



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

TEMA E DISERTACIONIT

**KRAHASIMI I METODAVE TË NDRYSHME TË FOTOGRAMETRISË
DIXHITALE (UAV, SKANIMEVE ME LIDAR, LASER SKANER) NË
RILEVIMIN E OBJEKTEVE KOMPLEKSE INXHINIERIKE**

(për marrjen e gradës shkencore “Doktor” në Gjeodezi)

Mbrojtur më datë 15.01.2026 para Jurisë së miratuar të përbërë nga:

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| 1. Prof. Dr. Oltion MARKO | Kryetar |
| 2. Prof. Asoc. Bilbil NURÇE | Anëtar - Oponent |
| 3. Prof. Asoc. Raimonda DERVISHI | Anëtar |
| 4. Prof. Dr. Elvin TOROMANI | Anëtar - Oponent |
| 5. Prof. Asoc. Leonidha PERI | Anëtar |



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

Copyright

I

Arli Llabani

Viti 2026



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

**Udhëheqësi Prof. Asoc. Namik Kopliku vëteton se ky është version i miratuar i
disertacionit të mëposhtëm:**

**KRAHASIMI I METODAVE TË NDRYSHME TË FOTOGRA METRISË
DIXHITALE (UAV, SKANIMEVE ME LIDAR, LASER SKANER) NË
RILEVIMIN E OBJEKTEVE KOMPLEKSE INXHINIERIKE**

Prof. Asoc. Namik Kopliku



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

**KRAHASIMI I METODAVE TË NDRYSHME TË FOTOGRA METRISË
DIXHITALE (UAV, SKANIMEVE ME LIDAR, LASER SKANER) NË
RILEVIMIN E OBJEKTEVE KOMPLEKSE INXHINIERIKE**

Përgatitur nga:

Msc. Arli Llabani

Disertacion i paraqitur në

Fakulteti i Inxhinierisë së Ndërtimit

Universiteti Politeknik i Tiranës

Në përputhje të plotë

Me kërkesat

Për gradën Doktor

Universiteti Politeknik i Tiranës

Janar 2026



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

Falenderime

Së pari, shpreh mirënjohjen dhe falënderimet e mia më të sinqerta për udhëheqësin shkencor të këtij disertacioni, Prof. Asoc. Namik Kopliku, për udhëzimin profesional, mbështetjen e vazhdueshme dhe sugjerimet e vlefshme gjatë gjithë procesit të punës kërkimore. Roli dhe përkushtimi i tij kanë qenë thelbësorë në realizimin e kësaj teme.

Gjithashtu, dua të falënderoj me mirënjohje të veçantë kolegët e Departamentit të Gjeodezisë, pranë Fakultetit të Inxhinierisë së Ndërtimit, për bashkëpunimin, diskutimet dhe ndihmën e dhënë gjatë fazave të matjeve dhe përpunimit të të dhënave. Kontributi i tyre ka ndihmuar ndjeshëm në përmirësimin e cilësisë së punës kërkimore.

Në mënyrë të veçantë, falënderoj familjen time për mbështetjen e palodhur, durimin dhe motivimin që më kanë dhënë gjatë gjithë kësaj periudhe sfiduese. Pa praninë dhe besimin e tyre, kjo arritje nuk do të ishte e mundur.

Kjo punë është rezultat i një rrugëtimi që nuk do të kishte marrë këtë formë pa ndihmën, udhëzimin dhe inkurajimin e njerëzve të përmendur më sipër. Çdo kontribut ka lënë gjurmë të çmuar në përfundimin e këtij disertacioni.



REPUBLIKA E SHQIPËRISË
UNIVERSITETI POLITEKNIK I TIRANËS
FAKULTETI I INXHINIERISË SË NDËRTIMIT
DEPARTAMENTI I GJEODEZISË

Deklaratë mbi originalitetin

Arli Llabani

Deklaroj se kjo tezë përfaqëson punën time origjinale dhe nuk kam përdorur burime të tjera, përveç atyre të evidentuara nëpërmjet citimeve.

Të gjitha të dhënat, tabelat, figurat dhe citimet në tekst, të cilat janë riprodhuar prej ndonjë burimi tjetër, duke përfshirë dhe internetin, janë pranuar në mënyrë eksplicite si të tilla.

Jam i/e vetëdijshëm se në rast të mospërputhjeve, Senati i UPT-së është i ngarkuar të më revokojë gradën “Doktor”, që më është dhënë mbi bazën e kësaj teze, në përputhje me

“Rregulloren e Programeve të Ciklit të tretë (Doktoratë) në UPT”, dt 12.09.2025 neni 21.

Tiranë, 03.11.2025

Firma

PËRMBAJTJA

Përmbajtja	6
Lista e Figurave.....	9
Lista e Tabelave	10
Lista e shkurtimeve	12
Abstrakti.....	14
1 Hyrje	15
1.1 Qëllimi dhe Objektivat e Studimit	15
1.2 Metodologjia	16
1.3 Kontributet dhe kufizimet	17
1.4 Struktura e disertacionit	18
2 Bazat teorike dhe rishikim i literaturës	20
2.1 Fotogrametria dixhitale: baza dhe evolucioni	20
2.1.1 Parimi themelor: ekuacionet e kolinearitetit	21
2.1.2 SfM dhe MVS	22
2.1.3 Parametrat e cilësisë: GSD dhe saktësia	23
2.1.4 Produktet e fotogrametrisë dixhitale	23
2.1.5 Avantazhet dhe kufizimet	24
2.2 Fotogrametria UAV: RTK/PPK, GCP, parametrat e fluturimit	24
2.2.1 Evolucioni dhe kategoritë e UAV-ve.....	25
2.2.2 Parametrat kryesorë të fluturimit dhe GSD	25
2.2.3 Përcaktimi i orientimit dhe roli i GCP/RTK-PPK	26
2.2.4 Produktet e gjeneruara nga fotogrametria UAV	27
2.2.5 Avantazhet dhe kufizimet e UAV fotogrametrisë	28
2.3 Skanimi me lazer: TLS dhe PLS	29
2.3.1 TLS (Skanimi tokësor me lazer)	30
2.3.2 PLS (Sistemet portabël të skanimit me lazer).....	32
2.3.3 Krahasimi TLS vs PLS në literaturë	34
2.4 UAV LiDAR	34
2.4.1 Parimi i funksionimit dhe karakteristikat teknike	34
2.4.2 Avantazhet krahasuar me UAV fotogrametri dhe TLS	35
2.4.3 Aplikimet në vegjetacion	36

2.4.4	Aplikimet në infrastrukturë.....	37
2.4.5	Kufizimet dhe sfidat.....	38
2.5	Integrimi i burimeve të të dhënave (SfM, ICP, C2C)	39
2.5.1	SfM dhe regjistrimi i reve të pikave	39
2.5.2	Cloud-to-Cloud (C2C) dhe Cloud-to-Mesh (C2M)	40
2.5.3	Integrimi hibrid UAV–TLS–LiDAR–PLS	41
2.5.4	Analiza e gabimit dhe vlerësimi i saktësisë	43
2.6	Roli i AI në pastrim/klasifikim dhe analizë diferenciale.....	44
2.6.1	Pastrimi i reve të pikave me AI.....	44
2.6.2	Klasifikimi automatik i objekteve.....	45
2.6.3	Analiza diferenciale dhe monitorimi i deformimeve	47
2.6.4	Integrimi i AI me programet kompjuterike.....	47
2.7	Praktikat në objekte inxhinierike.....	49
2.7.1	Inspektimi i urave	49
2.7.2	Monitorimi i tuneleve	50
2.7.3	Ndërtesat shumëkatëshe dhe BIM	51
2.7.4	Infrastruktura rrugore dhe hekurudhore.....	53
2.7.5	Përmbledhje dhe tendenca të ardhshme	53
3	Materiali dhe metodat	55
3.1	Rasti i Studimit: Kalaja e Vilë Bashtovës	55
3.1.1	Historiku dhe Analiza Arkitekturore	56
3.2	Procesi i matjeve në terren	58
3.2.1	Krijimi i rrjetit gjeodezik lokal	58
3.2.2	Pikat e kontrollit tokësor (GCP)	60
3.2.3	Vendosja e pikave të kontrollit në fasada	62
3.3	Mbledhja e të dhënave.....	65
3.3.1	Fotogrametria UAV	65
3.3.2	Skanimi me Lazer Tokësor (TLS)	67
3.3.3	PLS (Sistemet Portabël të Skanimit me Lazer).....	70
3.3.4	Skanimi ajror me LiDAR.....	72
3.3.5	Skanimi mobil me iPhone 13 Pro Max + RTK Vidoc	74
3.4	Përpunimi i të dhënave	76

3.4.1	Përpunimi i të dhënave UAV	76
3.4.2	Përpunimi i të dhënave TLS dhe PLS	80
3.4.3	Përpunimi i të dhënave mobile Vidoc RTK Rover	83
3.4.4	Përpunimi i të dhënave LiDAR.....	85
3.5	Filtrimi dhe klasifikimi i reve të pikave me AI.....	87
3.5.1	Procesi i filtrimit me AI	88
4	Rezultatet dhe Diskutimi.....	91
4.1	Krahasimet e metodave	91
4.1.1	Krahasimi UAV – TLS	91
4.1.2	Krahasimi UAV – LiDAR	93
4.1.3	Krahasimi TLS – LiDAR.....	94
4.1.4	Krahasimi UAV – PLS	96
4.1.5	UAV LiDAR dhe iPhone+Vidoc.....	98
4.1.6	Integrimet UAV+TLS dhe PLS+TLS	100
4.1.7	Analizë e krahasimit relativ të metodave.....	101
4.2	Krahasimi absolut.....	102
4.3	Konsideratat për kosto dhe kohë	106
4.4	Testimi në objekte të tjera inxhinierike.....	110
4.4.1	Ura e Brarit: TLS + UAV	110
4.4.2	Ura metalike: PLS + TLS	111
4.4.3	Ndërtesa shumëkatëshe: UAV + PLS	112
4.4.4	Kalaja e Krujës.....	113
4.4.5	Godina e UPT	114
4.4.6	Përmbledhje krahasuese.....	114
4.5	Rekomandime operative për zgjedhjen e metodës	116
5	Përfundime.....	118
5.1	Konkluzione	118
5.2	Kontributet shkencore dhe praktike	119
5.3	Kufizimet e studimit.....	120
5.4	Sugjerime për kërkime të mëtejshme	121
6	Referencat	122

Lista e Figurave

Figura 1- Rrjedha e punës	16
Figura 2 - Krahاسimi i fotogrametrisë analoge, dixhitale dhe SfM/MVS.....	20
Figura 3 - Parimi i kolinearitetit (pika në terren, qendra e kamerës, pika në planin e imazhit).	22
Figura 4 - Diferenca mes imazheve nadirale dhe oblike në fotogrametri UAV.	26
Figura 5 - Ortofoto dhe model 3D i gjeneruar nga imazhe UAV.	28
Figura 6 - Kufizimet e fotogrametrisë UAV në fasada vertikale.....	29
Figura 7 - Parimi i matjes së distancës në TLS: time-of-flight dhe phase-shift.	30
Figura 8 - Regjistrimi i reve të pikave TLS me targeta dhe ICP.	31
Figura 9 - PLS GoSlam RS100i (burimi: www.surveymappinginstrument.com)	32
Figura 10 - Diferenca mes UAV LiDAR (majtas, penetrim në tokë) dhe UAV fotogrametri (djathtas, sipërfaqe kurorash).....	36
Figura 11 - Histogrami i devijimeve të metodave pas integritit.	44
Figura 12 - Vendndodhja gjeografike e Kalasë së Vilë Bashtovës.....	55
Figura 13 - Skema e perimetrit të kalasë me dimensione kryesore.	57
Figura 14 - Pajisja GNSS gjatë procesit të matjeve.....	58
Figura 15 - Rrjeti gjeodezik lokal i ngritur rreth Kalasë së Bashtovës (GNSS + Total Station).....	60
Figura 16 - Skema e shpërndarjes të pikave GCP rreth kalasë	61
Figura 17 - a)Pika GCP të identifikuar në fotografi ajrore, b)Tipi i GCP-ve të përdorura	61
Figura 18 - Skema e shpërndarjes së markave në fasadën e kalasë	63
Figura 19 - Markat e vendosura në fasadë të identifikuar në foto ajrore	65
Figura 20 - a)Planifikimi i misionit me V-Map Aerial System, b) Sinjali dhe numri i satelitëve të dronit në momentin e fluturimit.....	66
Figura 21 - Planifikimi i misionit oblik me 5 misione të ndryshme	67
Figura 22 - Skanimi me Faro Focus S70 i kalasë	69
Figura 23 - Trajektorja e ndjekur gjatë skanimit me GoSlam RS100i	71
Figura 24 - Droni DJI Matrice 300 RTK gjatë fotografimit të Kalasë së Vilë Bashtovës	72
Figura 25 - Planifikimi i misionit me UAV Lidar	73
Figura 26 - Iphone 13 Pro Max i lidhur me Vidoc RTK Rover (Burimi: DJI Ferntech)..	75
Figura 27 - Trajektorja e ndjekur me skanimin mobile	75
Figura 28 - Orientimi i imazheve dhe pozicionimi i GCP-ve në Agisoft Metashape.....	78
Figura 29 - Modeli 3D i bashkuar nga të gjitha dataset-et UAV në Metashape.....	80
Figura 30 - Modeli tridimensional i unifikuar nga FARO Focus S70, Leica BLK360 G1 dhe GoSLAM RS100i.....	82
Figura 31 - Integrimi i re-së së pikave nga iPhone LiDAR me modelin TLS në CloudCompare	84
Figura 32 - Reja e pikave LiDAR pas kalibrimit fillestar në DJI Terra (Zenmuse L1 – Matrice 300 RTK).....	86
Figura 33 - Rrjedha e punës e filtrimit me Inteligjencë Artificiale.....	89

Figura 34 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV dhe TLS pas analizës Cloud-to-Cloud.....	92
Figura 35 - Harta e devijimeve UAV–LiDAR.....	94
Figura 36 - Harta e devijimeve ndërmjet re-ve TLS dhe LiDAR (CloudCompare).	96
Figura 37 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV dhe PLS pas analizës Cloud-to-Cloud.....	98
Figura 38 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV LiDAR dhe iPhone LiDAR (ViDoc RTK)	100
Figura 39 - Integrimi UAV + TLS.....	101
Figura 40 - Harta e shpërndarjes së devijimeve në pikat e kontrollit (CP) për çdo metodë	104
Figura 41 - Modeli 3D i urës së Brarit përftuar nga kombinimi TLS-UAV.....	111
Figura 42 - Modeli 3D i urës metalike i përftuar nga integrimi PLS-TLS	112
Figura 43 - Modeli 3D i përftuar nga integrimi UAV-PLS	112
Figura 44 - Modeli 3D i Kalasë së Krujës nga integrimi UAV-TLS.....	113
Figura 45 - Modeli 3D i godinës së UPT nga integrimi UAV-TLS	114
Figura 46 - Grafik krahasues i gmk të metodave fotogrametrike në objektet inxhinierike të studiuara.....	115

Lista e Tabelave

Tabela 1 - Krahasim i karakteristikave të fotogrametrisë analoge, dixhitale dhe SfM.....	21
Tabela 2 - Krahasimi i karakteristikave midis UAV-ve me krahë fiks dhe UAV-ve multirotorë.....	25
Tabela 3 - Krahasimi i qasjeve të ndryshme për orientimin e kamerës: vetëm GCP, vetëm RTK/PPK dhe kombinim.	27
Tabela 4 - Krahasimi i TLS dhe PLS sipas literaturës (saktësia, shpejtësia, fleksibiliteti, kostoja).....	33
Tabela 5 - Krahasimi i aplikimeve UAV LiDAR në pylltari dhe infrastrukturë (burimi: ISPRS literaturë).	38
Tabela 6 - Avantazhet dhe kufizimet e ICP në regjistrimin e reze të pikave.	40
Tabela 7 - Krahasimi i metodave të integritit sipas literaturës (saktësia, koha, fleksibiliteti).....	42
Tabela 8 - Krahasimi i metodave të klasifikimit automatik në re pikash.	46
Tabela 9 - Shembuj të integritit të AI në programet e përpunimit.....	48
Tabela 10 - Integrimi UAV–TLS–PLS në BIM (saktësia, koha, aplikimet).	52
Tabela 11 - Krahasimi përfundimtar i metodave UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR në objekte inxhinierike.	54
Tabela 12 - Rezultatet e kompensimit të rrjetit gjeodezik lokal (GNSS + Total Station)	59
Tabela 13 - Koordinatat e pikave të kontrollit tokësor (GCP).....	62
Tabela 14 - Koordinatat e targetave të kontrollit	64
Tabela 15 - Parametrat kryesorë të FARO Focus S70 dhe Leica BLK360 G1.	69
Tabela 16 - Parametrat kryesorë të GoSlam RS100i	71

Tabela 17 - Parametrat kryesorë të Zenmuse L1	74
Tabela 18 - Parametrat kryesorë të sistemit iPhone 13 Pro Max + RTK Vidoc	76
Tabela 19 - Rezultatet e përpunimit dhe bashkimit të dataset-eve UAV në Agisoft Metashape	79
Tabela 20 - Rezultatet e përpunimit dhe bashkimit të skanimeve TLS/PLS në CloudCompare	82
Tabela 21 - Parametrat e përpunimit dhe krahasimit ndërmetodik të modeleve mobilë me TLS	84
Tabela 22 - Parametrat e përpunimit dhe rezultatet e saktësisë së modelit LiDAR	87
Tabela 23 - Krahasimi i saktësisë së reve të pikave para dhe pas filtrimit me AI	89
Tabela 24 - Rezultatet e krahasimit UAV – TLS (Cloud-to-Cloud)	92
Tabela 25 - Rezultatet e krahasimit UAV–LiDAR (Cloud-to-Cloud)	93
Tabela 26 - Rezultatet e krahasimit TLS – LiDAR (Cloud-to-Cloud)	95
Tabela 27 - Rezultatet e krahasimit UAV – PLS (Cloud-to-Cloud)	97
Tabela 28 - Rezultatet e krahasimit UAV LiDAR – iPhone LiDAR (ViDoc RTK)	99
Tabela 29 - Krahasimi i integriteteve UAV+TLS dhe PLS+TLS	101
Tabela 30 - Krahasimi i koordinatave të check points me metodat UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR	103
Tabela 31 - Krahasimi i metodave të filtrimit (manual vs SOR vs AI)	105
Tabela 32 - Kostoja e pajisjeve dhe programeve kompjuterike	106
Tabela 33 - Koha e matjes në terren	107
Tabela 34 - Koha e përpunimit të të dhënave	108
Tabela 35 - Raporti kosto–saktësi	108
Tabela 36 - Raporti kohë–efikasitet	109
Tabela 37 - Krahasimi i GMK në objektet inxhinierike të studiuara	115

LISTA E SHKURTIMEVE

- **AI** – Inteligjencë artificiale (Artificial Intelligence)
- **ALS** – Skanimi LiDAR ajror (Airborne LiDAR Scanning)
- **BIM** – Modelim informativ i ndërtesës (Building Information Modeling)
- **C2C** – Krahassim re-për-re (Cloud-to-Cloud)
- **CHM** – Modeli i Lartësisë së Vegjetacionit (Canopy Height Model)
- **DSM** – Model dixhital i sipërfaqes (Digital Surface Model)
- **DTM** – Modeli dixhital i terrenit (Digital Terrain Model)
- **GCP** – Pikë kontrolli në terren (Ground Control Point)
- **GMK** – Gabimi mesatar kuadratik (Root Mean Square Error)
- **GNSS** – Sistemi global i navigimit satelitor (Global Navigation Satellite System)
- **GSD** – Distanca midis dy pikselëve fqinj e matur në tokë (Ground Sample Distance)
- **ICP** – Algoritëm i regjistrimit (Iterative Closest Point)
- **IMU** – Njësia e Matjes Inerciale (Inertial Measurement Unit)
- **ISPRS** – Shoqata Ndërkombëtare për Fotogrametri dhe Teledeteksion (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing)
- **LAI** – Indeksi i Sipërfaqes së Gjethëve (Leaf Area Index)
- **LiDAR** – Teknologji matjeje me dritë lazer (Light Detection and Ranging)
- **MLS** – Skanim mobile (Mobile laser Scanning)
- **PLS** – Skanim portativ me lazer (metoda SLAM) (Portable laser Scanning)
- **PPK** – Pozicionim kinematik me përpunim pas matjes (Post Processing Kinematic)
- **RGB** – Ngjyrat bazë në model: e kuqe, jeshile, blu (Red, Green, Blue)
- **RTK** – Pozicionim kinematik në kohë reale (Real Time Kinematic)

- **SfM** – Strukturim në Lëvizje (Structure from Motion)
- **SOR** – Heqja e të Dhënave të Panevojshme Statistikore (Statistical Outlier Removal)
- **TLS** – Skanim me lazer tokësor (Terrestrial laser scanning)
- **ToF** – Koha e fluturimit (Time of Flight)
- **UAV** – Mjet ajror pa pilot (dron) (Unmanned Aerial Vehicle)
- σ – Devijimi standard
- **SLAM** – Lokalizimi dhe hartëzimi i njëkohshëm (Simultaneous localization and mapping)

ABSTRAKTI

Kjo tezë studion dhe krahason në mënyrë të thelluar disa nga teknologjitë më të përdorura në dokumentimin tredimensional: fotogrametrinë ajrore UAV, skanimin tokësor me lazer (TLS), skanimin lëvizës (PLS) dhe UAV LiDAR. Qëllimi i kërkimit është të vlerësohet saktësia, efikasiteti dhe kostoja e secilës metodë për dokumentimin e strukturave të trashëgimisë kulturore dhe objekteve inxhinierike, me rast studimi Kalanë e Vilë Bashtovës dhe me testime shtesë në ura dhe ndërtesa shumëkatëshe.

