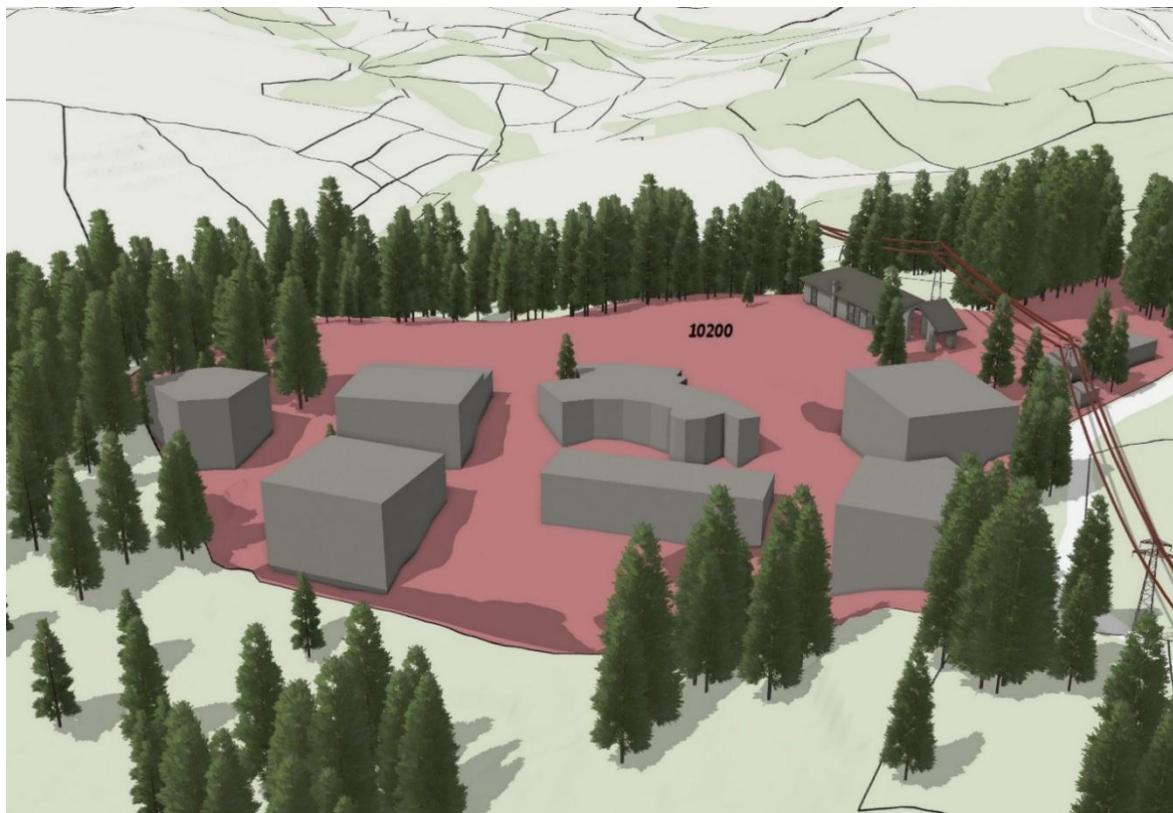
Единствен идентификатор на објект	Единствен идентификатор на станбена	Станбена единица (IfcZone)	Намена на посебен	Број на посебен дел	Кат (Level)	Површина (Area) [m ²]	Волумен (Volume) [m ³]
22_1_1	1_1	1	Деловен простор	1	Кат 1	75	283
22_1_1	1_1	1	Тоалет	2	Кат 1	10	21
22_1_1	1_1	1	Деловен простор	3	Кат 2	44	110
22_1_1	1_2	2	Деловен простор	4	Кат 1	15	67
22_1_1	1_2	2	Деловен простор	5	Кат 1	26	126

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 и со тематски слоеви што ја опишуваат природната и инфраструктурната околина (вегетација, електроенергетска мрежа, патеки и паркинџ). Со ваквиот пристап методологијата се тестира не само како Scan-to-BIM процедура, туку 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.

Клучен предуслов за интеграцијата е формирањето на конзистентна висинска и просторна основа врз база на UAV-LiDAR облак од точки. Од обработениот и класифициран облак се генерираат 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 макро-ниво.