Metodologjia u mbështet në krahasime të drejtpërdrejta të reve të pikave dhe në analiza absolute duke përdorur pika target të vendosura në fasadat e objekteve. Përveç metodave tradicionale të përpunimit, u aplikuan edhe algoritme të inteligjencës artificiale (AI) për filtrimin dhe pastrimin automatik të reve të pikave, me synimin për të përmirësuar cilësinë dhe për të ulur kohën e përpunimit.

Rezultatet tregojnë se TLS siguron saktësinë më të lartë dhe densitet shumë të madh pikash, duke qenë më i përshtatshmi për dokumentime me precizion shumë të lartë. UAV LiDAR ofron balancën më të mirë mes saktësisë dhe shpejtësisë, me gmk rreth 3.0 cm dhe aftësi për depërtim në vegjetacion. Fotogrametria UAV u tregua më fleksibël dhe ekonomike, ndërsa PLS është veçanërisht i përshtatshëm për ambiente të brendshme dhe dokumentime të shpejta. Integrimet UAV + TLS dhe PLS + TLS rezultuan më efikase, duke kombinuar avantazhet e shpejtësisë dhe saktësisë, dhe duke ulur gmk në vlera rreth 2.5 cm.

Studimi konkludon se zgjedhja e teknologjisë duhet të bazohet në triadën kosto–kohë–saktësi, ndërsa integrimi i metodave ofron qasjen më të qëndrueshme për dokumentim dhe analizë 3D të strukturave komplekse. Kontributet kryesore të punës përfshijnë krijimin e një kuadri krahasues të standardizuar, zhvillimin e protokolleve të integritit UAV–TLS–PLS, dhe zbatimin e AI për përmirësimin e cilësisë së të dhënave në dokumentimet dixhitale të trashëgimisë kulturore dhe inxhinierike.

1 HYRJE

Transformimi dixhital i matjeve topografike ka sjellë një mënyrë të re të dokumentimit të objekteve inxhinierike dhe të trashëgimisë kulturore. Nga teknikat tradicionale të bazuara në matje të shpërndara dhe instrumente klasike, sot përdoren platforma moderne me shumë sensorë që kombinojnë fotogrametrinë ajrore me UAV, skanimin me lazer tokësor (TLS), LiDAR-in ajror dhe skanimin lëvizës (PLS). Këto teknologji punojnë së bashku për të krijuar modele tredimensionale (3D) me saktësi të lartë dhe densitet të madh pikash, të cilat përshkruajnë me detaje të plotë formën dhe përmasat e objekteve.

Kjo qasje e integruar është veçanërisht e rëndësishme për strukturat me gjeometri të ndërlikuar, ku kërkohet të arrihet një balancë mes detajeve dhe mbulimit të plotë hapësinor. Një shembull përfaqësues është Kalaja e Vilë Bashtovës, e cila përfshin si vlera të larta historike, ashtu edhe sfida të theksuara teknike: mure me përbërje heterogjene, lartësi të ndryshme, kënde të theksuara, zona me vegjetacion dhe akses të kufizuar për pajisjet matëse. Për dokumentimin e tillë, përdorimi i metodave të ndryshme dhe krahasimi i tyre është thelbësor për të vlerësuar raportin midis saktësisë, kohës së punës në terren dhe përpunimit, si dhe kostos së përgjithshme.

Studimi synon të tregojë se si këto metoda mund të kombinohen për të arritur rezultate të qëndrueshme, duke garantuar të dhëna të sakta për restaurim dhe monitorim të vazhdueshëm të objekteve me rëndësi kulturore dhe inxhinierike.

1.1 Qëllimi dhe Objektivat e Studimit

Qëllimi është ndërtimi i një kuadri krahasues mes UAV, TLS, LiDAR dhe PLS (si dhe integrimi i tyre), i bazuar në triadën saktësi – kohë – kosto, i vlefshëm si për monumentet e trashëgimisë kulturore, ashtu edhe për objekte inxhinierike. Objektivi kryesor i këtij disertacioni është të vlerësojë ndryshimet midis të dhënave të gjeneruara të reje të pikave të një skanimi tokësor me lazer dhe të dhënave të përfutuara me UAV-fotogrametri dhe UAV-LiDAR në objekte komplekse inxhinierike. Kjo duhet të përgjigjet duke krahasuar retë e pikave në lidhje me kriteret e plotësisë, nivelit të detajeve, numrit të pikave, rezolucionit të pikave,tributeve të pikave dhe saktësisë. Objektivat specifike janë:

- të vlerësohet saktësia (gmK, devijime, shpërndarje) e secilës metodë dhe e konfigurimeve të integruara;
- të krahasohen kostot dhe koha (terren + përpunim) për të nxjerrë një raport efikasiteti;
- të verifikohet shtrirja absolute përmes rrjetit gjeodezik lokal të kompensuar, GCP-ve dhe targetave, duke garantuar saktësi;
- të testohet transferueshmëria e rezultateve në objekte të tjera (urë betoni/metalike, pallat shumëkatësh);
- të integrohet AI si mbështetje në pastrim, klasifikim dhe analizë diferenciale të reje të pikave.

1.2 Metodologjia

Për t'iu përgjigjur pyetjeve të përcaktuara kërkimore, zbatohet metodologjia e shfaqur në figurën 1. Përpara se të kryhet një mbledhje të dhënash për secilën metodë, mbledhja e të dhënave duhet të planifikohet. Pas mbledhjes së të dhënave në terren, të tre grupet e të dhënave përpunohen në paketa të ndryshme programesh kompjuterike për të marrë re pikash të regjistruara dhe të gjeoreferencuara. Këto re pikash integrohen më pas në një mjedis programesh kompjuterike dhe krahasohen për të nxjerrë përfundime rreth ndryshimeve. Një krahasim vizual tregon ndryshimet në plotësinë e mbulimit të të dhënave, si dhe nivelin e detajeve.

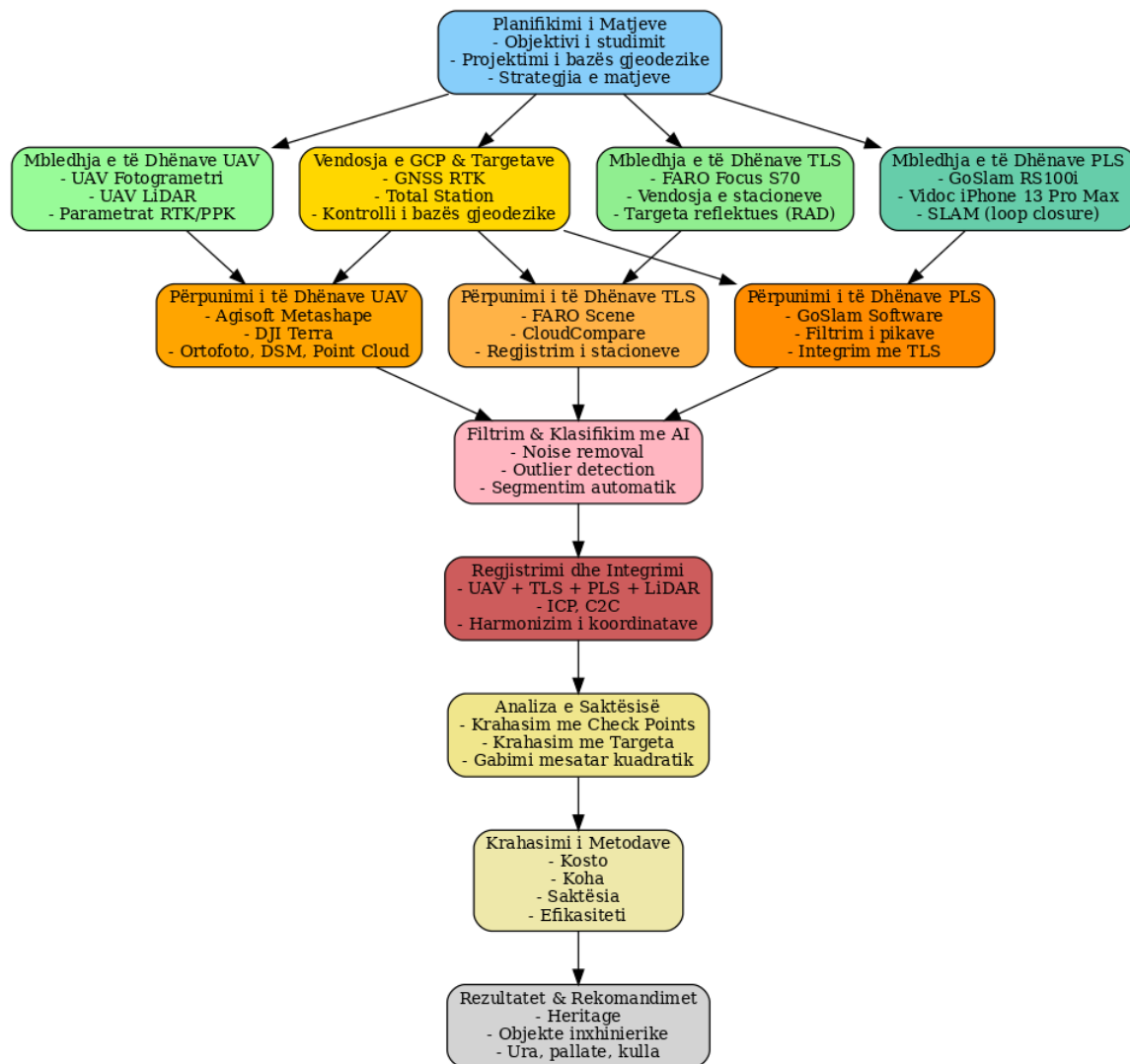


Figura 1- Rrjedha e punës

Pas përpunimit të të dhënave nga secila metodë matëse, u krye krahasimi ndërmjet modeleve të përfuara për të analizuar ndryshimet në saktësi, dendësi dhe karakteristikat gjeometrike të reve të pikave. Si bazë krahasimi u zgjodh reja e pikave nga skanimi tokësor

me lazer (TLS), e cila u përdor si referencë metrikë për shkak të saktësisë së lartë, stabilitetit gjeometrik dhe kontrollit përmes targetave reflektues.

Në fazën e parë, u vlerësua saktësia relative e të dhënave TLS përmes analizës së devijimit standard ndërmjet stacioneve dhe përputhjes së targetave të përbashkëta. Kjo lejoi verifikimin e qëndrueshmërisë së brendshme të regjistrimit dhe përcaktimin e TLS si burim referimi për krahasime të mëtejshme.

Më pas, të dhënat e fotogrametrisë UAV u transformuan në të njëjtin sistem koordinativ (ETRS89/Albania TM 2010) duke përdorur pikat e kontrollit tokësor (GCP). Për të vlerësuar saktësinë e tyre, u krye krahasimi i reve të pikave (C2C), duke matur distancat mesatare ndërmjet sipërfaqeve përkatëse. Kjo analizë lejoi përcaktimin e gabimeve sistematike dhe devijimeve mesatare në zona të ndryshme të objektit. Paralelisht, u krye edhe një krahasim absolut ndërmjet pikave të kontrollit dhe koordinatave të përfutuara nga UAV, për të verifikuar vlefshmërinë e transformimit në sistemin kombëtar të referencës.

Në vijim, u realizuan krahasime të rezultateve të marra nga UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR. Për secilën metodë u analizua dendësia e pikave, uniformiteti i shpërndarjes, saktësia planimetricke dhe vertikale, si dhe koha totale e përpunimit. Të gjitha vlerat krahasuese u përpunuan në CloudCompare, duke përdorur funksionin e regjistrimit të pikës më të afërt iterative (ICP) për përputhjen optimale të modeleve. Krahasimet u shoqëruan me harta devijimesh dhe histograma shpërndarjeje për të vlerësuar vizualisht konsistencën e të dhënave midis metodave.

Në fazën përfundimtare të rrjedhës së punës u realizua integrimi i reve të pikave për të krijuar modele të bashkuara 3D me cilësi të përmirësuar. Saktësia e rezultateve të integruara u vlerësua përmes krahasimeve të mëtejshme të reve të pikave, analizave të prerjeve tërthore dhe kontrollit të pikave absolute.

Rezultatet përfundimtare treguan se modelet e kombinuara ruajnë një devijim mesatar nën ± 3 cm, me përmirësim të dukshëm të uniformitetit dhe reduktim të gabimeve lokale në raport me modelet individuale. Kjo rrjedhë pune demonstroi se përdorimi i një qasjeje të unifikuar për verifikim dhe integrim siguron rezultate më të qëndrueshme dhe modele më të sakta për dokumentimin tredimensional të objekteve komplekse.

1.3 Kontributet dhe kufizimet

Ky studim ofron një sërë kontributesh të rëndësishme si në aspektin shkencor, ashtu edhe në atë praktik. Së pari, është ndërtuar një metodologji krahasuese e standardizuar për vlerësimin e katër teknologjive kryesore të matjeve tredimensionale – UAV, TLS, LiDAR dhe PLS – në të njëjtin sistem referimi dhe në kushte reale pune. Kjo qasje mundësoi krahasime të drejtpërdrejta të saktësisë, densitetit të pikave, kohës së përpunimit dhe kostos, duke siguruar rezultate të krahasueshme. Një tjetër kontribut i rëndësishëm është verifikimi gjeodezik i plotë, ku u përdor një rrjet bazë GNSS dhe një grup pikash kontrolli (GCP dhe targeta reflektues) për të garantuar besueshmëri absolute në transformimin e të dhënave.

Në vijim, u zhvilluan protokolle integrimi midis metodave (UAV+TLS, PLS+TLS dhe UAV LiDAR) të aplikueshme në terrene dhe struktura të ndryshme, të cilat shërbejnë si udhëzues praktik për zgjedhjen e kombinimit më efikas të teknologjive në varësi të objektit dhe qëllimit të dokumentimit. Një element i veçantë është analiza e triadës kosto–kohë–saktësi, e cila përmes tabelave krahasuese ofron vlera orientuese që ndihmojnë profesionistët dhe institucionet në marrjen e vendimeve operative. Përveç kësaj, studimi integroi algoritme të inteligjencës artificiale (AI) për optimizimin e filtrimit dhe pastrimit të reve të pikave, duke rritur efikasitetin e përpunimit dhe qëndrueshmërinë e rezultateve përfundimtare.

Megjithëse rezultatet janë të qëndrueshme dhe të besueshme, studimi përballet me disa kufizime metodologjike dhe teknike. Fotogrametria UAV mbetet e ndjeshme ndaj kushteve atmosferike, ndriçimit dhe erës, të cilat mund të ndikojnë në cilësinë e imazheve dhe saktësinë e rikonstruksionit 3D. Nga ana tjetër, pajisjet TLS dhe LiDAR kërkojnë investim të lartë dhe ekspertizë të specializuar për operim dhe përpunim. Për dataset-et shumë të mëdha, proceset e përpunimit janë të ngadalta dhe kërkojnë fuqi të konsiderueshme kompjuterike, ndërsa kalibrimi rigoroz dhe kontrolli i cilësisë kërkon kohë dhe ndjekje të rreptë metodologjike. Pavarësisht këtyre kufizimeve, metodologjia e zhvilluar ofron një kuadër të besueshëm për studime të ngjashme në të ardhmen dhe përmirësime të mëtejshme teknologjike në fushën e fotogrametrisë.

1.4 Struktura e disertacionit

Në kapitullin e parë, paraqiten motivimi i studimit, objektivat kërkimore, pyetjet shkencore dhe kontributet kryesore që synohen. Po ashtu, diskutohet rëndësia e monitorimit dhe dokumentimit të monumenteve të trashëgimisë kulturore përmes teknologjive të avancuara të matjes, duke theksuar rolin që ka Kalaja e Vilë Bashtovës si objekt studimi. Në këtë pjesë evidentohen edhe kufizimet e metodologjisë dhe faktorët që mund të ndikojnë në rezultatet përfundimtare.

Kapitulli i dytë i kushtohet bazave teorike dhe rishikimit të literaturës, ku lexuesi njihet me zhvillimin historik dhe gjendjen aktuale të teknologjive më të rëndësishme në fushën e gjeodezisë: fotogrametria me UAV, skanimi tokësor me lazer (TLS), LiDAR ajror dhe sistemet portative të skanimit me lazer (PLS). Diskutohet përdorimi i tyre në dokumentimin e trashëgimisë, krahasimet e saktësisë, kosto/kohë dhe potenciali për integrim. Një vend të veçantë zë analiza e literaturës mbi integrimin e të dhënave nga metoda të ndryshme dhe përdorimi i inteligjencës artificiale në segmentimin e reve të pikave. Përmes këtij kapitulli krijohet një kuadër teorik i qartë mbi avantazhet dhe kufizimet e secilës metodë.

Në kapitullin e tretë shpjegohet metodologjia e ndjekur. Fillimisht përshkruhen instrumentet e përdorura: UAV DJI Matrice 300 RTK me sensor fotogrametrik dhe LiDAR, UAV DJI Phantom 4 RTK, UAV DJI Matrice 4E, UAV V-Map Aerial Systems, TLS FARO Focus S70 dhe PLS GoSlam RS100i. Më pas, paraqitet mënyra e planifikimit të misionëve, vendosja e stacioneve dhe targetave, matja e pikave të kontrollit në terren (GCP), si dhe kompensimi i bazës gjeodezike me GNSS. Kapitulli përfshin gjithashtu

përshkrimin e programeve kompjuterike të përdorur për përpunimin e të dhënave (Agisoft Metashape, FARO Scene, CloudCompare, DJI Terra) dhe rrjedhën e punës të integritit të reve të pikave. Figura dhe tabela të shumta ndihmojnë për të ilustruar procesin hap pas hapi.

Kapitulli i katërt përmbledh rezultatet dhe diskutimin. Fillimisht paraqiten krahasimet e saktësisë ndërmjet UAV, TLS, LiDAR dhe PLS për Kalanë e Vilë Bashtovës, përmes hartave të devijimeve, histogramëve dhe analizave Cloud-to-Cloud. Më pas shqyrtohet integrimi i metodave, densiteti i reve të pikave dhe diferencat në kohën e matjes dhe të përpunimit. Një pjesë e veçantë i dedikohet aplikimeve në objekte të tjera (ura, ndërtesa shumëkatëshe), duke treguar fleksibilitetin e metodologjisë në skenarë të ndryshëm. Diskutimi shoqërohet me krahasime të detajuara mbi kosto/efikasitet dhe me përdorimin e AI për segmentim automatik.

Së fundmi, kapitulli i pestë përmban përfundimet, kufizimet e studimit dhe drejtimet e mundshme për hulumtime të ardhshme. Përveç sintetizimit të rezultateve kryesore, theksohet mundësia e përdorimit të algoritmeve më të avancuar të inteligjencës artificiale për klasifikim të automatizuar, integrimi me modelet BIM për menaxhimin afatgjatë të objekteve historike dhe potenciali i monitorimit periodik për zbulimin e ndryshimeve strukturore.

2 BAZAT TEORIKE DHE RISHIKIM I LITERATURËS

2.1 Fotogrametria dixhitale: baza dhe evolucioni

Fotogrametria është një shkencë e cila merret me përfitim të dhënave metrike dhe deskriptive të objekteve në hapësirë përmes regjistrimit dhe interpretimit të imazheve. Termi rrjedh nga greqishtja, ku photos do të thotë “dritë”, gramma “shkrim” dhe metron “matje”. Fillimet e saj lidhen me përdorimin e fotografive ajrore për hartografi në fillim të shekullit XX, ndërsa zhvillimet e para serioze shkencore erdhën nga punimet e Albrecht Meydenbauer në Gjermani, i cili konsiderohet “babai i fotogrametrisë arkitekturore” [1].

Gjatë periudhës analoge, fotogrametria bazohej në përdorimin e kamerave filmike dhe aparateve stereoskopike. Proceset ishin manuale, të ngadalta dhe me kufizime në saktësi. Me shfaqjen e teknologjive dixhitale në vitet '80–'90, proceset u automatizuan, duke përfshirë kalibrimin automatik të kamerave, orientimin e jashtëm dhe të brendshëm, si dhe gjenerimin e modeleve 3D [2].

Në dekadat e fundit, zhvillimi më i rëndësishëm ka qenë integrimi i metodave të Strukturimit nga Lëvizja (SfM) dhe Stereo me shumë pamje (MVS), të cilat kanë lejuar gjenerimin e reze pikash shumë të dendura nga sekuenca fotografish të marra nga UAV ose platforma të tjera [3]. Figura 2 ilustron ndryshimin e performancës midis tre epokave të zhvillimit të fotogrametrisë (analoge, dixhitale dhe SfM/MVS) në aspektin e saktësisë, koston dhe fleksibilitetit. Metodat SfM/MVS tregojnë nivelin më të lartë të saktësisë dhe fleksibilitetit falë përpunimit automatik të imazheve dhe densitetit të lartë të reze pikash të gjeneruara nga imazhet UAV.

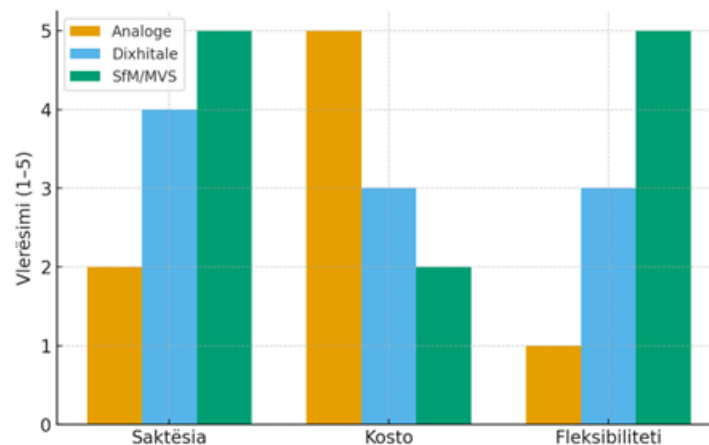


Figura 2 - Krahësimi i fotogrametrisë analoge, dixhitale dhe SfM/MVS.

Në mënyrë sintetike, zhvillimi i këtyre tre fazave paraqitet në tabelën 1, e cila evidenton ndryshimet thelbësore midis teknologjive në përdorim, metodave të përpunimit dhe nivelit të saktësisë së arritur.

Tabela 1 - Krahësim i karakteristikave të fotogrametrisë analoge, dixhitale dhe SfM

Karakteristika	Fotogrametria Analoge	Fotogrametria Dixhitale	Fotogrametria SfM/MVS
Mediumi i përdorur	Filma fotografikë	Kamera dixhitale	Kamera dixhitale (UAV)
Procesimi	Optik-mekanik	Kompjuterik	Algoritme SfM
Saktësia	Mesatare (dm)	Lartë (cm)	Shumë e lartë (cm – mm)
Kosto	Shumë e lartë (laborator, pajisje)	Mesatare	E ulët – mesatare
Fleksibiliteti	Shumë i kufizuar	Më i madh	Shumë i lartë (edhe UAV)
Produktet	Foto, ortofoto bazike	Ortofoto, DSM	Ortofoto, DSM, modele 3D
Aplikimet	Hartografi klasike	GIS, inxhinieri ndërtimi	Monumentet e trashëgimisë kulturore, inxhinieri, monitorim 3D

2.1.1 Parimi themelor: ekuacionet e kolinearitetit

Në fotogrametri, lidhja ndërmjet koordinatave të një pike në terren (X,Y,Z), koordinatave të qendrës së kamerës (X₀,Y₀,Z₀), orientimit të kamerës dhe pikës së saj në planin e imazhit (x,y) shprehet përmes ekuacioneve të kolinearitetit [1] [2]:

$$x - x_0 = -f * \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 = -f * \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Ek. 1

Këto ekuacione përfaqësojnë kushtin kolinear: pika në terren, qendra e kamerës dhe projeksioni i saj në imazh ndodhen në një vijë të drejtë. Parimi kryesor mbi të cilin mbështetet çdo përllogaritje në fotogrametri është parimi i kolinearitetit, që paraqitet në figurën 3. Ai tregon marrëdhënien midis qendrës së kamerës, pikës në terren dhe projeksionit të saj në planin e imazhit. Ky parim përbën bazën për kalibrimin e brendshëm dhe të jashtëm të kamerave dhe për llogaritjen e koordinatave 3D të pikave në hapësirë.

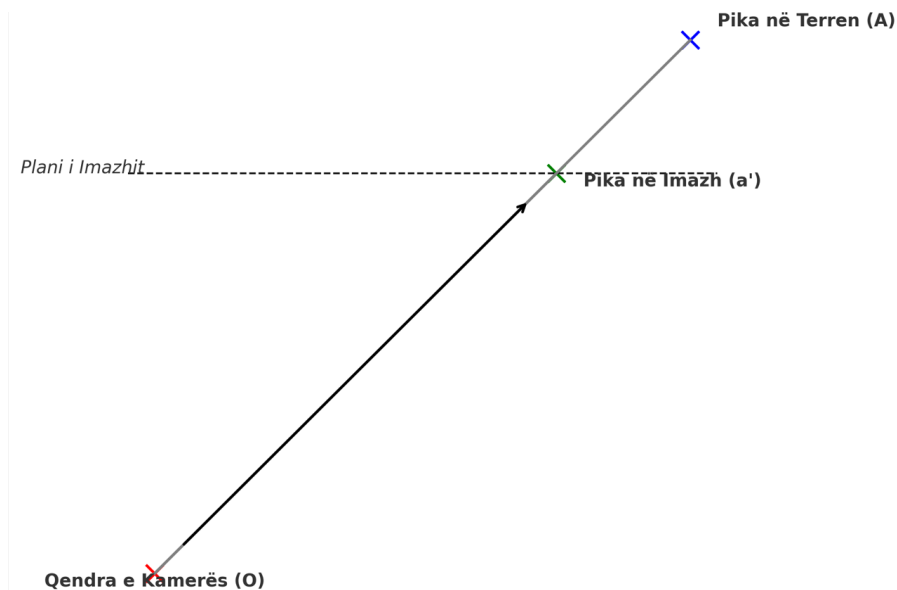


Figura 3 - Parimi i kolinearitetit (pika në terren, qendra e kamerës, pika në planin e imazhit).

2.1.2 SfM dhe MVS

Metodat moderne SfM/MVS kanë revolucionarizuar mënyrën e rikonstruksionit 3D. Procesi përfshin disa hapa:

1. Detektimi i pikave kyçe – përdoren algoritme si SIFT (Transformimi i Karakteristikave të Pandryshueshme në Shkallë) ose SURF për të gjetur pika karakteristike në imazhe [4].
2. Përputhja e pikave – pikat kyçe krahasohen ndërmjet imazheve për të identifikuar mbivendosjet.
3. Rikonstruksioni i trajektores së kamerës – përmes minimizimit të gabimeve në projektion (bundle adjustment).
4. Reja pikash e rrallë → densifikimi me MVS – përdoret për të gjeneruar modele me miliona pika.

Procesi i minimizimit të gabimeve në projektion përkufizohet si një problem i optimizimit jo-linear, i cili minimizon funksionin e gabimit:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ||x_{ij} - P_i(X_j)||^2 \quad \text{Ek. 2}$$

Ku:

- x_{ij} = projektimi i pikës në imazh,
- P_i = parametrat e kamerës në pozicionin i ,
- X_j = koordinatat e pikës 3D,
- n = numri i imazheve,
- m = numri i pikave 3D.

Kjo qasje është përdorur me sukses në monumentet e trashëgimisë kulturore [5], gjeomorfologji [6], si dhe në inxhinieri ndërtimi [7].

2.1.3 Parametrat e cilësisë: GSD dhe saktësia

Një nga treguesit kryesorë në fotogrametri është GSD, i cili përcakton madhësinë reale të një pikseli në terren. GSD llogaritet sipas ekuacionit [8]:

$$GSD = \frac{H * s}{f * I} \quad Ek. 3$$

Ku:

- H = lartësia e fluturimit,
- s = madhësia e sensorit,
- f = gjatësia fokale,
- I = numri i pikselëve në dimensionin horizontal të sensorit.

Sa më i vogël GSD, aq më i lartë është rezolucioni dhe cilësia e modelit.

2.1.4 Produktet e fotogrametrisë dixhitale

Nga procesimi i imazheve ajrore me metodat SfM dhe MVS përfitohet një sërë produktesh fotogrametrike me saktësi të lartë, të cilat përbëjnë bazën e analizave hapësinore në fazat pasuese të studimit. Një nga rezultatet kryesore është ortofotoja me rezolucion në nivel centimetrik, e cila siguron paraqitje të saktë planimetrike të sipërfaqes dhe përdoret gjerësisht për qëllime hartografike, dokumentimi të trashëgimisë kulturore dhe monitorimi mjedisor [5].

Paralelisht, procesi gjeneron modele digjitale të sipërfaqes (DSM) dhe modele digjitale të terrenit (DTM), që përshkruajnë me detaje relievin dhe strukturat e terrenit, duke shërbyer si bazë për analizat morfologjike [3].

Një tjetër produkt thelbësor janë modelet tredimensionale të teksturuara, të cilat realizohen nga kombinimi i pikave të dendura me informacionin radiometrik të imazheve origjinale, duke mundësuar vizualizime realiste të monumenteve dhe objekteve arkitektonike. Nga ana tjetër, reja e pikave e dendësisë së lartë, që shpesh arrin mbi 500 pika për metër katror, përfaqëson një përshkrim të detajuar të sipërfaqes së dokumentuar dhe mund të eksportohet në formate standarde për integrim në programe të tjera gjeohapësinore. Kombinimi i këtyre produkteve garanton një përfaqësim të plotë tredimensional të objektit ose zonës së studiuar dhe krijon bazën për analiza sasiore, krahasime kohore dhe modelime të avancuara hapësinore.

Këto produkte janë përdorur gjerësisht për dokumentimin e kalave historike [9], kishave dhe katedraleve [10] si dhe urave inxhinierike [11].

2.1.5 Avantazhet dhe kufizimet

Fotogrametria dixhitale, veçanërisht ajo e realizuar me platforma ajrore pa pilot (UAV), ka sjellë një revolucion në mënyrën se si mbledhen, përpunohen dhe interpretohen të dhënat hapësinore. Një nga avantazhet më të rëndësishme të kësaj metode është kostoja e ulët në krahasim me sistemet më të sofistikuar si skanimi me laser tokësor (TLS) apo UAV LiDAR, pasi kërkon më pak pajisje të specializuara dhe infrastrukturë në terren [12]. Për më tepër, procesi i mbledhjes së të dhënave është shumë më i shpejtë, duke mundësuar dokumentimin e një objekti apo monumenti brenda disa orësh, ndërkohë që sistemet me skanim lazer shpesh kërkojnë disa ditë pune për të arritur një mbulim të plotë.

Një tjetër avantazh është fleksibiliteti në aplikim, pasi teknika mund të përshtatet për një gamë të gjerë qëllimesh, duke filluar nga arkeologjia dhe dokumentimi i trashëgimisë kulturore, deri te modelimi i infrastrukturave, mjedisit apo terreneve natyrore [7]. Gjithashtu, përpunimi i imazheve mund të realizohet me programe të fuqishme, të cilat ofrojnë mundësi automatike për rikonstrukcion 3D, gjenerim ortofotosh dhe analizë metrike me saktësi të lartë.

Megjithatë, fotogrametria dixhitale paraqet edhe disa kufizime teknike. Një prej tyre është vështirësia në rikonstrukcionin e fasadave vertikale ose të hapësirave të brendshme, ku mungesa e mbivendosjes së imazheve dhe këndeve të pamjes e redukton saktësinë e modelit [10]. Po ashtu, kushtet e ndriçimit dhe hijet mund të ndikojnë ndjeshëm në cilësinë radiometrike të imazheve, duke shkaktuar gabime në procesin e bashkërendimit të pikave dhe në teksturim. Një tjetër kufizim është vështirësia në penetrimin e vegjetacionit të dendur, që pengon vizibilitetin e sipërfaqes reale dhe çon në deformime të modeleve digjitale të terrenit.

Për këto arsye, në shumë aplikime praktike fotogrametria UAV përdoret në kombinim me TLS ose UAV LiDAR, duke shfrytëzuar avantazhet e secilës metodë. TLS ofron saktësi të lartë në detaje dhe dimensione, ndërsa LiDAR siguron penetrim të vegjetacionit dhe modelim të plotë të topografisë. Integrimi i të tre metodave mundëson krijimin e produkteve 3D me saktësi të lartë dhe mbulim të plotë të terrenit dhe objekteve [9].

2.2 Fotogrametria UAV: RTK/PPK, GCP, parametrat e fluturimit

Përdorimi i UAV-ve në fotogrametri përfaqëson një ndër rrisitë më të rëndësishme të dekadës së fundit në fushën e dokumentimit hapësinor dhe trashëgimisë kulturore. Krahasuar me teknikat tradicionale të fotogrametrisë ajrore, që kërkonin avionë të pajisur me kamera të kushtueshme dhe të vështira për t'u operuar, UAV-të ofrojnë një mjet fleksibël, me kosto të ulët dhe që siguron shpejtësi në mbledhjen e të dhënave. Këto platforma lejojnë prodhimin e ortofotove, modeleve digjitale të terrenit (DTM), modeleve digjitale të sipërfaqes (DSM), si dhe reve të pikave 3D me densitet të lartë dhe saktësi që shkon deri në nivel centimetrik [7] [3].

2.2.1 Evolucioni dhe kategoritë e UAV-ve

UAV-të ndahen në dy kategori kryesore: UAV me krahë fiks dhe UAV me krahë multi rrotullues. UAV-të me krahë fiks përdoren për mbulim të zonave të mëdha dhe ofrojnë autonomi të lartë, duke qenë të përshtatshëm për topografi dhe monitorim mjedisor në shkallë rajonale. Nga ana tjetër, UAV-të me krahë multi rrotullues – si DJI Phantom 4 RTK ose DJI Matrice 300 RTK – janë më fleksibël për dokumentimin e monumenteve, fasadave dhe strukturave të komplikuar. Përveç kamerave RGB, dronët modernë mund të pajisen edhe me sensorë multispektralë, termikë apo LiDAR, duke i kthyer në platforma multisensorike për analiza të avancuara [13].

Krahasimi midis UAV-ve me krahë fiks dhe atyre multi rrotullues, në lidhje me përdorimin në mjedise të ndryshme topografike dhe urbane, paraqitet në tabelën 2. UAV-të me krahë fiks janë më efikasë për mbulim të gjerë horizontal, ndërsa UAV-të multirotorë ofrojnë manovrim dhe stabilitet më të mirë në zona të kufizuara.

Tabela 2 - Krahasimi i karakteristikave midis UAV-ve me krahë fiks dhe UAV-ve multirotorë.

Karakteristika	UAV me krahë fiks	UAV me krahë multi rrotullues
Kohë fluturimi	60–120 min (shumë më e gjatë)	20–40 min
Sipërfaqja e mbuluar	> 5–10 km ² për fluturim	<1–2 km ² për fluturim
Shpejtësia e fluturimit	60–100 km/h	15–30 km/h
Manovrueshmëria	Kufizuar (nuk qëndron pezull)	Shumë e lartë
Rezolucioni (GSD)	Mesatar (më i ulët në lartësi të mëdha)	Shumë i lartë në lartësi të ulëta
Nisja/ulja	Nevojitet pistë	Nisje/ulje vertikale (pa pistë)
Kompleksiteti i operimit	Më i lartë, kërkon trajnim	Më i thjeshtë, pilotim i drejtpërdrejtë
Kostoja	Shumë më e lartë	Mesatare / e ulët
Përdorime tipike	Hartografi në shkallë të gjerë, bujqësi, pylltari	Objekte komplekse, monumentet e trashëgimisë kulturore, inspektime inxhinierike
Shembuj tipikë	senseFly eBee X, Quantum Systems Trinity	DJI Phantom 4 RTK, DJI Matrice 300 RTK

2.2.2 Parametrat kryesorë të fluturimit dhe GSD

Një parametër thelbësor në fotogrametri është distanca midis qendrave të dy pikselëve fqinje, e matur në tokë (GSD), që përcakton madhësinë reale të një piksli në terren. Formula e GSD është:

$$GSD = (H * s)/(f * I) \quad \text{Ek. 4}$$

ku H është lartësia e fluturimit, s madhësia e sensorit, f gjatësia fokale e kamerës dhe I numri i pikselëve horizontale të sensorit [8].

Një UAV Phantom 4 RTK që fluturon në lartësi 60 m arrin një $GSD \approx 1.5$ cm/pixel, mjaftueshëm për dokumentim me precizion të lartë të trashëgimive kulturore. Për të siguruar mbulim optimal, praktika standarde është që imazhet të kenë mbivendosje prej $\geq 80\%$ gjatësore dhe $\geq 70\%$ anësore. Për fasada dhe struktura vertikale përdoren imazhe oblike me kënde të ndryshme [10].

Figura 4 ilustron ndryshimin midis imazheve nadir dhe oblike, që përdoren për qëllime të ndryshme në proceset e dokumentimit fotogrametrik. Imazhet nadir janë më të përshtatshme për krijimin e ortofotove dhe modeleve të sipërfaqes (DSM), ndërsa ato oblike sigurojnë mbulim më të mirë të fasadave dhe objekteve vertikale.

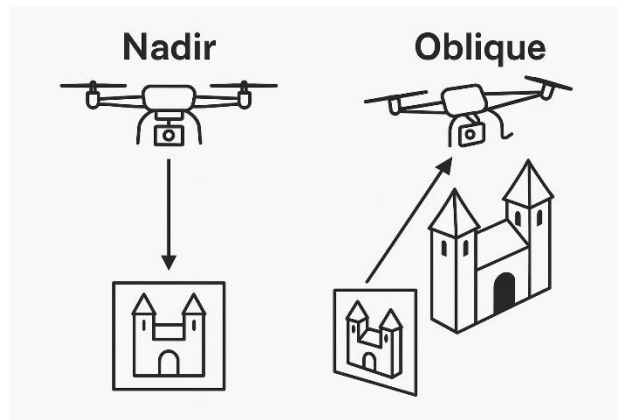


Figura 4 - Diferenca mes imazheve nadirale dhe oblike në fotogrametri UAV.

2.2.3 Përcaktimi i orientimit dhe roli i GCP/RTK-PPK

Saktësia e produkteve të gjeneruara varet nga përcaktimi i orientimit të jashtëm të kamerës. Ekzistojnë dy qasje kryesore: përdorimi i pikave të kontrollit në terren (GCP) dhe përdorimi i teknologjive GNSS RTK/PPK.

- GCP maten me GNSS me precizion centimetër dhe përdoren për të shtrirë modelin në një sistem koordinativ global.
- RTK/PPK ofron korrigjim në kohë reale ose në përpunim të mëvonshëm, duke reduktuar nevojën për shumë GCP.

Gabimi GMK për pikat e kontrollit llogaritet me formulën:

$$GMK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{ref,i})^2 + (Y_i - Y_{ref,i})^2 + (Z_i - Z_{ref,i})^2} \quad Ek. 5$$

ku (X_i, Y_i, Z_i) janë koordinatat e matura dhe $(X_{ref,i}, Y_{ref,i}, Z_{ref,i})$ koordinatat e referencës. Studimet tregojnë se kombinimi i RTK/PPK me disa GCP redukton GMK në 1–2 cm [14].

Në përfundim të prezantimit të metodave tradicionale dhe moderne të fotogrametrisë, është e rëndësishme të bëhet dallimi midis mënyrave të përdorimit të tyre në varësi të qëllimit të studimit.

Në tabelën 3 paraqitet një klasifikim i metodave fotogrametrike sipas qëllimit të aplikimit, tipit të sensorit dhe platformës së përdorur. Ky klasifikim ndihmon në përcaktimin e metodës më të përshtatshme për dokumentimin e monumenteve historike, në infrastrukturë dhe monitorimin mjedisor.

Tabela 3 - Krahësimi i qasjeve të ndryshme për orientimin e kamerës: vetëm GCP, vetëm RTK/PPK dhe kombinim.

Karakteristika	Vetëm GCP	Vetëm RTK/PPK	Kombinim GCP + RTK/PPK
Nevoja për infrastrukturë	GCP të shumta në terren (10–30)	Stacion bazë GNSS ose shërbim NTRIP	2–5 GCP + stacion bazë/NTRIP
Saktësia planimetrrike	2–5 cm (nëse shpërndarja e GCP-ve është e mirë)	2–3 cm (me FIX gjatë gjithë fluturimit)	1–2 cm
Saktësia altimetrrike	3–6 cm	3–5 cm	2–3 cm
Koha në terren	Shumë e gjatë (vendosja e GCP-ve, matjet GNSS)	Shumë e shkurtër (pa GCP)	Mesatare (pak GCP + RTK)
Rreziku i gabimeve	Shpërndarja jo e mirë e GCP-ve shkakton devijime	FIX i humbur gjatë fluturimit ul saktësinë	Minimizohet, pasi dy metoda kontrollojnë njëra-tjetrën
Përdorimi tipik	Projekte të vogla, ku koha nuk është kritike	Projekte të mëdha, ku shpejtësia është kritike	Projekte komplekse që kërkojnë balancë kosto–kohë–saktësi
Avantazhet	Nuk kërkon GNSS bazë; pajisje më të lira	Shpejtësi dhe efikasitet	Saktësia më e lartë dhe redundancë
Disavantazhet	Kohë e gjatë dhe punë intensive në terren	Varësi nga FIX dhe kushtet GNSS	Kosto më e lartë (RTK + GCP)

2.2.4 Produktet e gjeneruara nga fotogrametria UAV

Fotogrametria UAV mund të gjenerojë një gamë të gjerë produktesh:

- Ortofoto me rezolucion deri në centimetra.
- Modele digjitale të terrenit (DTM) dhe sipërfaqes (DSM).
- Re pikash të dendura (> 500 pika/m²).
- Modele 3D me teksturë të përshtatshme për vizualizim dhe analizë.

Si rezultat i përpunimit të imazheve ajrore të marra nga droni, përmes metodës SfM dhe MV), krijohen produktet kryesore fotogrametrike që janë ortofotoja dhe modeli 3D i objektit të studiuar. Këto produkte janë përfaqësuar në figurën 5, ku ilustruhet procesi i gjenerimit të ortofotos së korrigjuar gjeometrikisht dhe modelit dixhital të sipërfaqes.



Figura 5 - Ortofoto dhe model 3D i gjeneruar nga imazhe UAV.

Këto produkte përdoren gjerësisht për dokumentim të trashëgimisë kulturore [5] [9], monitorim urban dhe inxhinierik [11], si dhe analiza mjedisore si erozioni apo ndryshimi i përdorimit të tokës [3].

2.2.5 Avantazhet dhe kufizimet e UAV fotogrametrisë

Avantazhet kryesore të UAV fotogrametrisë janë:

- Fleksibiliteti në mbledhjen e të dhënave.
- Kostoja më e ulët krahasuar me avionët e dedikuar.
- Shpejtësia e lartë e përpunimit me program kompjuterik si Metashape apo Pix4D.
- Saktësia në nivel centimetrik kur kombinohet RTK/PPK me GCP.

Kufizimet lidhen me:

- Vështirësinë në dokumentimin e fasadave vertikale.
- Ndikimin e kushteve atmosferike dhe ndriçimit.
- Pamundësinë për penetrim në vegjetacion të dendur, ku LiDAR jep rezultate më të mira.

Një nga kufizimet më të rëndësishme të metodës fotogrametrike ajrore me UAV është mbulimi i pamjaftueshëm i sipërfaqeve vertikale, veçanërisht në monumente ose struktura me fasada të larta.

Siç shihet në figurën 6, për shkak të këndit të pjerrësisë së kamerës dhe pengesave strukturore, dronët UAV nuk arrijnë të regjistrojnë plotësisht zonat vertikale, duke krijuar boshllëqe në modelin 3D përfundimtar. Kjo problematikë është një nga arsyet kryesore që kërkon integrimin e metodave tokësore si TLS ose PLS (Sistemet portative të skanimit me lazer) për të siguruar një mbulim të plotë gjeometrik.