Од класифицираниот облак од точки направена е екстракција на стеблата на дрвата и се трансформирани во слој со точки. Овој избор е методолошки оправдан бидејќи стеблото е најстабилен планиметриски индикатор за позицијата на дрвото, за разлика од крошната која е променлива. За секое дрво е отчитана висина од nDSM и доделена како атрибут, што овозможува 3Д симболизација и аналитичка употреба (на пр., процена на засенчување, видливост). На тој начин, вегетацијата се третира како семантички и метрички дефиниран слој. Инфраструктурните елементи на електроенергетската мрежа се обработени преку класификација во столбови и жици, столбовите се претставени како

точки, а жиците се трансформирани во 3Д линии. Оваа конверзија ја претвора густата LiDAR геометрија во тополошки поедноставен, но аналитички покорисен модел, применлив за проверки на минимални растојанија, идентификација конфликтни зони и управување со инфраструктура.



Слика 7.32. Интегриран BIM-GIS модел на хотелски комплекс

Интегрираниот модел е организиран во јасни тематски слоеви (терен, објекти, вегетација, инфраструктура, пристап и транспорт), со контролиран баланс меѓу деталност и ефикасност. Висока резолуција се применува таму каде што се критични внатрешните единици и граници, а поширокиот контекст се моделира генерализирано за прегледност. 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 управувачки сценарија во рамки на дигитален близнак, каде недвижноста се разгледува како дел од поширок, реално условен просторен систем.

7.3.5. Евалуација и валидација на моделот

Евалуацијата и валидацијата на третиот модел е спроведена за да се потврди 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 беше на статистичка проверка на геометриската точност на внатрешноста и габаритот, овде валидацијата е ориентирана кон системско ниво: мултисензорска фузија, стабилност на вертикалната компонента во наклонет терен, когезистенција 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 рачен LiDAR со SLAM). 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. Проверките покажаа 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 за сите објекти најчесто е неоправдано. 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. Најпрво, 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 најчесто 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 дека 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-скенер покажуваат дека мобилното снимање во затворен простор, кога е изведено со соодветна траекторија и контролиран режим на движење (0,5–1,0 m/s), може да обезбеди облак од точки со доволна густина и стабилност за изработка на *as-built* BIM модел на ниво LOD 300–350. Средната густина од околу 42 500 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 траекторија 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 клучна 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 критичен 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, и
- динамички објекти (лица, подвижни врати), 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 (пример, да се постави сид, а точките да претставуваат кластер од шум). 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 квалитет

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 и 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 ± 2 mm, што обезбедува високо ниво на доверливост на референтниот сет. Анализата е изведена 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 реконструкцијата: број на мерења $n=86$, средна разлика $\Delta L \approx -0,47$ mm и 95% интервал на доверба $[-3,05$ mm, $+2,12$ mm], што укажува на отсуство на статистички значајна систематска пристрасност. Дисперзијата е на сантиметарско ниво $s \approx 1,21$ cm, со MAE $\approx 0,91$ cm и RMSE $\approx 1,20$ cm. Најлошото сценарио е $\max|\Delta L| \approx 2$ cm, а 95% интервалот на согласност е приближно $[-2,41$ cm, $+2,32$ cm], што дефинира реалистични граници во кои ќе 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 за мерења во внатрешен простор, при што отстапувањата се во рамки на прифатливи толеранции. Од практична перспектива, особено е важно што сите споредени растојанија се во ± 2 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 извештаи.

8.1.6. Релеванност за каталог 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 не е само „градежниот елемент“, туку 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 катастар, 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 е намерно 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 соопредувања

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 мерки, 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 внатрешни просторни податоци со SLAM LiDAR, како и способноста да се изгради 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. Објаснување на изборите на моделите 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 информациона систем јасно покажува дека 2Д пристапот концептуално не може да ја прикаже реалната просторна и правна структура на мостот. Регистрацијата преку четири полигони кои ги претставуваат основите на столбовите 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 евидентирани 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 механизми 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 простор.

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 инфрасруктурна 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 стабилност 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,

работи) 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 апсолутна просторно референцирање, неопходна за GIS интеграција и катастарска употреба.

Во практична смисла, референтните точки имаат две улоги: ја стабилизираат трансформацијата и 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, деталност 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 елементи. 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, моделот може директно да се преклопи со ортофото, 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 сообраќајница). 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 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 мери само преку локална усогласеност 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, трансформационски 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 и проверки.

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. Кога пресметаните површини од моделот целосно се совпаѓаат со официјално евидентираниите катастарски површини, тоа 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 волумен, 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.

Во целина, валидацијата 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. Импlications 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 согледавања

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, 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 моделот и улогата во методологијата

Третиот модел, кој претставува хотелски комплекс со повеќе објекти во заеднички просторен систем и 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 метричка проверка на еден објект и дел од објект), тука резултатите имаат системски карактер: се проверува дали интеграцијата BIM-GIS 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 макро ниво.