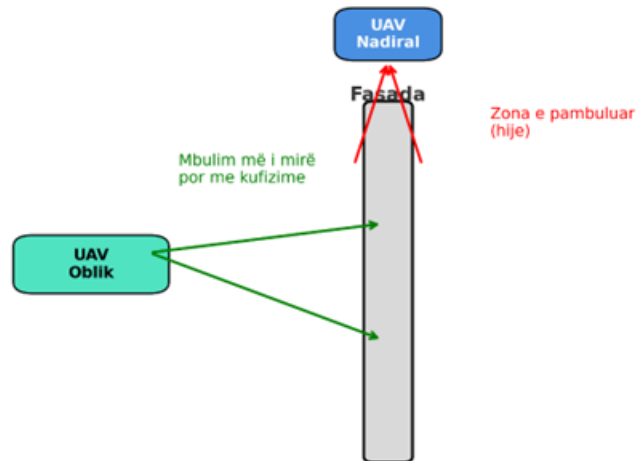


Figura 6 - Kufizimet e fotogrametrisë UAV në fasada vertikale.

2.3 Skanimi me lazer: TLS dhe PLS

Skanimi me lazer ka hyrë në përdorim të gjerë në dokumentimin e trashëgimisë kulturore dhe objekteve inxhinierike, falë aftësisë së tij për të gjeneruar re pikash 3D me densitet dhe saktësi shumë të lartë. Parimi themelor i teknologjisë bazohet në matjen e distancës midis sensorit dhe objektit, përmes analizës së impulsit lazer të reflektuar. Dy teknologjitë kryesore që përdoren janë time-of-flight (matja e kohës së udhëtimit të rrezes lazer) dhe phase-shift (krahasimi i diferencës së fazës së sinjalit të emetuar dhe atij të reflektuar) [15]. Rezultati është një grup i madh pikash 3D, secila me koordinata (x, y, z), që së bashku përbëjnë një model shumë të detajuar të objektit. Një nga aspektet më thelbësore të teknologjisë së skanimit tokësor me lazer TLS është mënyra se si matet distanca midis instrumentit dhe objektit të skanuar. Kjo matje kryhet përmes një procesi të avancuar optiko-elektronik, ku drita lazer emetohet nga pajisja dhe reflektohet përsëri nga sipërfaqja e objektit.

Në figurën 7 paraqiten dy teknikat kryesore të matjes së distancës në TLS:

- Metoda Time-of-Flight (ToF), e cila mat kohën që i duhet pulsit lazer të kthehet pas reflektimit, dhe
- Metoda e Zhvendosjes së Fazës (Phase-Shift), e cila krahason ndryshimin e fazës midis valës së dërguar dhe asaj të reflektuar.

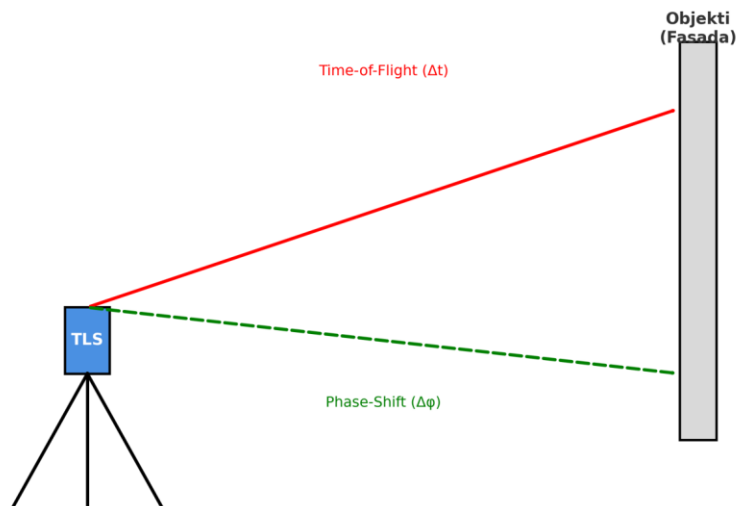


Figura 7 - Parimi i matjes së distancës në TLS: time-of-flight dhe phase-shift.

Figura tregon mënyrën se si pajisja TLS llogarit distancën përmes analizës së sinjalit të dritës së reflektuar. Në metodën e zhvendosjes së fazës, instrumenti mat ndryshimin e fazës së sinjalit të reflektuar, duke siguruar saktësi më të lartë (deri në $\pm 1-2$ mm), por me rreze më të kufizuar veprimi. Të dyja metodat shërbejnë për ndërtimin e një reje pothuajse të pandërprerë pikash që përfaqësojnë sipërfaqen e objektit në formë dixhitale 3D.

2.3.1 TLS (Skanimi tokësor me lazer)

Skanimi tokësor me lazer (TLS) përdor pajisje të vendosura mbi tripod, të cilat kryejnë skanime 360° nga pika të ndryshme rreth objektit. Pajisje si FARO Focus S70, Leica ScanStation P40 ose Riegl VZ-400i arrijnë shpejtësi marrjeje deri në 1 milion pika për sekondë, me diapazon prej disa qindra metrash dhe saktësi që arrijnë në milimetra. TLS ka gjetur përdorim të gjerë në dokumentimin e monumenteve kulturore, katedraleve, urave dhe objekteve arkeologjike, për shkak të aftësisë për të kapur detaje shumë të imta arkitektonike [16]. Një element kritik në TLS është regjistrimi i reve të pikave nga stacione të ndryshme. Kjo arrihet duke përdorur targeta të vendosur në terren, të cilët shërbejnë si pika të përbashkëta për të lidhur skanimet. Cilësia e regjistrimit vlerësohet përmes gabimit mesatar kuadratik të targetave:

$$GMK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}} \quad \text{Ek. 6}$$

ku d_i janë distancat e matura ndërmjet targetave dhe $\bar{d}$ janë distancat e parashikuara pas regjistrimit [17].

Në mungesë të targetave, përdoren algoritme si ICP, i cili minimizon distancën mes dy reve të pikave:

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^n ||p_i - (Rq_i + t)||^2 \quad Ek. 7$$

ku p_i janë pikat e reve referencë, q_i pikat që duhen regjistruar, R matrica e rrotullimit dhe t vektori i translacionit [18]. ICP është një standard në programet kompjuterike si CloudCompare dhe FARO Scene, dhe përdoret gjerësisht në literaturë për regjistrimin e reve të pikave në trashëgimi kulturore dhe inxhinieri. Procesi i regjistrimit të reve të pikave është një nga hapat më të rëndësishëm në përpunimin e të dhënave të marra nga skanimi me lazer tokësor (TLS). Në çdo matje me skaner, objekti dokumentohet nga pozicione të ndryshme skanimi, të cilat duhet të kombinohen në një sistem koordinatash të unifikuar. Në këtë fazë, përdoren dy metoda plotësuese: regjistrimi me targeta (për pozicionim fillestar absolut) dhe regjistrimi me algoritmin ICP (Pika më e afërt iterative) për rafinimin e përputhjes midis reve të pikave. Ky proces paraqitet qartë në figurën 8.

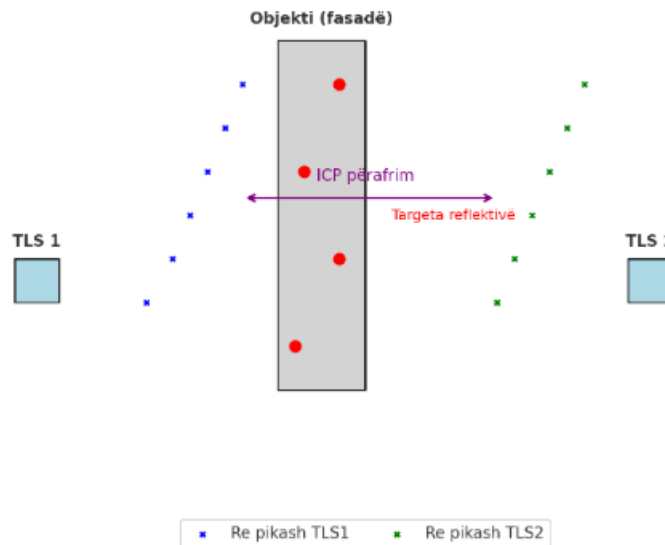


Figura 8 - Regjistrimi i reve të pikave TLS me targeta dhe ICP.

Figura ilustron dy fazat kryesore të regjistrimit të reve të pikave gjatë përpunimit të të dhënave TLS:

- Regjistrimi me targeta – targetat vendosen në terren për të shërbyer si pika të përbashkëta mes skanimeve. Në procesin e përpunimit të të dhënave identifikon automatikisht këto pika, duke krijuar një lidhje fillestare gjeometrike midis pozicioneve të skanimit.
- Regjistrimi me ICP – pas regjistrimit fillestar, ky algoritëm përmirëson përshtatjen duke minimizuar distancën mes pikave homologe të reve të ndryshme. Ky proces garanton që të gjitha reja e pikave të kombinohen në një model koherent dhe të saktë 3D, ku devijimi mesatar është zakonisht më pak se ± 2 mm.

2.3.2 PLS (Sistemet portabël të skanimit me lazer)

Një zhvillim i ri i teknologjisë së skanimit është skanimi portabël me lazer (PLS), i cili bazohet në algoritmin e lokalizimit dhe hartëzimit të njëkohshëm (SLAM). Pajisje si GeoSLAM ZEB Horizon, GoSlam RS100i apo Leica BLK2GO mbahen në dorë ose në trup, duke lejuar operatorin të lëvizë lirshëm brenda ose rreth një objekti, ndërsa pajisja skanon vazhdimisht ambientin [19]. Në kuadër të integritimit të metodave të skanimit me lazer, përveç pajisjeve TLS, në këtë studim është përdorur edhe teknologjia e skanimit portabël me lazer (PLS), e cila mundëson skanime dinamike në lëvizje dhe përfundim të të dhënave në zona ku skaneri statik nuk ka akses të plotë. Pajisja e përdorur në këtë rast është GoSlam RS100i, një skaner portativ që kombinon sensorin LiDAR me IMU (Njësia e Matjes Inerciale) dhe kamerë panoramike RGB për regjistrim vizual. Struktura dhe komponentët kryesorë të sistemit paraqiten në figurën 9.



Figura 9 - PLS GoSlam RS100i (burimi: www.surveymappinginstrument.com)

Ndryshe nga TLS, PLS nuk kërkon targeta fikse dhe është shumë më i shpejtë për mbledhjen e të dhënave, duke mbuluar zona të mëdha në pak minuta. Megjithatë, saktësia është disi më e ulët, me gabime mesatare 2–4 cm, krahasuar me 1–2 cm të TLS [20]. Ky gabim kryesisht rrjedh nga akumulimi i devijimeve gjatë lëvizjes së operatorit. Për ta kompensuar, përdoret koncepti i loop closure, që korrigjon trajektoren kur operatori rikthehet në një zonë të mëparshme:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i^2)}$$

Ek. 8

ku e_i është gabimi në pikën i .

Kjo teknikë zvogëlon ndjeshëm gabimet sistematike dhe rrit cilësinë e modelit final. Në zhvillimet bashkëkohore të teknologjive të skanimit me lazer, dy qasje kryesore kanë fituar

rëndësi të veçantë në fushën e dokumentimit tridimensional: TLS dhe PLS. TLS mbetet metoda tradicionale e përdorur për regjistrime statike me saktësi shumë të lartë, ndërsa PLS përfaqëson një risi që kombinon sensorët LiDAR me njësitë inerciale (IMU) për realizimin e skanimeve në lëvizje. Krahasimi midis këtyre dy teknologjive paraqitet në tabelën 4, ku janë përfshirë katër tregues themelorë të performancës: saktësia, shpejtësia e regjistrimit, fleksibiliteti operacional dhe kostoja, të përmbledhura bazuar në burime të ndryshme nga literatura ndërkombëtare [5] [21] [22] [23] [24].

Tabela 4 - Krahasimi i TLS dhe PLS sipas literaturës (saktësia, shpejtësia, fleksibiliteti, kostoja).

Karakteristika	TLS (Skanimi tokësor me lazer)	PLS (Sistemet e skanimit portabël me lazer)
Saktësia	Shumë e lartë ($\pm 1-2$ mm në distanca < 50 m) – përdoret si “standard i artë” për dokumentime arkitektonike dhe strukturore [15]	Mesatare ($\pm 3-5$ cm) – e varur nga SLAM algoritmet dhe kushtet e ambientit [25] [26]
Shpejtësia e marrjes së të dhënave	Relativisht e ulët – kërkon vendosjen e shumë stacioneve, kohë për regjistrim dhe përpunim [27]	Shumë e lartë – përdoruesi ecën me pajisjen dhe gjeneron re pikash në kohë reale [28]
Fleksibiliteti	I kufizuar – efikas për ambiente të hapura dhe komplekse, por më pak praktik për ambiente të brendshme ose të ngushta [29]	Shumë fleksibël – përdoret për ambiente të brendshme, tunele, korridore dhe objekte me qasje të vështirë [19]
Kostoja	Shumë e lartë (40,000–70,000 € për pajisje profesionale si FARO S70 ose Leica RTC360)	Mesatare (20,000–30,000 € për pajisje si GoSlam RS100i ose GeoSLAM Horizon)
Nevoja për personel të trajnuar	Kërkon ekspertizë të lartë në planifikim, regjistrim dhe përpunim të të dhënave	Më pak kërkesa teknike – përdoruesi mund të trajnohet brenda disa ditëve
Aplikime tipike	Dokumentim kulturor, monitorim deformimesh, objekte inxhinierike dhe restaurim	Ndërtesa të brendshme, tunele, objekte të paqasshme lehtësisht, matje të shpejta inxhinierike

Në bazë të të dhënave të literaturës, TLS ofron saktësi shumë të lartë (zakonisht $\pm 1-2$ mm), me densitet të madh pikash dhe rezolucion këndor të detajuar, duke e bërë metodën ideale për dokumentim të qëndrueshëm të fasadave dhe analizë strukturore. Megjithatë, procesi i matjeve me TLS kërkon më shumë kohë, pasi kërkon vendosjen e stacioneve të shumta, përdorimin e targetave për regjistrim dhe përpunim të gjatë kompjuterik. Nga ana tjetër, PLS siguron mobilitet dhe efikasitet të lartë, pasi operatori mund të realizojë skanime të vazhdueshme në lëvizje pa pasur nevojë për targeta fikse. Megjithëse kjo metodë nuk arrin saktësinë milimetrike të TLS, ajo ofron një kompromis optimal midis saktësisë (zakonisht $\pm 2-5$ cm) dhe shpejtësisë së punës, duke u bërë veçanërisht e përshtatshme për dokumentim në mjedise të ngushta, të brendshme ose me akses të kufizuar. Në aspektin e fleksibilitetit dhe koston, PLS paraqet avantazhe të dukshme: pajisjet janë më të lehta, proceset e regjistrimit automatizohen përmes

algoritmeve SLAM, dhe nevoja për staf teknik është më e reduktuar. Në të kundërt, TLS, ndonëse më i kushtueshëm dhe më i ngadalshëm, mbetet standardi i artë për rikonstrukcione me precizion të lartë dhe për krahasime volumetrike në shkallë arkitektonike. Ky krahasim tregon se përdorimi i përbashkët i të dy teknologjive ofron një zgjidhje hibride të fuqishme, ku TLS siguron bazën e saktësisë absolute, ndërsa PLS mundëson regjistrime të shpejta dhe të adaptueshme në terren.

2.3.3 Krahasimi TLS vs PLS në literaturë

Në literaturë, TLS shihet si metoda me saktësinë më të lartë dhe densitetin më të madh të pikave, duke qenë standard për dokumentimin e fasadave dhe monumenteve të mëdha historike [30]. PLS, ndonëse më pak i saktë, ofron shpejtësi dhe fleksibilitet të madh, duke qenë ideal për interiorë të ndërlikuar, tunele dhe objekte ku është e vështirë vendosja e tripodëve [31].

Përdorimi i kombinuar i të dy teknologjive është i përhapur në projekte ndërkombëtare. Për shembull, në dokumentimin e katedrales së Salzburgut, TLS u përdor për fasadat e jashtme me saktësi centimetrike, ndërsa PLS u aplikua në interiorin e kishës për shkak të aksesit të kufizuar [32]. Një qasje e ngjashme është ndjekur edhe në projekte inxhinierike si inspektimi i tuneleve hekurudhorë, ku TLS ofron profilizim shumë të detajuar, ndërsa PLS siguron mbulim të shpejtë të gjithë gjatësisë së tunelit [20].

2.4 UAV LiDAR

LiDAR i integruar në platformat UAV (Mjete ajrore pa pilot) është një nga zhvillimet më të fundit në teknologjitë e mbledhjes së të dhënave 3D. Ndryshe nga fotogrametria klasike, e cila varet nga ndriçimi dhe karakteristikat vizuale të sipërfaqes, LiDAR është një sistem aktiv që gjeneron impuls lazer dhe mat kohën që i duhet sinjalit të kthehet nga objekti. Kjo i jep mundësi UAV-ve të pajisur me sensorë LiDAR të depërtojnë kurorat e dendura të pemëve, duke arritur në terrenin e vërtetë nën vegjetacion [33]. Për këtë arsye, UAV LiDAR është bërë një mjet i pazëvendësueshëm në hidrologji, arkeologji dhe inxhinieri infrastrukturore.

2.4.1 Parimi i funksionimit dhe karakteristikat teknike

Një sistem UAV LiDAR përbëhet nga:

- Sensor LiDAR – burimi lazer (zakonisht me gjatësi vale 905 nm ose 1550 nm), skaneri optik dhe detektori.
- Sistemi INS/GNSS – për regjistrimin e pozicionit dhe orientimit të sensorit në hapësirë.
- Platforma UAV – që mban sensorin dhe siguron lëvizjen sipas misionit të planifikuar.

Distanca d llogaritet sipas formulës së time-of-flight:

$$d = \frac{c * \Delta t}{2} \quad \text{Ek. 9}$$

ku:

c është shpejtësia e dritës dhe Δt koha mes impulsit të emetuar dhe atij të reflektuar. Duke kombinuar distancën me orientimin e sensorit (roll, pitch, yaw) dhe koordinatat GNSS, gjenerohen koordinatat 3D absolute të çdo pike [34].

Saktësia e LiDAR varet nga:

- frekuenca e impulsit (p.sh. 240–500 kHz),
- këndi i skanimit (zakonisht $\pm 30^\circ$ – $\pm 70^\circ$),
- cilësia e GNSS/INS.

2.4.2 Avantazhet krahasuar me UAV fotogrametri dhe TLS

Në literaturë theksohen disa avantazhe kryesore të UAV LiDAR:

- Penetrimi i vegjetacionit: ndryshe nga fotogrametria UAV, LiDAR gjeneron shumë kthime për secilin impuls, duke arritur deri te sipërfaqja e tokës [35].
- Krijimi i DTM të sakta: DTM të gjeneruara nga UAV LiDAR kanë saktësi vertikale 5–10 cm edhe në pyje të dendur, ku UAV fotogrametria dështon [36].
- Densitet i lartë pikash: arrin mbi 200 pika/m², duke mundësuar analiza shumë të detajuara të infrastrukturës, si kablllo elektrike, ura apo tubacione.
- Kombinimi me RGB/IMU: shumë sensorë UAV LiDAR ofrojnë edhe kamera RGB të sinkronizuara, duke krijuar modele 3D me ngjyra të saktësuara.

Në dekadën e fundit, përdorimi i dronëve është zgjeruar përtej fotogrametrisë klasike dixhitale, duke përfshirë edhe sensorët LiDAR të integruar në platforma ajrore. Krahasimi midis UAV LiDAR dhe fotogrametrisë UAV paraqitet në figurën 10, ku theksohen ndryshimet thelbësore në mënyrën e mbledhjes së të dhënave, densitetin e pikave, saktësinë dhe aftësinë për depërtim në sipërfaqe të mbuluara me bimësi. UAV-të me sensor LiDAR lëshojnë impulse lazer që reflektohen nga sipërfaqet dhe regjistrojnë kohën e kthimit për të përfutur distanca shumë të sakta, duke mundësuar krijimin e modeleve 3D edhe në terrene me pemë, vegjetacion apo struktura të dendura. Nga ana tjetër, fotogrametria UAV mbështetet në përpunimin e imazheve të marra nga kamera optike përmes algoritmeve SfM dhe MVS, të cilat gjenerojnë re pikash të dendura vetëm për zonat e dukshme nga kamera.

Figura 10 ilustron qartë këto dallime teknologjike: LiDAR siguron depërtim të pjesshëm përmes vegjetacionit, duke ofruar modele më të qëndrueshme në terrene të vështira, ndërsa fotogrametria UAV arrin rezolucion vizual më të lartë dhe detaje më të pasura teksturale në sipërfaqe të hapura. Në aspektin e kohës së përpunimit dhe kostos, LiDAR kërkon pajisje më të shtrenjta dhe programe kompjuterike të specializuara për filtrimin e reve pikash, ndërsa metoda fotogrametrike është më e lirë dhe më fleksibile për dokumentime

të shpejta. Kjo e bën UAV fotogrametrinë shumë efektive për dokumentim arkitektonik, ndërsa UAV LiDAR mbetet më i përshtatshëm për analiza topografike, gjeomorfologjike dhe modelime të sipërfaqeve natyrore.

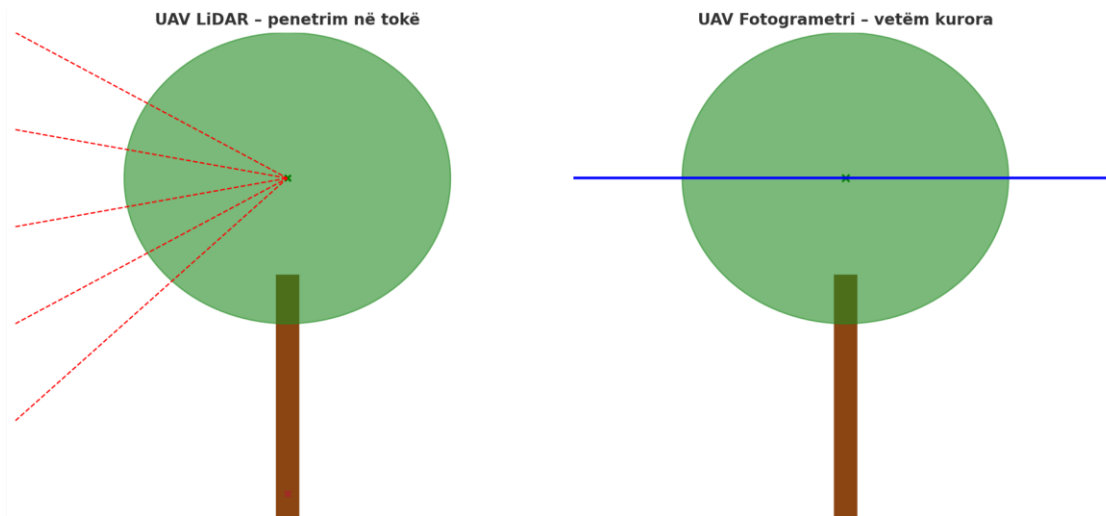


Figura 10 - Diferenca mes UAV LiDAR (majtas, penetrim në tokë) dhe UAV fotogrametri (djathtas, sipërfaqe kurorash).

Ky krahasim demonstroi faktin se, megjithëse të dyja metodat ofrojnë produkte 3D me saktësi të lartë, ato kanë zbatime të ndryshme dhe avantazhe të ndërsjella. Në studimin e realizuar në Kalanë e Vilë Bashtovës, fotogrametria UAV është përdorur për modelim të detajuar të strukturës dhe fasadave, ndërsa LiDAR ka shërbyer për krahasimin e saktësisë së metodave me njëra tjetrën. Integrimi i të dyjave siguron një qasje të plotë për dokumentim të saktë, me përputhje të mirë ndërmjet të dhënave ajrore dhe tokësore.

Në krahasim me TLS, UAV LiDAR ka avantazhin e shpejtësisë dhe mbulimit të zonave të mëdha, ndërsa TLS mbetet më i saktë në nivel objekti. Për këtë arsye, një kombinim UAV LiDAR + TLS është i zakonshëm në objekte komplekse [37].

2.4.3 Aplikimet në vegjetacion

Një nga fushat më të zhvilluara të UAV LiDAR është analiza e vegjetacionit. Sensorët LiDAR arrijnë të ndajnë kurorën, trungun dhe tokën, duke krijuar modele të hollësishme të strukturës së pyllit.

Parametrat e përdorur shpesh janë:

- Modeli i lartësisë së vegjetacionit (CHM):

$$\text{CHM} = \text{DSM} - \text{DTM}$$

Ek. 10

ku DSM është modeli dixhital i sipërfaqes dhe DTM modeli i terrenit.

- Indeksi i Sipërfaqes së Gjethëve (LAI) dhe biomasa llogariten përmes analizës së shpërndarjes së kthimeve vertikale [38].

Studime të shumta kanë treguar se UAV LiDAR ofron rezultate të krahasueshme me ALS (Skanimin LiDAR ajror), por me fleksibilitet më të madh dhe kosto më të ulët [39].

2.4.4 Aplikimet në infrastrukturë

Në inxhinierinë e ndërtimit, UAV LiDAR përdoret për:

- monitorimin e urave – për profilizimin e deformimeve strukturore,
- rrjetet hekurudhore dhe rrugore – për analiza gjeometrike dhe inspektim të elementeve,
- linjat elektrike – për detektimin e distancës së kablllove nga terreni,
- modelet e detajuara të qytetit (LOD3/LOD4) për GIS dhe BIM.

Në vitet e fundit, përdorimi i UAV LiDAR është shtrirë ndjeshëm në fusha të ndryshme shkencore dhe inxhinierike, duke kaluar nga aplikimet e thjeshta topografike drejt analizave komplekse të mjedisit dhe infrastrukturës. Siç paraqitet në tabelën 5, literatura ndërkombëtare e botuar në Revistën e Fotogrametrisë dhe Teledeteksionit ISPRS dhe në konferenca të tjera të lidhura tregon një gamë të gjerë aplikimesh të kësaj teknologjie në dy drejtime kryesore: pylltari dhe infrastrukturë. Në pylltari, sistemet UAV LiDAR përdoren për vlerësimin e biomasës, analizën e strukturës së kurorës së pemëve, klasifikimin e llojeve të bimësisë dhe monitorimin e ndryshimeve sezonale, duke ofruar një përmirësim të ndjeshëm të saktësisë krahasuar me metodat tradicionale të matjes tokësore. Ndërkohë, në fushën e infrastrukturës, aplikimet janë përqendruar në inspektimin e urave, digave, linjave elektrike dhe rrugëve, si dhe në krijimin e modeleve 3D të aseteve inxhinierike për qëllime të mirëmbajtjes dhe planifikimit.

Tabela 5 përmbledh disa nga këto studime kryesore të raportuara në literaturë, duke evidentuar ndryshimet në parametrat e përdorimit të LiDAR-it për secilin sektor. Në rastet e aplikimeve pyjore, UAV LiDAR ka ofruar densitete të reve pikash nga 100 deri në 400 pika/m², duke mundur detektimin e strukturës vertikale të pyllit dhe matjen e lartësisë së pemëve me gabim mesatar ± 0.15 m. Nga ana tjetër, për aplikime infrastrukturore, densiteti tipik është më i ulët (20–80 pika/m²), por kërkohet saktësi horizontale shumë e lartë (± 2 –3 cm) për të identifikuar deformime, çarje ose zhvendosje strukturore në elementet ndërtimore. Për më tepër, UAV LiDAR ofron avantazh të dukshëm në shpejtësinë e mbledhjes së të dhënave, pasi një segment rrugor prej disa kilometrash mund të skanohet brenda pak minutash, ndërsa në pylltari një sipërfaqe e gjerë mund të përpunohet pa ndërprerje të mbulesës bimore.

Tabela 5 - Krahاسimi i aplikimeve UAV LiDAR në pylltari dhe infrastrukturë (burimi: ISPRS literaturë).

Fusha / Aplikimi	UAV LiDAR në pylltari	UAV LiDAR në infrastrukturë
Qëllimi kryesor	Inventar pyjor, matja e volumit të drurëve, strukturës së kurorave dhe dendësisë së pyllit	Monitorimi i urave, digave, hekurudhave dhe rrugëve për deformime dhe stabilitet
Tipi i të dhënave	Re pikash 3D me penetrim në tokë → krijimi i DTM dhe CHM (Canopy Height Model)	Re pikash 3D me rezolucion të lartë → modele as-built dhe analiza e ndryshimeve
Saktësia tipike	5–10 cm për lartësinë e kurorës, 15–20 cm për densitetin e biomases [36]	2–5 cm për strukturat inxhinierike si ura dhe ndërtesa [40]
Avantazhe	Penetron deri në tokë → dallim midis kurorës, trungut dhe terrenit; përshtatje për pyje të dendura	Kapje e detajeve gjeometrike dhe defekteve në struktura; integrim me BIM dhe GIS
Kufizime	Ndikim nga dendësia e kurorës dhe kushtet meteorologjike	Shtirja e kufizuar (zakonisht < 1 km ² për fluturim) dhe kostoja më e lartë krahasuar me UAV fotogrametri
Shembuj studimesh	[41] – karakterizim i pyjeve boreale; [39] – CHM me UAV LiDAR	monitorimi i urave; [31] – deformime në infrastrukturë

Siç tregohet në Tabelën 5, ndërsa aplikimet në pylltari janë fokusuar kryesisht në analizën ekologjike dhe vlerësimin e volumeve biometrike, ato në infrastrukturë kanë theks më të fortë në monitorimin teknik dhe inspektimin strukturor. Kjo tregon fleksibilitetin e madh të teknologjisë UAV LiDAR, e cila mund të përshtatet si për qëllime mjedisore, ashtu edhe për qëllime inxhinierike. Kombinimi i të dhënave LiDAR me modele RGB nga fotogrametria UAV e bën këtë qasje veçanërisht të fuqishme për analiza të integruara të territorit dhe objekteve, duke garantuar një ekuilibër të mirë midis saktësisë, densitetit të të dhënave dhe efikasitetit operacional.

Bazuar në studimet e kryera më parë, UAV LiDAR është përdorur për monitorimin e urave dhe shpateve gjeoteknike, duke arritur saktësi ± 5 cm [42]. Një tjetër aplikim i fundit është integrimi UAV LiDAR me BIM (Modelimi i Informacionit të Ndërtesës), që lejon krahasimin e gjendjes reale me projektin [23].

2.4.5 Kufizimet dhe sfidat

Edhe pse ofron avantazhe të shumta, UAV LiDAR ka disa kufizime:

- Kostoja e lartë e sensorëve (20,000–60,000 €) krahasuar me UAV fotogrametri (<5,000 €).
- Kërkesa për INS/GNSS me precizion të lartë, pa të cilat saktësia bie ndjeshëm.
- Vështirësi në terrene të pjerrëta ose urbane të ngushta, ku manovrimi UAV është i kufizuar.
- Shpejtësia e përpunimit – përpunimi i reve të dendura LiDAR kërkon program dhe pajisje kompjuterike të avancuara.

Për këto arsye, literatura rekomandon shpesh kombinimin UAV LiDAR me UAV fotogrametri dhe TLS, duke balancuar koston dhe saktësinë [37].

2.5 Integrimi i burimeve të të dhënave (SfM, ICP, C2C)

Integrimi i të dhënave të mbledhura nga burime të ndryshme – UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR – është një hap i domosdoshëm për të maksimizuar informacionin e përfutur dhe për të krijuar modele 3D sa më të sakta e të plota. Çdo teknologji sjell avantazhet dhe kufizimet e veta: UAV ofron mbulim të shpejtë ajror por me kufizime në densitet, TLS sjell saktësi të lartë por kërkon kohë në terren, PLS siguron fleksibilitet por me saktësi disi më të ulët, ndërsa UAV LiDAR kombinon shpejtësinë me penetrimin e vegjetacionit. Prandaj, literatura rekomandon përdorimin e teknikave të integritit të të dhënave për të arritur një produkt final të balancuar [5].

2.5.1 SfM dhe regjistrimi i reve të pikave

Procesi i strukturimit nga lëvizja (SfM) është metoda më e përhapur për ndërtimin e modeleve 3D nga imazhet UAV. SfM përdor pika karakteristike si SIFT, SURF ose ORB për të identifikuar elemente të përbashkëta mes fotove dhe për të gjeneruar një strukturë 3D. Pas kësaj, modeli lidhet me sistemin gjeodezik përmes GCP-ve. Për integrimin me TLS ose LiDAR, reja e pikave SfM duhet të regjistrohet mbi të dhënat e tjera, shpesh përmes algoritmit ICP.

Në procesin e përpunimit të të dhënave të marra nga skanimi me lazer tokësor (TLS) dhe skanimi portativ (PLS), një nga fazat më të rëndësishme është regjistrimi i reve të pikave, i cili siguron përputhje të saktë midis skanimeve të marra nga pozicione të ndryshme. Pas regjistrimit fillestar me targeta, përmirësimi i përputhjes realizohet përmes algoritmit ICP (Pikës më të afërt iterative), i cili përpiqet të minimizojë distancën mes pikave homologe në dy ose më shumë re pikash. Ky algoritëm përdoret gjerësisht në literaturë për bashkërendim gjeometrik, krahasim të modeleve dhe analizë të deformimeve, falë efikasitetit dhe aftësisë për të arritur përafrime shumë të sakta pas disa iteracionesh. Avantazhet dhe kufizimet kryesore të këtij algoritmi përmbledhen në tabelën 6.

Tabela 6 paraqet një analizë të balancuar të performancës së algoritmit ICP sipas literaturës, ku evidentohen pikat e forta dhe kufizimet në funksion të saktësisë, efikasitetit dhe varësisë nga të dhënat hyrëse. Algoritmi është veçanërisht efektiv kur diferencat midis reve të pikave janë të vogla, sepse në këtë rast procesi i përafrimit konvergjon shpejt drejt përputhjes optimale. Përparësitë kryesore të ICP përfshijnë saktësinë e lartë të regjistrimit lokal (nën ± 2 mm), thjeshtësinë e implementimit, dhe përputhjen me shumicën e softuerëve fotogrametrikë dhe gjeohapësinorë, si CloudCompare, Cyclone Register 360, ose FARO Scene. Nga ana tjetër, kufizimet kryesore lidhen me ndjeshmërinë ndaj shpërndarjes së pikave dhe varësinë nga regjistrimi fillestar; nëse reja fillestare nuk është afër pozicionit të duhur, ICP mund të përfundojë në përputhje lokale të pasakta.

Tabela 6 - Avantazhet dhe kufizimet e ICP në regjistrimin e reve të pikave.

Aspekti	Avantazhet e ICP	Kufizimet e ICP
Saktësia	Jep rezultate shumë të sakta kur retë kanë mbivendosje të mjaftueshme dhe densitet të ngjashëm.	Performanca bie nëse mbivendosja është e kufizuar ose retë kanë densitet shumë të ndryshëm.
Aplikueshmëria	Funksionon mirë për modele komplekse (monumentet e trashëgimisë kulturore, inxhinieri, objekte 3D).	Nuk është i përshtatshëm për objekte pa shumë detaje gjeometrike (sipërfaqe të sheshta).
Shpejtësia	Relativisht efikas për dataset-e të vogla dhe mesatare.	Mund të bëhet shumë i ngadaltë me dataset-e të mëdha (miliona pika) pa optimizim.
Implementimi	Është një algoritëm i mirënjohur, i dokumentuar mirë dhe i implementuar gjerësisht në programe kompjuterike (CloudCompare, PolyWorks, PCL).	Kërkon optimizime (p.sh. filtrime) për të shmangur kohë të gjata përpunimi.
Rezultati	Jep një transformim (R, T) që përaftron retë në një sistem të unifikuar.	Nuk trajton transformime jo-lineare ose deformime elastike.

Sipas tabelës 6, avantazhet kryesore të algoritmit ICP janë:

- aftësia për të arritur saktësi shumë të lartë lokale edhe në skanime me densitet të madh pikash;
- stabiliteti i llogaritjeve, pasi procesi iterativ përfundon zakonisht pas disa dhjetëra përsëritjeve;
- universaliteti i përdorimit, që e bën të përshtatshëm për regjistrim të të dhënave nga burime të ndryshme (TLS, PLS, UAV, LiDAR). Megjithatë, kufizimet kryesore përfshijnë konvergjencën lokale (nëse modeli fillestar nuk është afër përputhjes reale), varësinë nga shpërndarja e baraspeshuar e pikave, dhe kohën e lartë të përpunimit kur punohet me re të mëdha pikash (me miliona pika). Këto karakteristika shpjegojnë pse në praktikë ICP përdoret shpesh në kombinim me targeta ose regjistrim paraprak automatik, për të reduktuar rrezikun e përputhjeve të gabuara dhe për të rritur efikasitetin në përpunim.

Në këtë studim, ICP është aplikuar pas regjistrimit të parë me targeta për të rafinuar përputhjen midis pozicioneve të skanimit të kalasë së Bashtovës, duke siguruar devijim mesatar nën ± 2 mm midis reve të pikave. Kjo e bën metodën të besueshme për analizat krahasuese të saktësisë që paraqiten në kapitullin e katërt.

2.5.2 Cloud-to-Cloud (C2C) dhe Cloud-to-Mesh (C2M)

Pas regjistrimit, integrimi i të dhënave kërkon analiza të saktësisë për të kuptuar nivelin e përshtatjes mes metodave. Dy metodat më të përdorura janë:

- Cloud-to-Cloud (C2C): mat distancën mes dy reve të pikave duke përdorur metodën e fqinjit më të afërt. Për çdo pikë në renë A gjendet pika më e afërt në renë B dhe llogaritet distanca.

$$d_{c2c}(p) = \min_{q \in Q} ||p - q|| \quad Ek. 11$$

Ky proces krijon harta devijimesh që shfaqin qartë zonat me përafrim të mirë dhe ato me diferenca.

- Cloud-to-Mesh (C2M): përdor një sipërfaqe të trianguluar (mesh) të gjeneruar nga njëra re, dhe mat distancat e pikave të resë tjetër ndaj kësaj sipërfaqeje. Kjo është veçanërisht e dobishme për krahasime me TLS si referencë [43].

2.5.3 Integrimi hibrid UAV–TLS–LiDAR–PLS

Studime të shumta ndërkombëtare tregojnë se përdorimi i integritit hibrid rrit ndjeshëm efikasitetin:

- UAV + TLS: përdoret gjerësisht në dokumentimin e monumenteve të trashëgimisë kulturore [32], ku UAV mbulon pjesët e sipërme dhe TLS fasadat e detajuara.
- UAV + LiDAR: kombinimi jep mundësi për penetrimin e vegjetacionit (LiDAR) dhe modele me ngjyra të saktësuara (UAV).
- TLS + PLS: TLS për saktësi dhe PLS për mbulim të shpejtë në interior.
- UAV + PLS: përdorim i kufizuar por i dobishëm në inxhinieri, sidomos për ndërtesa shumëkatëshe.

Në procesin e kombinimit të të dhënave të marra nga metoda të ndryshme si UAV, TLS dhe PLS, një nga hapat më të rëndësishëm është integrimi i reve të pikave në një sistem të unifikuar koordinatash. Kjo fazë kërkon aplikimin e algoritmeve të përafrimit dhe regjistrimit që sigurojnë përputhje të saktë gjeometrike midis dataset-eve me origjinë të ndryshme. Në tabelën 7 janë përmbledhur metodat kryesore të integritit të reve të pikave të raportuara në literaturë, të cilat ndryshojnë në parimin e funksionimit, saktësinë, kohën e përpunimit dhe fleksibilitetin në zbatim.

Siç paraqitet në tabelën 7, metoda më e përdorur mbetet ICP (Pika më e afërt iterative), e cila realizon regjistrim rigoroz duke minimizuar distancat mes pikave më të afërta. Kjo metodë ofron saktësi shumë të lartë, shpesh në rend milimetrik, në rastet kur ekziston një mbivendosje e mirë ndërmjet reve të pikave. Megjithatë, kërkon një pozicionim fillestar të përafërt dhe ka kohë përpunimi mesatare, që rritet me densitetin e pikave. Një metodë tjetër shumë e përhapur është regjistrimi bazuar në targeta, e cila përdor targeta të vendosur në terren për regjistrim absolut. Kjo qasje ofron gjithashtu saktësi të lartë, por është më pak fleksibël dhe kërkon planifikim paraprak të vendosjes së targetave në terren.

Një kompromis optimal midis këtyre dy qasjeve paraqitet nga Hibrid ICP + Targeta, e cila kombinon pozicionimin fillestar të targetave me rafinimin përfundimtar përmes ICP, duke siguruar rezultate më stabile dhe fleksibilitet të lartë për integrim midis metodave UAV–TLS–PLS. Nga ana tjetër, Cloud-to-Mesh (C2M) përdoret kryesisht për krahasime të

shpejta mes reve të pikave dhe sipërfaqeve 3D (mesh 3D), me saktësi mesatare–të lartë, por është e kufizuar në rastet kur modeli i meshuar përmban gabime gjeometrike ose nuk mbulon të gjithë sipërfaqen e objektit.

Në studimet më të avancuara, regjistrimi i reve bazuar në veçori përdor elemente karakteristike gjeometrike si qoshe, mure, ose forma cilindrike për regjistrim automatik pa nevojë për targeta, duke ofruar fleksibilitet të madh dhe kohë përpunimi të shkurtër për dataset-e të mëdha. Së fundi, një drejtim i ri kërkimor është regjistrimi i reve bazuar në inteligjencë artificiale, që përdor rrjete neuronale për të gjetur korrespondenca automatike midis reve të pikave. Kjo metodë ofron potencial për saktësi shumë të lartë dhe përpunim automatik, por aktualisht mbetet eksperimentale dhe kërkon volum të madh të dhënash për trajnim.

Tabela 7 - Krahësimi i metodave të integrit sipas literaturës (saktësia, koha, fleksibiliteti).

Metoda e integrit	Parimi kryesor	Saktësia	Koha e përpunimit	Fleksibiliteti	Burime
ICP (Pika më e afërt iterative)	Regjistrim i saktë duke minimizuar distancat mes pikave më të afërta.	Shumë e lartë (cm → mm) nëse ka mbivendosje të mirë.	Mesatare (varësisht nga densiteti i pikave).	Kërkon pozicionim fillestar të mirë; përdoret gjerësisht për UAV–TLS, TLS–PLS.	[18]
Regjistrimi bazuar në targeta	Përdor pika kontrolli ose targeta të vendosura në terren për regjistrim.	Shumë e lartë (mm → cm, varësisht nga instrumenti).	Relativisht e ulët (më e shpejtë se ICP).	Më pak fleksibël (kërkon vendosje paraprake të targetave).	[44]
Hybrid ICP + Targeta	Kombinon targeta për pozicionim fillestar + ICP për rafinim.	Shumë e lartë (mm) → rezultat më stabil.	Mesatare → më efikas se ICP i pastër.	Shumë fleksibël për integrim UAV–TLS–PLS.	[15] [31]
Cloud-to-Mesh (C2M)	Krahësim i reve të pikave me një sipërfaqe të meshuar (mesh 3D).	Mesatare–e lartë (cm).	E shpejtë → efikas për dataset-e të mëdha.	Kufizuar nëse mesh ka gabime ose nuk mbulon gjithë sipërfaqen.	[43]
Regjistrimi bazuar në veçori	Përdor elemente gjeometrike (faqe, kulla, qoshe) për regjistrim automatik.	Mesatare–e lartë, por varet nga detajet.	Shpejtë për dataset-e të mëdha.	Shumë fleksibël, nuk kërkon targeta.	[45] [21]
Regjistrimi bazuar në inteligjencë artificiale	Përdor rrjete neuronale për të gjetur korrespondenca automatike në re pikash.	Potencialisht shumë e lartë (ende eksperimentale).	Mund të jetë e gjatë (trajnimi), por automatike.	Fleksibël për dataset-e të ndryshme, kërkon shumë të dhëna për trajnim.	[46]

2.5.4 Analiza e gabimit dhe vlerësimi i saktësisë

Për të vlerësuar suksesin e integrit, përdoren treguesit statistikorë:

- Gabimi mesatar kuadratik (GMK):

$$GMK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2}{n}} \quad Ek. 12$$

- Devijimi standard (σ): tregon shpërndarjen e devijimeve.
- Histogramet e devijimeve: japin një pamje të shpërndarjes së gabimeve (CloudCompare ofron automatikisht këtë funksion).