8.3.2. Ефективноста од комбинираната аквизиција врз конзистентноста на моделот

Резултатите од третиот модел јасно ја потврдуваат оправданоста на комбинираниот пристап. UAV-LiDAR обезбедува континуирана покриеност на кровните

рамнини, горните делови на објектите и теренот. 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 3D 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 мулти-тематски просторен запис. Со примена на методи базирани на вештачка интелигенција и однапред тренирани модели, точките се организираат во релевантни класи (терен, објекти, вегетација, инфраструктура и сл.), со што директно се овозможува генерирање на дериватни модели и анализи: издвојување на теренски точки за изработка 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 3D модели во наклонет терен: „лебдење“ на објекти, потонување во терен 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 сценарија (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 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 атрибутивно поврзување, а IfcZone овозможува нивно логичко групирање во функционални целини. Можноста на GIS за поврзување на геометријата со атрибутивна 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 ја покажува и потребата сложените вертикални односи и функционалните поделби тешко можат недвосмислено да се претстават во 2Д репрезентација без ризик од интерпретативни грешки.

8.3.8. Наградба на моделот со дојолниелни тематски слоеви (вегетација, електрични столбови, електропроводи, патеки, паркинџ)

Додадената вредност на третиот модел е во тоа што во интегрираната GIS компонента се моделираат слоеви (вегетација, електрични столбови, електропроводи, патеки, паркинџ) со што се надминува концептот на моделирање само на објектите од примарен интерес. Екстракцијата на дрва (со класифицирани стебла), електрични столбови и електропроводи 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. Токму тука се гледа 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 околинџ:

- Разлики меѓу UAV-LiDAR и SLAM облакот од точки. Поради различна перспектива, различни густини 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 густџ појасџ во пониските деловџ на објектите. Без редукција и сегментација, ова може да доведе до нерамномерна деталност на интерпретацијата при моделирањето.
- Вегетацијата и скриени зони создаваат празнинџ и шум во облакот од точки и

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 во 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 3D 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 попрецизно 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 семантичко богати и структурно точни 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 конструкторските податоци со 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 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 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) и конструктивните елементи 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.

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 широка 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, урбано 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-моделите. 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 мапирање 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 близнак (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 интегрираните BIM-GIS модели 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.

Потребно е 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] Aien, A., Kalantari, M., Rajabifard, A., & Williamson, I. (2013). Advanced 3D cadastral data modelling. *Land Use Policy*, 30(1), 26–40.
- [2] 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), 311.
- [3] Bachmann, F., Matthias, S., & Lauer, M. (2021). Intensity-based filtering of indoor LiDAR point clouds for SLAM applications. *Remote Sensing*, 13(4), 1–20.
- [4] Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 199–214.
- [5] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., & Previtali, M. (2015). Creation of parametric BIM objects from point clouds using different techniques. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 33–40.
- [6] Besl, P. J., & McKay, N. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- [7] Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25–37.
- [8] Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., & Zhao, J. (2014). Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 1–15.
- [9] Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., & Zhao, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25–37.
- [10] Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- [11] Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- [12] Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Springer.
- [13] buildingSMART International. (n.d.). *Industry Foundation Classes (IFC)*.
- [14] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems* (2nd ed.). Oxford University Press.
- [15] Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., et al. (2016). Past, present, and future of SLAM: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*.
- [16] 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. doi:10.1109/TRO.2016.2624754.
- [17] Clemen, C., & Gruber, S. (2020). Geo-referencing BIM models using IFC and ISO standards. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, 232–248.
- [18] Diakité, A. A., & Zlatanova, S. (2020). Automatic geo-referencing of BIM in GIS environments using building footprints. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80, 101453.
- [19] 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.