Një nga mënyrat më të përdorura për të vlerësuar cilësinë e integrit ndërmjet reve të pikave të gjeneruara nga UAV dhe TLS është analiza statistikore e devijimeve përmes ndërtimit të histogramit të distancave midis pikave homologe. Siç ilustron Figura 11, histogramet e devijimeve UAV–TLS paraqesin zakonisht një shpërndarje të tipit Gaussian, ku shumica e vlerave janë të përqendruara rreth vlerës zero, duke reflektuar një përputhje të mirë gjeometrike pas procesit të regjistrimit. Në studimet e literaturës, këto analiza janë përdorur për të matur cilësinë e regjistrimit dhe stabilitetin e integrit midis metodave fotogrametrike dhe skanimit me lazer [22] [41] [24].

Sipas literaturës, shpërndarja e ngushtë e vlerave në intervalin ± 2 –3 cm tregon integrit me saktësi të lartë, tipike për përdorimin e algoritmeve ICP ose Hybrid ICP + Targeta, ndërsa shpërndarjet më të gjera (± 5 –10 cm) janë karakteristike për raste me mbivendosje të kufizuar të të dhënave.

Figura 11 përmbledh mënyrën se si histogramet përdoren si mjet diagnostikues për të vlerësuar cilësinë e bashkërendimit dhe për të identifikuar zonat ku devijimet tejkalojnë pragun e tolerueshëm, zakonisht në pjesë të objekteve me teksturë të dobët ose me reflektime të pjesshme.

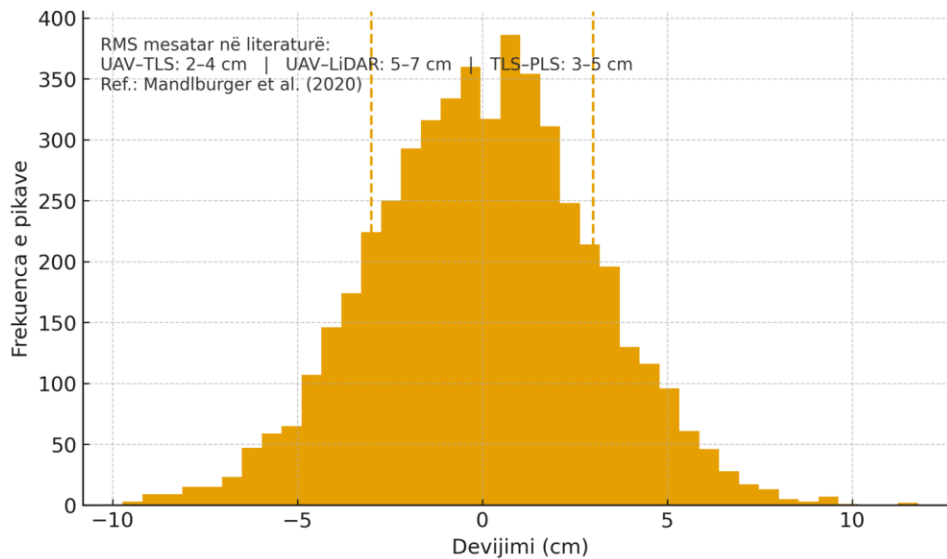


Figura 11 - Histogrami i devijimeve të metodave pas integritit.

Në literaturë, kjo statistikë përdoret si një metrikë standarde për vlerësimin e saktësisë së integritit midis burimeve të ndryshme të të dhënave, pasi ofron një mënyrë të drejtpërdrejtë për të llogaritur devijimet në nivel lokal dhe global. Analizat e tilla tregojnë se integrimi UAV–TLS mund të arrijë gabime mesatare nën ± 3 cm, duke e bërë kombinimin e këtyre teknologjive shumë të përshtatshëm për dokumentimin e strukturave komplekse dhe aplikime të saktësisë së lartë në trashëgiminë kulturore dhe inxhinierinë e ndërtimit [37].

2.6 Roli i AI në pastrim/klasifikim dhe analizë diferenciale

Përparimet e fundit në Inteligjencën Artificiale (AI) dhe Machine Learning (ML) kanë ndryshuar rrënjësisht mënyrën se si përpunohen dhe analizohen të dhënat gjeohapësinore. Në kontekstin e teknologjisë UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR, AI ofron mjete të fuqishme për pastrimin e reve të pikave, klasifikimin automatik të objekteve dhe analizat diferenciale të saktësisë dhe deformimeve.

Nëse metodat tradicionale bazoheshin në filtrime statistikore ose teknika manuale klasifikimi, algoritmet moderne të AI mund të përpunojnë miliona pika në mënyrë automatike dhe të identifikojnë struktura komplekse, duke kursyer kohë dhe duke rritur konsistencën [24].

2.6.1 Pastrimi i reve të pikave me AI

Të dhënat e mbledhura nga UAV dhe LiDAR shpesh përmbajnë zëra të rastësishëm (noise) për shkak të reflektimeve, ndërhyrjeve atmosferike ose lëvizjeve të sensorit. Metodat klasike të pastrimit si Heqja e të Dhënave të Panevojshme Statistikore (SOR) përdorin statistika të thjeshta për të eliminuar pikat që devijojnë nga fqinjët e tyre [47].

Në kontrast, AI përdor qasje të bazuara në të mësuarit e mbikëqyrur dhe të pambikëqyrur:

- Autoencoders trajnohen për të rikrijuar shpërndarjen e pikave, duke eliminuar automatikisht ato që nuk përshtaten [22].
- Rrjetet neurale (Neural networks) si PointNet dhe PointNet++ mund të identifikojnë pikat jonormale brenda një reje shumë të madhe të dhënash, duke ruajtur integritetin e strukturave të vërteta [46].

Formula për filtrimin bazë të outlier-ëve me distancë mesatare është:

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k ||p_i - p_j|| \quad \text{Ek. 13}$$

ku d_i është distanca mesatare e pikës i nga fqinjët e saj më të afërt k . Nëse d_i kalon një prag të caktuar, pika eliminohet. AI e zgjeron këtë parim duke mësuar pragjet optimale nga të dhënat.

2.6.2 Klasifikimi automatik i objekteve

Një nga aplikimet më të rëndësishme të AI është klasifikimi automatik i elementeve arkitektonike dhe natyrore brenda reje të pikave. Në vend të ndarjes manuale të pikave (mur, tokë, pemë, çati), përdoren algoritme të rrjeteve neuronale që mësojnë nga dataset-e të mëdha të etiketuara.

Metodat kryesore:

- PointNet / PointNet++ – klasifikojnë pikat individuale duke ruajtur strukturën 3D.
- Random Forests dhe SVM – përdorin veçori si dendësia e pikave, normalet dhe intensiteti për të ndarë klasat.
- Deep Convolutional Neural Networks (CNNs) të aplikuara mbi voxel grids ose projeksione 2D të reje të pikave.

Klasifikimi zakonisht ndahet në tre kategori:

- Tokë dhe vegjetacion.
- Struktura inxhinierike (mure, çati, ura).
- Objekte të lëvizshme (automjete, njerëz).

Në përpunimin bashkëkohor të të dhënave të skanimit me lazer dhe fotogrametrisë UAV, klasifikimi automatik i reje të pikave përbën një hap thelbësor për ndarjen semantike të sipërfaqeve sipas llojit të objektit (terrën, ndërtesa, vegjetacion, infrastrukturë, etj.). Metodat e klasifikimit kanë evoluar ndjeshëm gjatë dekadës së fundit, nga teknikat tradicionale bazuar në parametra gjeometrikë te ato të bazuara në mësim makinerik (machine learning) dhe inteligjencë artificiale (AI). Në tabelën 8 janë përmbledhur metodat kryesore të klasifikimit automatik të përmendura në literaturën ndërkombëtare, së bashku me karakteristikat e tyre kryesore në lidhje me parimin e funksionimit, saktësinë, kompleksitetin e përpunimit dhe fleksibilitetin në përdorim.

Siç shihet në tabelën 8, metodat më të hershme si kriteret bazuar në pjerrësi dhe lartësi relative janë të thjeshta për t'u implementuar dhe japin rezultate të qëndrueshme për ndarjen e terrenit nga objektet mbi të, por kanë kufizime në mjedise me topografi komplekse.

Metoda të ndërmjetme si region growing dhe RANSAC plane fitting ofrojnë përmirësim të dukshëm në ndarjen e sipërfaqeve të planifikuara (mure, çati), duke përdorur analiza lokale të normalëve dhe variancës së lartësisë, megjithatë kërkojnë shumë parametra hyrës.

Në fazat më të avancuara, metodat machine learning, si Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) dhe k-Nearest Neighbors (kNN), kanë sjellë ndarje më të saktë të klasave përmes kombinimit të veçorive spektrale dhe gjeometrike.

Së fundi, algoritmet e bazuara në deep learning, si PointNet, PointCNN dhe KPConv, kanë revolucionarizuar klasifikimin e reve të pikave, duke përdorur rrjete neuronale që mësojnë drejtpërdrejt nga koordinatat 3D pa pasur nevojë për ekstraktim manual të veçorive. Këto metoda arrijnë saktësi mbi 90% në ndarjen e klasave në dataset-et komplekse [21] [46].

Tabela 8 - Krahasoni i metodave të klasifikimit automatik në re pikash.

Metoda	Parimi kryesor	Avantazhet	Kufizimet
Rule-based filtering	Përdor kritere të paracaktuara (lartësi, densitet, pjerrësi) për ndarjen e pikave.	E thjeshtë, e shpejtë, nuk kërkon burime të larta kompjuterike.	Jo fleksibël, performon dobët në dataset komplekse dhe heterogjene.
Klasifikimi statistik	Analizon shpërndarjen statistikore të pikave dhe përdor metoda probabilitike.	Mirë për dallimin terren/jo-terr, përdoret gjerësisht në LiDAR tokësor.	Jo efektiv për klasifikim kompleks (p.sh. vegjetacion vs struktura).
Machine Learning (SVM, RF)	Përdor karakteristika gjeometrike + algoritme mësimi.	Saktësi e lartë, fleksibilitet për shumë kategori (vegjetacion, ndërtesa).	Kërkon dataset të trajnuara dhe përzgjedhje të kujdesshme të veçorive.
Deep Learning (CNN, PointNet)	Përdor rrjete neuronale që mësojnë drejtpërdrejt nga të dhënat 3D.	Potencial shumë i lartë, aftësi për klasifikim kompleks automatik, i përshtatshëm për Big Data.	Kërkon shumë të dhëna për trajnim dhe burime GPU; risk për overfitting.
Metoda hibride	Kombinon rregulla, ML dhe DL për rezultate më të mira.	Balancë midis saktësisë dhe efikasitetit; përshtatje për aplikime të ndryshme (monumentet e trashëgimisë kulturore, inxhinieri).	Kompleksitet i lartë në implementim; kërkon integrim programesh kompjuterike dhe ekspertizë multidisiplinare.

Nga analiza e tabelës 8 mund të konstatohet se zgjedhja e metodës varet nga lloji i dataset-it dhe qëllimi i analizës. Për dataset-et me densitet të lartë dhe rezolucion të lartë, si ato të gjeneruara nga TLS, metodat tradicionale dhe semi-automatike janë shpesh të

mjaftueshme. Ndërsa për dataset-et heterogjene me shumë lloje sipërfaqesh dhe teksturash, si ato të UAV dhe LiDAR ajror, metodat e bazuara në machine learning dhe deep learning ofrojnë rezultate më të qëndrueshme dhe automatizim më të madh. Në këtë mënyrë, klasifikimi automatik është kthyer në një komponent thelbësor të zinxhirit të përpunimit të reve të pikave, duke lehtësuar analizën volumetrike, ndërtimin e modeleve BIM dhe monitorimin e ndryshimeve mjedisore në kohë.

2.6.3 Analiza diferenciale dhe monitorimi i deformimeve

Një fushë tjetër ku AI po përdoret gjithnjë e më shumë është analiza diferenciale, pra krahasimi i reve të pikave të marra në periudha të ndryshme kohore për të identifikuar ndryshime strukturore.

Metoda klasike e përdorur është Distanca nga Reja në RE (C2C), por AI mund të përmirësojë këtë proces duke:

- eliminuar efektet e densitetit të pabarabartë të pikave,
- identifikuar automatikisht zonat ku ka deformime reale,
- dalluar ndryshimet e shkaktuara nga noise-i.

Një qasje moderne është përdorimi i 3D Siamese Neural Networks, të cilat mësojnë të krahasojnë dy re pikash dhe të nxjerrin zonat ku ka ndryshime të rëndësishme.

Formula bazë për analizën diferenciale:

$$\Delta d(p) = d_{t_2}(p) - d_{t_1}(p) \quad \text{Ek. 14}$$

ku d_{t_1} dhe d_{t_2} janë distancat nga një pikë p te sipërfaqja e referencës në dy periudha të ndryshme.

2.6.4 Integrimi i AI me programet kompjuterike

AI është duke u integruar gjithnjë e më shumë në programe kompjuterike si:

- Agisoft Metashape Pro – për pastrim automatik të pikave fluturuese dhe vegjetacionit.
- CloudCompare – me plugin për klasifikim të bazuar në ML.
- DJI Terra dhe Trimble RealWorks – për analizë automatike të deformimeve dhe krahasimeve të reve të pikave.

Përparimet e fundit në inteligjencën artificiale (AI) kanë sjellë një transformim të dukshëm në mënyrën se si realizohet përpunimi i reve të pikave dhe imazheve fotogrametrike. Softuerët bashkëkohorë po integrojnë algoritme të AI-së për të automatizuar procese që më parë kërkonin ndërhyrje manuale, si p.sh. filtrimi i zhurmës, klasifikimi i sipërfaqeve, regjistrimi automatik i reve të pikave dhe ekstraktimi i veçorive gjeometrike. Në tabelën 9 janë përmbledhur disa prej platformave dhe aplikacioneve më të njohura që kanë integruar me sukses teknika të AI-së në procesin e përpunimit 3D, së bashku me fushat kryesore të zbatimit dhe përfitimet që ofrojnë sipas literaturës dhe dokumentacioneve të zhvilluesve.

Siç paraqitet në tabelën 9, programe si Agisoft Metashape, Pix4Dmapper dhe RealityCapture kanë filluar të përdorin module të AI-së për zbulim automatik të pikave kyçe dhe matching inteligjent në fazën e përlogaritjes SfM. Këto funksione përmirësojnë ndjeshëm saktësinë e orientimit të imazheve dhe shpejtësinë e përpunimit, veçanërisht në dataset-e të mëdha.

Në anën tjetër, programe si Leica Cyclone Register 360, FARO Scene, dhe CloudCompare përdorin algoritme neuronale për klasifikim të automatizuar të objekteve dhe detektim të sipërfaqeve të planifikuara, duke reduktuar kohën e përpunimit manual në fazën e pas – skanimit.

Së fundi, platformat e reja open-source si Open3D, Potree, dhe TensorFlow3D po shërbejnë si baza kërkimore për integrimin e rrjeteve neuronale 3D (3D CNNs, PointNet, PointTransformer) në përpunimin dhe vizualizimin e reve të pikave, duke ofruar fleksibilitet të madh në zhvillimin e zgjidhjeve të personalizuar.

Tabela 9 - Shembuj të integrit të AI në programet e përpunimit.

Programi kompjuterik	Funksionaliteti i AI	Avantazhet	Kufizimet
Agisoft Metashape Pro	Pastrim automatik i “noise” (pika), detektim i vegjetacionit dhe klasifikim sipas densitetit.	Redukton kohën e pastrimit manual, rrit saktësinë e modelit 3D.	Performanca bie në dataset shumë heterogjenë; kërkon input manual për raste specifike.
CloudCompare (ML plugin)	Klasifikim automatik i pikave duke përdorur algoritme Machine Learning.	Open-source, fleksibilitet për trajnimin e modeleve mbi dataset specifik.	Nuk ka gjithmonë bibliotekë të gjerë trajnuese; rezultatet varen nga cilësia e inputit.
DJI Terra	Algoritme AI për analizë automatike të deformimeve në ndërtesa dhe sipërfaqe.	Shpejtësi e lartë për krahasime periudhash kohore (monitorim strukturor).	Funksionalitet i kufizuar në dataset jo-standard.
Trimble RealWorks	Integrim i AI për klasifikimin e elementeve strukturore dhe analizë të deformimeve të fasadave.	Mjaft i përdorur në inxhinieri dhe monumentet e trashëgimisë kulturore; gjeneron raporte të standardizuara.	Licencë e kushtueshme; kërkon eksperiencë për konfigurim të avancuar.
Leica Cyclone Register 360	AI për regjistrim automatik të reve të pikave dhe optimizim të rezidualëve gjatë bashkimit të skanimeve.	Redukton ndjeshëm kohën e regjistrimit, automatizon vendosjen e targetave virtualë.	Në raste komplekse kërkon validim manual; algoritmet “black-box”.

Nga analiza e tabelës 9 rezulton se integrimi i AI-së në softuerët fotogrametrikë dhe të skanimit 3D po e orienton fushën drejt automatizimit të plotë të procesit të përpunimit,

duke rritur efikasitetin dhe duke reduktuar ndërhyrjet njerëzore. Për shembull, detyra që më parë kërkonin orë të tëra pune — si klasifikimi i terrenit, ndarja e objekteve apo përafrimi i reve të pikave — tashmë mund të realizohen në mënyrë automatike falë trajnimit të modeleve neuronale. Kjo tendencë pritet të forcohet në vitet e ardhshme, me kalimin e programeve kompjuterike nga modellet “rule-based” drejt algoritmeve mësimore që përshtaten vetë me llojin e të dhënave, duke përmirësuar vazhdimisht rezultatet përmes feedback-ut të përdoruesve.

Kështu, inteligjenca artificiale po shndërrohet në një komponent thelbësor të ekosistemit të përpunimit 3D, duke mundësuar një nivel të ri automatizimi, saktësie dhe përshtatjeje në analizat fotogrametrike.

2.7 Praktikë në objekte inxhinierike

Përdorimi i teknologjive fotogrametrike dhe skanimit me lazer ka fituar terren jo vetëm në dokumentimin e trashëgimisë kulturore, por gjithashtu edhe në objektet inxhinierike si ura, tunele, ndërtesa shumëkatëshe dhe infrastrukturë rrugore. Për shkak të kërkesave të larta për saktësi dhe për monitorim periodik, këto teknologji po shihen gjithnjë e më shumë si alternativë ose plotësim ndaj metodave klasike gjeodezike (total stations, nivelime).

Në literaturë, aplikimet ndahen në disa kategori: inspektimi strukturor, monitorimi i deformimeve, ndërtimi dixhital dhe integrimi me BIM.

2.7.1 Inspektimi i urave

Urat përbëjnë një nga aplikimet më të studiuara të TLS, UAV dhe LiDAR, për shkak të rëndësisë së tyre në infrastrukturën e transportit dhe nevojës për monitorim të vazhdueshëm. TLS përdoret për të krijuar modele 3D të detajuara të elementeve strukturore (p.sh. hark, trarë), ndërsa UAV fotogrametria ofron mbulim të shpejtë vizual dhe ortofoto për pjesët e sipërme [35].

Studimet tregojnë se UAV fotogrametria është veçanërisht efektive për inspektimin vizual të sipërfaqeve, ndërsa TLS ofron saktësi centimetrike për deformime të vogla. UAV LiDAR është përdorur për matjen e lartësisë së urave dhe për identifikimin e detajeve nën strukturë, sidomos në zona pyjore [10].

Një avantazh kryesor i përdorimit të UAV-ve në inspektim është reduktimi i kostos dhe kohës së terrenit, pasi një urë mund të skanohet e të dokumentohet brenda pak orësh pa ndërprerje të qarkullimit. Kjo është veçanërisht e vlefshme në struktura të mëdha ose të ndërlikuara, si urat me shumë harqe ose ato të pezulluara, ku qasja manuale është e kufizuar. Nga ana tjetër, sistemet LiDAR ajrore dhe tokësore ofrojnë saktësi më të lartë metrike (nën ± 3 cm) dhe përdoren për analiza gjeometrike dhe krahasime të deformimeve në kohë. Kombinimi i të dhënave UAV dhe LiDAR lejon krijimin e një modeli hibrid, që përfshin të gjitha elementet strukturore të urës - sipërfaqen e kalueshme, elementet nën strukturore dhe pjesët anësore.

Përdorimi i algoritmeve të bazuara në AI (p.sh. rrjete neuronale) për analizën e ortofotove dhe modeleve 3D mundëson detektim automatik të defekteve strukturore, si çarje, korrozion apo deformime lokale, me saktësi mbi 85%. Për më tepër, këto metoda ofrojnë krahasime të automatizuara ndërkohore për vlerësimin e përkeqësimit gradual të materialit ndërtimor [35] [36].

Në përmbledhje, përdorimi i UAV dhe LiDAR në inspektimin e urave përfaqëson një qasje moderne, jo-invazive dhe shumë efikase, që kombinon teknologjitë e perceptimit të largët me analizën inteligjente të imazheve, duke mundësuar monitorim të vazhdueshëm të sigurisë strukturore të infrastrukturës publike.