- [20] Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., Stoter, J., & Commandeur, T. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547–569.
- [21] Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*.
- [22] 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.). Wiley.
- [23] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). Wiley.
- [24] El-Mekawy, M., & Östman, A. (2010). Semantic mapping: An ontology engineering method for integrating building models in IFC and CityGML. In *Proceedings of the 3rd ISDE Digital Earth Summit*.
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] Ghawana, T., & Hespanha, J. (2021). 3D cadastre and the role of underground infrastructure modelling. *Journal of Geospatial Information Science*, 4(2), 45–63.
- [28] Goodchild, M. F. (1992). Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1), 31–45.
- [29] Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML–Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12–33.
- [30] Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (Eds.). (2012). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (Version 2.0.0; OGC Doc. No. 12-019)*. Open Geospatial Consortium.
- [31] Ilves, R., Arroyo Ohori, K., & Stoter, J. (2020). Integrating BIM and GIS for 3D spatial information. *Automation in Construction*, 114, 103132.
- [32] International Organization for Standardization. (2012). *Geographic information–Land Administration Domain Model (LADM) (ISO 19152:2012)*.
- [33] International Organization for Standardization. (2018). *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries–Part 1: Data schema (ISO 16739-1:2018)*.
- [34] International Organization for Standardization. (2021). *Geographic information–BIM to GIS conceptual mapping (B2GM) (ISO/TS 19166:2021)*.
- [35] International Organization for Standardization. (2024). *ISO 16739-1:2024 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries–Part 1: Data schema*. ISO.
- [36] Isikdag, U., & Zlatanova, S. (2009). Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using BIM. *3D Geo-Information Sciences*, 79–96.
- [37] Isikdag, U., & Zlatanova, S. (2009). Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using BIM. In *3D Geo-Information Sciences* (pp. 79–96). Springer.
- [38] ISO. (2018). *ISO 16739-1:2018 – Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the*

- construction and facility management industries. International Organization for Standardization.
- [39] Karam, S., Lichti, D., & Steward, J. (2020). Analysis of multipath and specular reflections in terrestrial laser scanning. *ISPRS Annals*, V-2-2020, 345–352.
- [40] Karki, S., Thompson, R., & McDougall, K. (2020). Building digital cadastre for 3D urban spaces. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 88.
- [41] Kersten, T., Lindstaedt, M., & Mechelke, K. (2018). Fusion of terrestrial laser scanning, UAV photogrammetry and GNSS for cultural heritage documentation. *ISPRS Archives*.
- [42] Kersten, T., Lindstaedt, M., & Mechelke, K. (2018). Geometric accuracy investigations of BIM models derived from laser scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 507–514.
- [43] Kim, G., Kim, A., & Kim, H. (2018). Scan context: Egocentric spatial descriptor for place recognition within 3D point cloud map. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [44] Kolbe, T. H. (2009). Representing and exchanging 3D city models with CityGML. *3D Geo-Information Sciences*, 15–31.
- [45] Kolbe, T. H. (2019). *CityGML – Modeling Cities in 3D*. Springer.
- [46] Kümmerle, R., Grisetti, G., Strasdat, H., Konolige, K., & Burgard, W. (2011). g2o: A general framework for graph optimization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*
- [47] Kutzner, T., & Kolbe, T. H. (2018). Extending semantic 3D city models by supply and disposal networks for urban analyses. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(4), 655–682.
- [48] 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(1), 43–61.
- [49] Ledoux, H., Arroyo Ogori, 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, Article 4.
- [50] Lemmen, C. (2015). The Land Administration Domain Model (LADM): An ISO standard for land administration. *Land Use Policy*, 49, 565–575.
- [51] Lemmen, C., van Oosterom, P., & Bennett, R. (2015). The Land Administration Domain Model. *Land Use Policy*, 49, 535–545.
- [52] Lemmen, C., van Oosterom, P., Eisenhut, C., et al. (2015). The land administration domain model. *Land Use Policy*, 49, 535–545.
- [53] 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.
- [54] Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J. C., Li, X., & Liu, R. (2017). BIM–GIS integration for construction safety: Literature review. *Automation in Construction*, 34, 1–18.
- [55] Liu, Y., Chen, Z., & Shen, S. (2021). LiDAR-based SLAM using hybrid feature-ICP registration. *Robotics and Autonomous Systems*.
- [56] Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley.
- [57] 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.
- [58] Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017). From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors. *Remote Sensing*, 9(1), 43.
- [59] Mallet, C., & Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 1–16.
- [60] National Institute of Building Sciences. (2021). National BIM Standard–United States, Version 3 (NBIMS-US V3).
- [61] Noardo, F., Harrie, L., Arroyo Ogori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., ... 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.
- [62] Noardo, F., Harrie, L., Arroyo Ogori, K., et al. (2020). GIS and BIM integration: A systematic literature review and future research agenda. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 502.
- [63] Nouvel, R., Bahu, J. M., Kaden, R., Kämpf, J., & Lauster, M. (2017). Genesis of the CityGML Energy ADE. *Journal of Urban Planning and Development*, 143(4), 04017012.
- [64] Open Geospatial Consortium. (2021). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard (Version 3.0; OGC Doc. No. 20-010). OGC.
- [65] Open Geospatial Consortium. (2021). OGC CityGML 3.0 Conceptual Model Standard (OGC 20-010).
- [66] Open Geospatial Consortium. (2023). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 2: GML Encoding Standard (Version 3.0; OGC Doc. No. 21-006r2). OGC.
- [67] Open Geospatial Consortium. (n.d.). CityJSON (OGC Community Standard).
- [68] Park, J., & Kim, J. (2020). Framework for automated building permit review using BIM and GIS integration. *Buildings*, 10(7), 119.
- [69] Previtali, M., Barazzetti, L., & Roncoroni, F. (2020). Indoor mobile mapping for Scan-to-BIM applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*.
- [70] Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., & Banfi, F. (2019). Reference planes extraction and modeling for BIM from point clouds. *Applied Geomatics*, 11, 159–175.
- [71] Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127–2145.
- [72] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (3rd ed.). Wiley.
- [73] Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D., & Forest, J. (2007). A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing*, 25(5), 578–596.
- [74] Sandberg, H. (2003). Subsurface property rights: A legal perspective. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 21(2), 144–164.
- [75] Scaramuzza, D., & Fraundorfer, F. (2011). Tutorial: Visual odometry. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 18(4), 80–92.
- [76] Scaramuzza, D., & Siegwart, R. (2008). Appearance-guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*.
- [77] Shan, J., & Toth, C. (Eds.). (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and*

- Processing (2nd ed.). CRC Press.
- [78] Shojaei, D., Olfat, H., Rajabifard, A., Kalantari, M., & Bishop, I. (2017). Visualization requirements for 3D cadastral systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 21–36.
- [79] 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.
- [80] Stoter, J. E. (2004). 3D cadastre (Doctoral dissertation). Delft University of Technology.
- [81] Stoter, J. E., & Van Oosterom, P. J. M. (2006). 3D cadastre in an international context: Legal, organizational, and technological aspects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), 627–642.
- [82] Stoter, J., & van Oosterom, P. (2020). 3D cadastral modelling and LADM. In *Advances in 3D Cadastres* (pp. 45–70).
- [83] Stoter, J., & van Oosterom, P. (2020). 3D cadastre and its development worldwide. In *Advances in 3D Cadastres* (pp. 17–34).
- [84] Stoter, J., Ploeger, H., van Oosterom, P., et al. (2017). 3D land administration for 3D geo-information. *Land Use Policy*, 49, 528–538.
- [85] 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.
- [86] Stouffs, R., Tauscher, H., & Biljecki, F. (2018). Achieving completeness in IFC files. *Automation in Construction*, 96, 207–219.
- [87] Stouffs, R., Tauscher, H., & Biljecki, F. (2018). Achieving design–analysis interoperability: Lessons from a case study. *Automation in Construction*, 87, 229–240.
- [88] Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375.
- [89] 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.
- [90] Sun, Z., Wang, C., & Wang, P. (2019). 3D utility network modelling and analysis. *Automation in Construction*, 103, 38–52.
- [91] Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2011). 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.
- [92] Technical University of Munich (TUM), Chair of Geoinformatics. (2021). Publication of the new CityGML 3.0 standard (published 13 September 2021).
- [93] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic Robotics*. MIT Press.
- [94] Tomlinson, R. F. (1968). A geographic information system for regional planning. In *Proceedings of the Symposium on Land Use and Regional Planning* (pp. 200–210).
- [95] 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.
- [96] 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.

- [97] Vosselman, G., & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press.
- [98] 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.
- [99] Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 68-82.
- [100] Zhang, J., & Singh, S. (2014). LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. In *Robotics: Science and Systems*.
- [101] Zhang, X., Deng, Z., & Yang, X. (2018). Integrating BIM with GIS for built environment management: A review. *Automation in Construction*, 89, 1-13.
- [102] Zhao, X., Yang, C., & Cheng, J. C. P. (2019). BIM-GIS integration for smart city development: A review. *Automation in Construction*, 101, 1-15.
- [103] Zhu, J., & Wu, P. (2022). BIM/GIS data integration from the perspective of information flow. *Automation in Construction*, 136, 104166.
- [104] Zlatanova, S., Sithole, G., & Nakagawa, M. (2020). *3D GIS for urban applications*. CRC Press.
- [105] Zlot, R., & Stentz, A. (2016). Large-scale exploration and mapping using a handheld LiDAR sensor. *Journal of Field Robotics*, 33(7), 1035-1063.