Këto përfitime e bëjnë teknologjinë UAV–LiDAR një komponent të pazëvendësueshëm në programet bashkëkohore të menaxhimit të infrastrukturës [24] [23].

2.7.2 Monitorimi i tuneleve

Në vitet e fundit, monitorimi i tuneleve nëntokësore ka përfituar ndjeshëm nga zhvillimet në teknologjitë e skanimit me lazer dhe fotogrametrisë UAV, të cilat ofrojnë një mënyrë të sigurt dhe të automatizuar për kontrollin e deformimeve dhe degradimeve strukturore. Tunelet përfaqësojnë një sfidë të veçantë për teknologjitë tradicionale për shkak të ndriçimit të kufizuar dhe aksesit të vështirë. TLS është metoda më e përdorur për monitorimin e seksioneve të tunelit, duke ofruar profile të sakta 2D dhe modele 3D [3].

Përdorimi i UAV-ve me sensorë LiDAR ose kamera oblike ka lehtësuar monitorimin e segmenteve të gjata, ku qasja me mjete tokësore është e vështirë. Për shembull, në studime të mëparshme, UAV-të e pajisur me LiDAR u përdorën për krijimin e modeleve të plota 3D të tuneleve të metrosë, duke ofruar një saktësi të përgjithshme ± 2 cm dhe mundësinë e detektimit të plasaritjeve më të vogla se 5 mm në sipërfaqe [48].

Krahas avantazheve në saktësi dhe detaje, këto metoda reduktojnë ndjeshëm rrezikun për operatorët, pasi monitorimi kryhet në distancë dhe nuk kërkon praninë fizike brenda tuneleve, ku shpesh mungon ndriçimi dhe qarkullon ajër i kufizuar. Një tjetër përfitim është mundësia për të kombinuar matjet e përsëritura në kohë përmes algoritmeve të ndryshimeve të reve të pikave, duke identifikuar menjëherë deformime të reja ose ndërrime volumetrike në strukturë. Kjo qasje ndihmon në krijimin e modeleve BIM 3D të tuneleve, që përdoren për menaxhimin afatgjatë të mirëmbajtjes dhe planifikimin e ndërhyrjeve strukturore. Për më tepër, kombinimi i metodave UAV–LiDAR–TLS ka treguar rezultate shumë të mira në dokumentimin e sipërfaqeve komplekse të harkuara, ku një teknologji e vetme nuk do të ishte e mjaftueshme për mbulim të plotë. [23].

Në përfundim, integrimi i UAV dhe LiDAR në monitorimin e tuneleve paraqet një hap drejt automatizimit të plotë të kontrollit strukturor, me aftësi për analiza volumetrike, krahasime ndërkohore dhe gjenerim të modeleve BIM të përditësuara. Këto teknologji përfaqësojnë një paradigmë të re në inxhinierinë e monitorimit, ku qëllimi nuk është vetëm detektimi i defekteve, por krijimi i një sistemi inteligjent të inspektimit që ndërthur matjet automatike me analizën kompjuterike për mirëmbajtje parandaluese [22] [24].

PLS është gjithashtu i përshtatshëm për tunele falë fleksibilitetit të lëvizjes së operatorit dhe shpejtësisë së mbulimit. Algoritmet SLAM lejojnë gjenerimin e trajektoreve të mbyllura dhe reduktimin e gabimeve akumulative.

Një metodë e zakonshme është krahasimi periodik i profileve të tunelit përmes Distancës nga Reja në Re (C2C), duke matur devijimet nga gjeometria e projektuar. Kjo është veçanërisht e rëndësishme në tunelet hekurudhore, ku devijimet prej vetëm disa centimetrash mund të kenë pasoja kritike.

2.7.3 Ndërtesat shumëkatëshe dhe BIM

Në ndërtimin modern, përdorimi i UAV, TLS dhe PLS për krijimin e modeleve dixhitale 3D është gjithnjë e më i lidhur me BIM. TLS përdoret për fasadat dhe interiorët me saktësi milimetrike, ndërsa UAV mbulon çatitë dhe pjesët e vështira për t'u arritur. PLS ofron një kompromis për interiorët e mëdhenj dhe korridoret [23].

Përfitimet kryesore përfshijnë:

- krahasimin e gjendjes reale me projektin,
- monitorimin e progresit të ndërtimit,
- detektimin e devijimeve strukturore në kohë reale.

Siç paraqitet në tabelën 10, studimet bashkëkohore në fushën e dokumentimit të trashëgimisë kulturore kanë treguar se përdorimi i kombinuar i UAV, LiDAR dhe TLS ofron përfitime të ndërsjella në aspektin e saktësisë, detajit dhe mbulimit hapësinor.

TLS përdoret kryesisht për pjesët e brendshme dhe detajet strukturore të monumenteve, duke ofruar saktësi milimetrike dhe densitet shumë të lartë pikash [24] [23].

Në të kundërt, UAV fotogrametria siguron fleksibilitet më të madh operacional dhe lejon përfitim të imazheve nadirale dhe oblike për krijimin e ortofotove të fasadave dhe çative, me saktësi tipike $\pm 2\text{--}3$ cm [36].

LiDAR ajror, ndërkohë, përdoret për analiza topografike dhe mjedisore përreth monumenteve, duke mundur depërtim përmes vegjetacionit dhe krijimin e modeleve të sakta të terrenit (DTM) në zona me mbulim të dendur bimësor [41] [22].

Tabela 10 - Integrimi UAV–TLS–PLS në BIM (saktësia, koha, aplikimet).

Metoda / Integrimi	Saktësia (GMK tipike)	Koha e matjes në terren	Koha e përpunimit	Aplikimet kryesore në BIM	Avantazhet	Kufizimet
UAV	2–5 cm (RTK/PPK)	30–60 min për një objekt kompleks	2–4 orë	Ortofoto, modele 3D të jashtme (fasada, çati)	Kosto relativisht e ulët, Shpejtësi e lartë për fasada	Kufizime në fasada vertikale
TLS	3–6 mm (high-end), 1–2 cm (praktikisht)	3–6 orë për ndërtesë mesatare	5–10 orë	Modele shumë të sakta të fasadave dhe interiorit	Saktësi e lartë, E detajuar për analiza strukturore, E përshtatshme për BIM struktural	Kërkon shumë stacione, Koha e gjatë në terren
PLS	1–3 cm	30–60 min për interior të madh	2–3 orë	Modele të brendshme, korridore, tunele, interior arkitektonik	Shpejtësi shumë e lartë, Fleksibil për ambiente të ngushta, I përshtatshëm për përditësim BIM	Saktësi më e ulët se TLS, Gabime nga SLAM në hapësira të gjata pa referenca
Integrim UAV+TLS	1–2 cm	4–7 orë total	6–12 orë	Model i plotë 3D (jashtë + brenda) për BIM	Kombinon shpejtësinë e UAV me saktësinë e TLS, Rezultat optimal për monumentet e trashëgimisë kulturore dhe inxhinieri	Kosto dhe kohë më të larta
Integrim UAV+PLS	2–4 cm	1–2 orë	4–6 orë	Monitorim dhe përditësim i shpejtë BIM	Shumë efikas në terren, i përshtatshëm për ndërtesa të mëdha	Më pak i saktë se UAV+TLS
Integrim TLS+PLS	1–2 cm	2–4 orë	5–8 orë	Modele të detajuara strukturore dhe të brendshme	Përshtatshmëri për BIM struktural dhe menaxhim objekti	Kosto e lartë pajisjesh, Kërkon post-procesim më të gjatë

Nga krahasimi rezulton se çdo metodë ka rolin e vet: TLS garanton saktësi lokale shumë të lartë; UAV siguron mbulim të plotë dhe dokumentim vizual të pasur; ndërsa LiDAR kontribuon në vlerësimin e relievit dhe analizën volumetrike të strukturave. Kombinimi i të trejave në një proces të vetëm përpunimi — shpesh përmes integrimit me algoritme ICP ose AI-based registration — siguron modelim 3D të plotë dhe uniform, që mund të përdoret

për restaurim, konservim dhe ndërtim të bazave BIM për menaxhim afatgjatë të monumenteve.

Ky integrim është vërtetuar në studime të shumta ndërkombëtare të cilat tregojnë se metoda e kombinuar UAV–LiDAR–TLS arrin devijime mesatare nën ± 2 cm dhe besueshmëri të lartë gjeometrike edhe në struktura komplekse historike [48] [9].

Në përfundim, tabela 10 tregon qartë se metodat e integruara 3D përbëjnë bazën e qasjes moderne në dokumentimin e trashëgimisë kulturore, duke bashkuar saktësinë metrike të TLS, fleksibilitetin e UAV-ve dhe fuqinë analitike të LiDAR-it në një sistem të unifikuar për përfaqësim tredimensional dhe ruajtje digjitale të monumenteve.

2.7.4 Infrastruktura rrugore dhe hekurudhore

Një tjetër fushë e zhvilluar është përdorimi i UAV LiDAR për monitorimin e infrastrukturës rrugore dhe hekurudhore. LiDAR ofron mundësinë e profilizimit të saktë të terrenit, verifikimit të pjerrësive dhe vlerësimit të gjeometrisë së shtresave rrugore [32]. UAV është i dobishëm për ortofoto me rezolucion të lartë, ndërsa TLS përdoret për elementët strukturorë të stacioneve dhe platformave.

2.7.5 Përmbledhje dhe tendenca të ardhshme

Nga literatura rezulton se kombinimi i metodave është më i efektshëm se përdorimi i një metode të vetme. TLS ofron saktësi të lartë, UAV siguron mbulim të shpejtë, PLS është fleksibël për interior, ndërsa UAV LiDAR shquhet për penetrim dhe modelet e terrenit. Tendanca aktuale është drejt platformave hibride dhe integritit me AI dhe BIM, për të arritur një dokumentim më të shpejtë, më të saktë dhe më të plotë të objekteve inxhinierike.

Siç paraqitet në tabelën 11, studimet e literaturës mbi integrimin e metodave UAV, LiDAR dhe TLS në dokumentimin e strukturave historike komplekse tregojnë se çdo kombinim metodologjik sjell përfitime specifike në varësi të tipologjisë së objektit dhe kushteve të terrenit.

Integrimet e bazuara në UAV–TLS janë më të zakonshmet për monumente me fasada të larta dhe planimetri të kufizuar, ku UAV siguron mbulim të sipërfaqeve të jashtme ndërsa TLS regjistron detajet e brendshme me saktësi milimetrike [24]. Ky kombinim ofron balancë të mirë midis rezolucionit vizual dhe saktësisë metrike, duke reduktuar boshllëqet në zona vertikale dhe në pjesët e poshtme të strukturës.

Tabela 11 - Krahاسimi përfundimtar i metodave UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR në objekte inxhinierike.

Metoda	Saktësia (GMK tipike)	Densiteti i pikave (pikë/m²)	Koha e matjes në terren	Koha e përpunimit	Kosto relative	Përshtatshmëria në objekte inxhinierike
UAV fotogrametri	2–5 cm (me RTK/PPK)	100–300	30–90 min për ura/pallat e	2–5 orë	Mesatare	Monitorim i shpejtë i fasadave, çative, urave, Pamje e përgjithshme shumë e mirë
TLS	3–6 mm (laborator), 1–2 cm	2000–10,000	3–6 orë për ura ose ndërtesa	5–12 orë	Lartë	Modele shumë të sakta strukturore, Shumë i vlefshëm për analizë deformimesh
PLS	1–3 cm	500–3000	30–60 min për interior ose ura të vogla	2–4 orë	Mesatare	Shumë efikas për ambiente të brendshme, tunele, ura metalike, E mirë për inspektime periodike
UAV LiDAR	3–7 cm	300–1000 (në varësi të lartësisë)	30–60 min për urë/zonë infrastrukturore	4–6 orë	Shumë e lartë	Depërton në vegjetacion, Përdorueshëm për ura në mjedisë pyjore ose korridore infrastrukturore

Nga ana tjetër, integrimi UAV–LiDAR është i përshtatshëm për analiza topografike dhe dokumentim të komplekseve arkeologjike në terrene të mbuluara nga bimësia, pasi impulset LiDAR depërtojnë përmes kurorës së pyjeve për të regjistruar terrenin real.

Ky kombinim siguron përfaqësim të saktë të kontekstit mjedisor dhe ndihmon në vlerësimin e ndërveprimit të monumentit me relievin përreth [41] [22].

Integrimet më të avancuara tri-modale (UAV–LiDAR–TLS), ofrojnë modelim 3D të plotë, duke bashkuar saktësinë e TLS-it me densitetin e LiDAR-it dhe pamjet teksturale të UAV-ve [23].

Kjo qasje është veçanërisht efektive për objekte me gjeometri të ndërlikuar, si kështjella, amfiteatro ose struktura në terrene të pjerrëta, ku një metodë e vetme nuk do të mjaftonte për mbulim të plotë. Integrimi UAV–TLS mbetet zgjedhja më e balancuar për monumentet urbane, ndërsa UAV–LiDAR është më efikas për dokumentime mjedisore dhe komplekse të mëdha arkeologjike. Përdorimi i qasjeve hibride UAV–LiDAR–TLS shihet si drejtimi kryesor i kërkimit aktual, duke mundësuar modele të sakta, të integruara dhe plotësisht të ndërveprueshme në mjediset BIM dhe GIS.

3 MATERIALI DHE METODAT

3.1 Rasti i Studimit: Kalaja e Vilë Bashtovës

Kalaja e Vilë Bashtovës përfaqëson një nga monumentet më të rëndësishme të trashëgimisë kulturore shqiptare dhe njëkohësisht një sfidë të veçantë për studimet fotogrametrike dhe skanimin me lazer. E vendosur në një zonë fushore, rreth 20 km në jug të Durrësit, kjo kala mesjetare me planimetri drejtkëndëshe ruan mure të larta rreth 9 metra dhe kulla këndore që shërbenin për mbrojtje.



Figura 12 - Vendndodhja gjeografike e Kalasë së Vilë Bashtovës

Qëllimi kryesor i këtij rasti studimi është krahasimi i metodave moderne të matjes – Fotogrametria UAV, UAV LiDAR-i, dhe skanimi tokësor e portabël me lazer – për të analizuar saktësinë, densitetin e të dhënave dhe kostot në një objekt të vetëm kulturor. Ky rast është zgjedhur pasi përfaqëson një kompleksitet mesatar: mure të larta e të gjata, sipërfaqe të pjesshme me vegjetacion, dhe kulla me brendësi të kufizuar, të cilat kërkojnë kombinimin e teknikave të ndryshme për të arritur një modelim 3D sa më të plotë [30].

Në kontekstin e literaturës ndërkombëtare, përdorimi i kalave mesjetare si raste studimore është i zakonshëm. Për shembull, projekti i Katedrales së Salzburgut ka demonstruar

integrimin UAV–TLS për modelim të hollësishëm dhe verifikimin e devijimeve në rendin e centimetrave [32]. Po kështu, studime në Itali, Spanjë dhe Ballkan kanë treguar rëndësinë e integritetit të metodave për objekte historike me gjeometri komplekse [9]. Kalaja e Vilë Bashtovës shërben si një analog shqiptar, duke ofruar mundësinë për të testuar këto metodologji në kushte reale.

Dokumentimi i saktë i këtyre elementeve është thelbësor për ruajtjen dhe menaxhimin e mëtejshëm të monumentit.

3.1.1 Historiku dhe Analiza Arkitekturore

Kalaja e Vilë Bashtovës përmendet për herë të parë në vitin 1521 në një hartë të përpiluar nga Piri Reis, e cila bënte pjesë në një manual praktik të përdorur nga ushtarët osmanë. Në këtë dokument, fortifikimi shënohet me emrin Pastov, sipas transkriptimit nga turqishtja në gjermanisht [49]. Më vonë, në hartën e Kamoziot të vitit 1571, kalaja përmendet me emërtimin Basti, duke dëshmuar vazhdimësinë e saj si strukturë strategjike në bregun e Shkumbinit.

Burimi më i hershëm që jep të dhëna të detajuara mbi ndërtimin dhe funksionin e kalasë është udhëtari turk Evlia Çelebiu, i cili përmend se ajo u themelua fillimisht nga venedikasin dhe u pushtua më vonë nga osmanët gjatë fushatës së Sulltan Mehmetit II për pushtimin e Shkodrës në vitin 1478. Sipas përshkrimit të tij, pas marrjes nën kontroll, turqit kryen punime përshtatëse në strukturë, duke kthyer disa nga kullat në ambiente banimi për garnizonin dhe duke ndërtuar një xhami të vogël mbi portën hyrëse – punime që u përfunduan para vitit 1521 [50].

Fortifikimi besohet se është ngritur në fund të shekullit XV, në një periudhë të tensionuar politike, kur Republika e Venedikut kërkonte të mbronte bregdetin shqiptar nga ekspansioni osman. Ndërtimi i kalasë pas rindërtimit të kështjellës së Elbasanit më 1466 lidhet me përpjekjen për të ruajtur kontrollin strategjik mbi derdhjen e lumit Shkumbin dhe mbi rezervat pyjore të pasura të zonës, të cilat përdoreshin për ndërtimin e anijeve dhe për furnizimin e flotës detare [51] [52].

Në shekullin XVII, sipas burimeve osmane, Bashtova vazhdonte të funksiononte si kështjellë garnizoni, ndërsa gjatë periudhës që pasoi, u krye rindërtimi i murit perëndimor, i cili ishte dëmtuar nga vërshimet e Shkumbinit. Në shekullin XIX, J. G. von Hahn, në veprën e tij Studime Shqiptare, e përshkruan kështjellën si një strukturë të ndërtuar “në stil frank”, me kulla të rrënuara dhe mbishkrime osmane mbi portat hyrëse. Ai përmend gjithashtu praninë e një varreze të vjetër pranë hyrjes veriore, ku gjendeshin fragmente arkitektonike bizantine dhe stela varresh antike, që dëshmojnë për ekzistencën e një vendbanimi të hershëm në atë zonë [53].

Vendndodhja e kalasë është strategjike dhe zgjedhur: ndodhet rreth 20 km në veri-perëndim të Lushnjës, 15 km në jug të Kavajës, 36 km në veri të Fierit dhe 40 km në jug-perëndim të Tiranës, pranë derdhjes së lumit Shkumbin. Ajo përbën kështjellën e vetme në Ballkan të ndërtuar në një fushë, gjë që i jep rëndësi të veçantë historike dhe arkitektonike [52].

Nga pikëpamja arkitektonike, Kalaja e Bashtovës ka planimetri drejtkëndëshe me përmasa të brendshme afërsisht 60×75 m siç tregohet në figurën 13. Në çdo qoshe, si dhe në mesin e tre mureve kryesore, ngrihen kulla mbrojtëse, me përjashtim të murit perëndimor që i përket një faze të mëvonshme ndërtimi (rindërtim osman në shek. XVIII).

Muret, me trashësi rreth 1 metër, janë ndërtuar me gurë ranorë dhe copa tullash, të lidhura me llaç gëlqereje dhe me breza druri horizontalë për forcim kundër dridhjeve dhe shembjeve. Brenda mureve ndodhet një sistem harqesh të mbështetur në pilastra drejtkëndorë, mbi të cilat kalonte shtegu i rojeve. Lartësia e mureve me gjithë bedenat arrinte deri në 9 metra, ndërsa kullat e qosheve, me lartësi deri në 12 metra, ndaheshin në katër ose pesë nivele me dysheme druri dhe frëngji të vendosura në dy katet e poshtme. Kullat



Figura 13 - Skema e perimetrit të kalasë me dimensione kryesore.

kanë formë rrethore, ndërsa ato ndërmjet mureve janë katërkëndëshe. Disa prej tyre janë të hapura nga ana e brendshme për t'u përdorur në raste lufte dhe komunikojnë përmes shkallëve guri me shtegun e rojeve. Muret me trashësi 1.25–1.40 m ofronin mbrojtje të mjaftueshme ndaj armëve të kohës, megjithëse konstruksioni tregon për ndërtim të shpejtë dhe ekonomik, siç vihet re nga përdorimi i materialeve të përziera dhe nga kullat me “kurriz të hapur”, më pak rezistente ndaj sulmeve artilerike [52].

Kalaja kishte tre hyrje kryesore: një në murin verior, një tjetër në murin lindor, dhe një të tretë në murin perëndimor (e shtuar gjatë periudhës osmane). Portat përbëheshin nga arkitra guri me hapësirë drite rreth 2.70 m, ndërsa disa u mbyllën në faza të mëvonshme ndërtimi. Nga ana funksionale, kështjella ka pasur karakter tipik garnizoni, pa hapësira të brendshme banimi të përhershme. Ambientet brenda kullave kanë shërbyer për strehim ushtarësh, ruajtje municionesh dhe pika vrojtimi. Vetëm në periudhën osmane disa prej tyre janë përshtatur për banim të kufizuar, me ndërtim oxhakësh të thjeshtë.

Në planin ndërtimor, struktura shfaq ngjashmëri me kështjellat e tjera veneciane të Adriatikut lindor, megjithëse ndërtimi i saj duket më i thjeshtë, me mure më të holla dhe me përdorim të theksuar të elementeve mbajtëse të drurit. Kjo sugjeron se Bashtova është ngritur me urgjencë ushtarake, për t'iu përshtatur rrethanave të një konflikti të afërt. Arkitektura, teknika e ndërtimit dhe materialet e përdorura tregojnë për një fortesë me funksion mbrojtës të përkohshëm, por me rëndësi strategjike të madhe për kontrollin e luginës së Shkumbinit dhe për ruajtjen e lidhjeve detare të Venedikut me Durrësin dhe Vlorën [51] [49].

Në përfundim, Kalaja e Vilë Bashtovës u zgjodh si objekt studimi për shkak të karakterit të saj unik arkitektonik dhe pozicionit strategjik. Pozicioni i hapur fushor, mungesa e mbrojtjes natyrore dhe dëmtimet e pjesëshme në muret veriore e perëndimore e bëjnë këtë

objekt ideal për vlerësimin krahasues të metodave UAV, TLS dhe LiDAR, me qëllim dokumentimin e strukturave historike në kushte të ndryshme terreni [24] [22].

3.2 Procesi i matjeve në terren

Në këtë kapitull, do të shqyrtohen teknikat e përdorura për mbledhjen e të dhënave gjatë rilevimit të objekteve inxhinierike si Kalaja e Vilë Bashtovës. Do të fokusohemi në markimin e bazës gjeodezike dhe pikave të kontrollit, duke përfshirë rrjetin gjeodezik lokal dhe kompensimin e tij, përdorimin e pikave GCP, dhe vendosjen e markave në fasadën e objektit. Këto janë hapa të rëndësishëm që sigurojnë saktësinë dhe cilësinë e të dhënave të mbledhura, të cilat janë thelbësore për krijimin e modeleve të sakta dhe për analizën e mëtejshme.

3.2.1 Krijimi i rrjetit gjeodezik lokal

Në këtë fazë u ngrit rrjeti gjeodezik lokal, i cili shërbeu si bazë referimi për të gjitha matjet UAV, TLS dhe LiDAR. Rrjeti përbëhej nga gjashtë pika të vendosura në formë poligoni të mbyllur rreth perimetrit të Kalasë së Vilë Bashtovës, duke përfshirë një stacion bazë (SB) dhe pesë pika stacionare (ST1–ST5). Ky rrjet u projektua si kombinim i teknologjive GNSS dhe total station, për të garantuar saktësi të lartë dhe mbulim të plotë në një mjedis me ndërhyrje të pjesshme satelitore. Stacioni bazë (SB) u pozicionua në një pikë të qëndrueshme dhe të hapur në afërsi të hyrjes jugore të kalasë, ku u instalua një marrës GNSS Trimble R12i që funksiononte në mënyrë të pandërprerë gjatë gjithë fushatës së matjeve. Ky marrës regjistroi të dhënat e lëvizjeve satelitore në modalitet statik absolut, duke siguruar koordinata të qëndrueshme referimi në sistemin ETRS89/Albania TM 2010. Roli i këtij stacioni ishte të shërbente si bazë aktive për kompensimin e matjeve të kryera nga total station, si dhe si pikë lidhjeje me rrjetin kombëtar ALBCORS, për korrigjime diferenciale dhe kontroll vertikal.



Figura 14 - Pajisja GNSS gjatë procesit të matjeve

Matjet e pesë pikave të tjera të rrjetit (ST1–ST5) u kryen me instrument total station Leica TS16, duke realizuar një poligon të mbyllur që përfshinte të gjithë perimetrin e kalasë. Pikat u vendosën në pozicione të qëndrueshme dhe të dukshme ndërmjet tyre, duke krijuar lidhje të drejtpërdrejta vizuale me stacionin bazë. Distancat horizontale dhe këndet horizontale/vertikale u matën me shumëfish përsëritjesh, për të siguruar saktësi të lartë në përcaktimin e koordinatave. Kjo metodë u zgjodh për të mundësuar mbulim të plotë edhe në pjesët e brendshme të kalasë ku sinjali GNSS ishte i kufizuar, duke përfituar kështu përparësitë e të dy teknologjive.

Pas përfundimit të matjeve, të dhënat u përpunuan në Leica Infinity dhe Trimble Business Center (TBC). Fillimisht u aplikuan korrigjimet diferenciale për koordinatat e stacionit

bazë, të cilat u përdorën më pas për transferimin e referencës absolute në pikat ST1–ST5 përmes matjeve me total station. Kompensimi i rrjetit u krye përmes metodës së katrorëve më të vegjël, duke u siguruar që gabimet e mbylljes të jenë minimale në drejtim planimetrik dhe naltimetrik. Nga rezultatet e kompensimit, rrjeti arriti një saktësi horizontale mesatare ± 1 cm dhe vertikale ± 2 cm, çka tregon stabilitet të lartë dhe përpunje me standardet e klasës së parë për rrjete inxhinierike [14].

Koordinatat e përfituara për çdo pikë të rrjetit, së bashku me gabimet mesatare kuadrato, janë paraqitur në tabelën 12, ku vërehet shpërndarja uniforme e gabimeve dhe saktësia e rezultateve. Pika SB (stacioni bazë) paraqet vlera më të qëndrueshme, pasi është përcaktuar përmes matjeve statike, ndërsa pikat ST1–ST5 janë llogaritur nëpërmjet rrjetit të mbyllur të matjeve me total station.

Tabela 12 - Rezultatet e kompensimit të rrjetit gjeodezik lokal (GNSS + Total Station)

Pika	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_{plan} (cm)	$\sigma_{\text{lartësi}}$ (cm)	GMK (cm)
ST1	4545886.733	457586.649	3.288	± 0.7	± 1.1	1.3
ST2	4545820.850	457671.1153	3.226	± 0.8	± 1.0	1.4
ST3	4545862.072	457711.5144	3.211	± 0.6	± 1.2	1.3
ST4	4545910.326	457771.6409	3.253	± 0.7	± 1.3	1.5
ST5	4546002.177	457673.9727	3.322	± 0.9	± 1.2	1.6
SB	4545935.639	457619.587	3.283	± 0.8	± 1.1	1.4

Të dhënat e tabelës tregojnë se rrjeti është kompensuar me sukses dhe ruan simetri në gabimet planimetrike e naltimetrike. Në figurën 15 paraqitet shpërndarja hapësinore e rrjetit gjeodezik lokal, ku pikat ST1–ST5 janë të vendosura në mënyrë rrethore përreth mureve të kalasë. Ky konfigurim përfaqëson një rrjet hibrid të tipit GNSS–TPS, që shërben si bazë absolute për të gjitha matjet UAV dhe TLS të kryera në zonë.

Struktura e tillë e rrjetit ka disa avantazhe të dukshme. Së pari, siguron saktësi, duke mos e varur gjithë sistemin nga një pikë e vetme. Së dyti, kombinimi i GNSS dhe total station lejon përcaktim të saktë në mjedise të kufizuara, ku sinjali satelitor është i pjesshëm. Së treti, konfigurimi i mbyllur poligonal mundëson kontroll të brendshëm të gabimeve dhe llogaritje të mbylljeve gjeometrike që rrisin besueshmërinë e rrjetit [24]. Si rezultat, ky rrjet siguron një referencë uniforme, të përsëritshme dhe me saktësi centimetrike, mbi të cilën



Figura 15 - Rrjeti gjeodezik lokal i ngritur rreth Kalasë së Bashtovës (GNSS + Total Station)

mbështeten të gjitha produktet e mëvonshme të projektit — nga ortomozaikët e UAV, deri te modelet 3D të skanuara me TLS dhe LiDAR. Në përfundim, ngritja e rrjetit gjeodezik lokal hibrid (GNSS + Total Station) në Vilë Bashtovë përbën një komponent themelor të gjithë procesit të matjeve dhe integritit të të dhënave. Ai garanton stabilitet koordinativ absolut, saktësi të lartë dhe koherencë ndërmetodike, duke e kthyer rrjetin në një infrastrukturë gjeodezike të përhershme për monitorimin e ardhshëm të monumentit.

3.2.2 Pikat e kontrollit tokësor (GCP)

Për të garantuar orientim absolut dhe saktësi të lartë në procesin e fotogrametrisë UAV, u vendosën dhe u matën një seri pikash kontrolli tokësor (GCP), të cilat shërbyen si elemente referimi midis sistemit gjeodezik lokal dhe imazheve ajrore të përfituara.

Në këtë studim u përdorën gjithsej pesë (5) GCP, të shpërndara rreth mureve dhe brendësisë së Kalasë së Vilë Bashtovës, në mënyrë që të sigurohej një shpërndarje e ekuilibruar në planimetri dhe lartësi. GCP-të ishin me përmasa 60×60 cm me ngjyrë të verdhë dhe të zezë, për të garantuar kontrast të lartë vizual në imazhet nadirale dhe oblike të UAV-ve, sipas praktikave të rekomanduara ndërkombëtare [36].

Matjet e GCP-ve u realizuan me marrës GNSS Trimble R12i në modalitet RTK FIX, të lidhur përmes shërbimit ALBCORS, duke marrë korrigjime në kohë reale. Koordinatat u llogaritën dhe u kompensuan në raport me rrjetin gjeodezik lokal të përshkruar në nënkapitullin 3.2.1, duke siguruar lidhje të drejtpërdrejtë midis sistemit global ETRS89/Albania TM 2010 dhe sistemit lokal të projektit. Kjo procedurë e kombinimit GNSS RTK me rrjetin e kompensuar në terren garantoj koherencë hapësinore absolute ndërmjet pikave GCP dhe produkteve UAV-TLS, si dhe reduktim të gabimeve GMK nën ± 2 cm [35].

Figura 16 paraqet shpërndarjen e GCP-ve në perimetrin e kalasë, duke treguar se katër pika janë pozicionuar në skajet kryesore dhe një në qendër, për të mundësuar kontroll të plotë të deformimeve dhe për të mbuluar gjithë zonën e interesit.

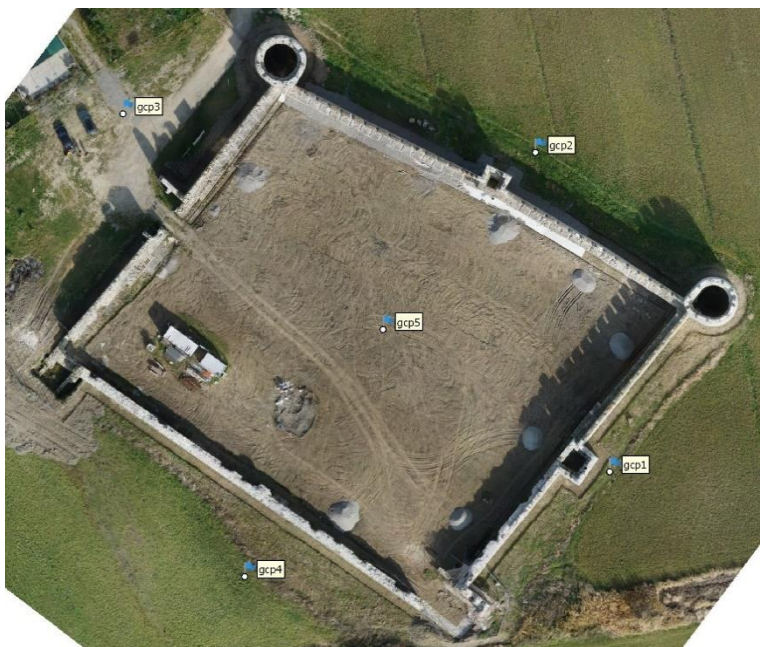


Figura 16 - Skema e shpërndarjes të pikave GCP rreth kalasë

Siç tregohet në figurën 17, pikat janë identifikuar qartë në imazhet ajrore të marra nga UAV-të, duke u përdorur më pas si referenca në procesin e triangulacionit ajror gjatë përpunimit në Pix4Dmapper dhe Agisoft Metashape.

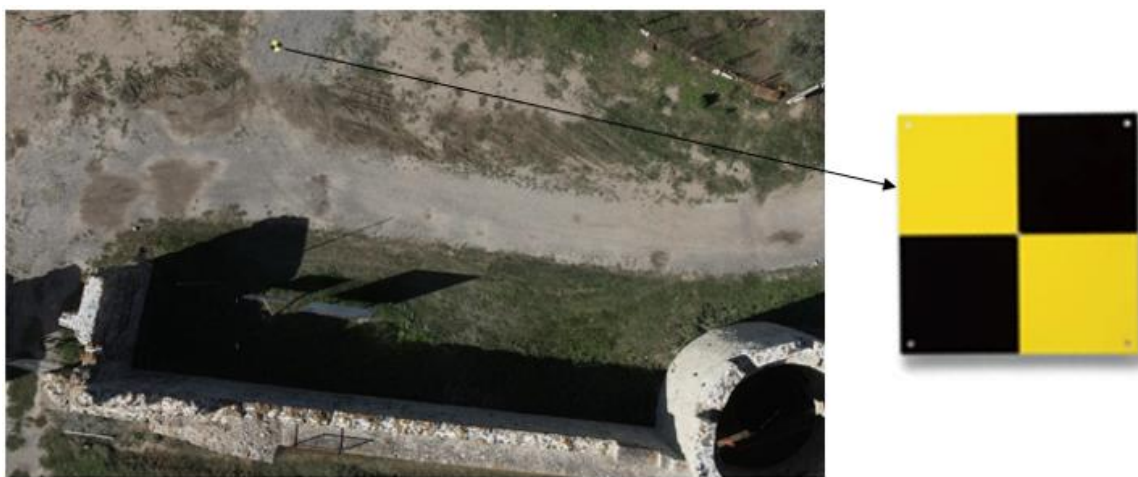


Figura 17 - a)Pika GCP të identifikuara në fotografi ajrore, b)Tipi i GCP-ve të përdorura

Koordinatat e GCP-ve janë përfshirë në tabelën 13, ku për secilën pikë jepen koordinatat absolute X, Y dhe H në sistemin ETRS89 / Albania TM 2010, të llogaritura me saktësi ± 1.5 cm. Këto vlera përbëjnë referencën për llogaritjen e devijimeve të modeleve 3D dhe ortomozaikëve, si dhe për validimin e integritetit të metodave UAV-TLS-LiDAR.

Tabela 13 - Koordinatat e pikave të kontrollit tokësor (GCP)

GCP	X (m)	Y (m)	H (m)
1	4545881.829	457710.367	3.474
2	4545937.371	457697.870	3.246
3	4545944.403	457626.342	3.224
4	4545864.029	457647.027	3.012
5	4545906.751	457671.135	3.491

Pikat GCP shërbyen në mënyrë të dyfishtë: (1) për orientimin e jashtëm absolut të bllokut fotogrametrik gjatë procesit të triangulacionit ajror dhe (2) për verifikimin e saktësisë përfundimtare të produkteve ortofotografike dhe modeleve 3D. Në fazën e përpunimit, GCP-të u përdorën si “pika lidhëse” me peshë të lartë në algoritmin e Bundle Adjustment, duke reduktuar gabimet në më pak se 2 cm në zonat e interesit. Krahës tyre, përdorimi i koordinatave RTK të kamerave UAV ka kontribuar në uljen e nevojës për shumë GCP, duke krijuar një ekuilibër midis kohës në terren dhe saktësisë përfundimtare [14].

Në përfundim, sistemi i GCP-ve i bazuar në rrjetin gjeodezik lokal siguroi stabilitet gjeometrik dhe referencim të unifikuar midis të gjitha produkteve UAV–TLS–LiDAR. Shpërndarja strategjike e pikave, kompensimi me metoda RTK dhe verifikimi në bazë të modeleve 3D garantuan që gabimet mesatare kuadratike të mbeteshin brenda vlerave të standardeve të ISPRS (± 2 cm në plan dhe ± 3 cm në lartësi). Kjo e bën rrjetin e GCP-ve një komponent të domosdoshëm për gjeoreferencimin e saktë të modeleve dixhitale të krijuara në kuadër të këtij projekti [36] [35].

3.2.3 Vendosja e pikave të kontrollit në fasada

Për nevojat e integritetit dhe kontrollit të saktësisë absolute midis metodave UAV, TLS dhe LiDAR, në fasadat e Kalasë së Vilë Bashtovës u vendos një grup pikash kontrolli të pavarura, të quajtura Check Points (CP). Këto pika nuk ishin targeta reflektuese klasike, por letra adesive 20×20 cm me ngjyrë të bardhë dhe qendër të shënuar me kryq të zi, të ngjitura direkt në sipërfaqet e muraturës. Përzgjedhja e këtij formati u bë për të siguruar kontrast të lartë vizual në skanime dhe në fotografitë ajrore, duke ruajtur gjithashtu integritetin estetik të monumentit.

Në total u vendosën 22 pika kontrolli (CP), të shpërndara në mënyrë strategjike në të katër fasadat e jashtme të kalasë dhe në disa pika karakteristike të brendshme, me qëllim që të mbulonin të gjitha drejtimet horizontale dhe vertikale të objektit. Vendosja u projektua në mënyrë që çdo pikë të ishte e dukshme nga të paktën dy stacione skanimit TLS dhe një kënd fluturimi UAV, duke mundësuar identifikim të qartë në të gjitha bazat e të dhënave.

Këto pika shërbyen si pika të pavarura verifikimi për të krahasuar koordinatat e matura në terren me koordinatat e nxjerra nga reja e pikave të secilës metodë, duke mundësuar vlerësim të drejtpërdrejtë të saktësisë absolute të produkteve përfundimtare.

Matjet e CP-ve u kryen me total station Leica TS16, në lidhje të plotë me rrjetin gjeodezik lokal të kompensuar (nënkapitulli 3.2.1). Për çdo pikë u matën distancat horizontale dhe vertikale nga pika bazë SB (stacioni GNSS aktiv), dhe u llogaritën koordinatat absolute në sistemin ETRS89 / Albania TM 2010. Kompensimi përfundimtar i këtyre matjeve u krye në Leica Infinity, ku u analizuan gabimet e mbylljeve dhe u verifikua stabiliteti i rrjetit. Nga rezultatet, u arrit një saktësi mesatare ± 2 mm në plan dhe ± 3 mm në lartësi, duke garantuar cilësi të lartë për përdorim në analizat e krahasimit.

Në figurën 18 paraqitet shpërndarja e pikave CP në fasadat e kalasë. Siç shihet, ato janë të vendosura në mënyrë të rregullt rreth strukturës, duke mbuluar qoshet, hapjet dhe pjesët me ndërlikim gjeometrik. Ky shpërndarje e bën të mundur që çdo metodë (UAV, TLS, LiDAR) të kontrollohet në të njëjtat kushte gjeometrike dhe të eliminohet efekti i pozicionimit jo uniform.



Figura 18 - Skema e shpërndarjes së markave në fasadën e kalasë

Në Tabelën 14 jepen koordinatat e përfituara për 22 pikat CP, të cilat përfaqësojnë referencën absolute për krahasim me produktet e metodave UAV, TLS dhe LiDAR. Për secilën pikë janë dhënë koordinatat X, Y dhe Z, të përfituara pas kompensimit në rrjetin gjeodezik lokal.

Tabela 14 - Koordinatat e targetave të kontrollit

Nr i markes	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP 1	4545893.844	457612.821	4.824
CP 2	4545860.564	457673.600	4.933
CP 3	4545908.395	457617.926	4.591
CP 4	4545918.458	457626.765	4.714
CP 5	4545933.628	457639.370	4.775
CP 6	4545944.687	457648.181	4.757
CP 7	4545956.468	457650.128	5.289
CP 8	4545957.049	457656.179	4.987
CP 9	4545948.395	457657.710	4.891
CP 10	4545936.578	457681.246	4.826
CP 11	4545934.257	457691.563	4.848
CP 12	4545927.399	457698.603	4.948
CP 13	4545913.166	457721.442	4.767
CP 14	4545914.613	457731.105	4.747
CP 15	4545907.711	457722.919	8.118
CP 16	4545872.001	457693.319	8.010
CP 17	4545865.602	457688.030	7.672
CP 18	4545862.417	457685.515	8.457
CP 19	4545922.412	457631.640	6.569
CP 20	4545937.714	457677.177	8.848
CP 21	4545888.005	457705.525	9.152
CP 22	4545882.861	457643.448	4.762

Të gjitha këto pika u përdorën më pas në fazën e verifikimit të saktësisë absolute të reve të pikave. Për çdo dataset (UAV, TLS, LiDAR), në CloudCompare u identifikuan koordinatat përkatëse të CP-ve dhe u përlogaritën devijimet 3D midis matjeve tokësore dhe atyre të nxjerra nga modelet dixhitale. Për secilën metodë u krijua një tabelë devijimesh me komponentët ΔX , ΔY dhe ΔZ , nga të cilat u përftua gabimi mesatar kuadratik si tregues i saktësisë absolute.

Në figurën 19 tregohet tipi i markave të vendosura në fasadën e objektit dhe identifikimi i tyre në retë e pikave të përftuara me metodat fotogrametrike.

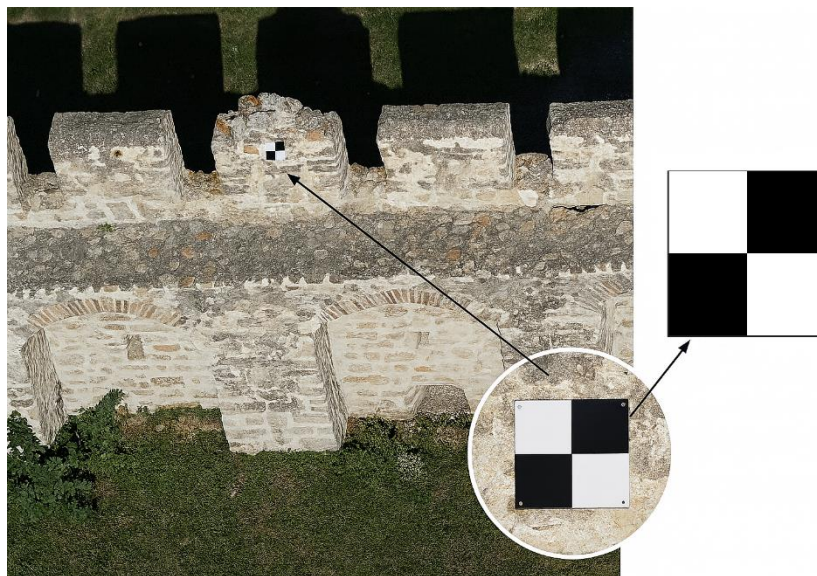


Figura 19 - Markat e vendosura në fasadë të identifikuar në foto ajrore

Rezultatet paraprake të krahasimit treguan se devijimet mesatare midis koordinatave të matura dhe atyre të nxjerra nga modelet UAV ishin ± 1.9 cm në plan dhe ± 2.7 cm në lartësi, ndërsa për TLS dhe LiDAR varionin nga ± 1.5 cm deri ± 2.2 cm, në varësi të densitetit të pikave dhe cilësisë së reflektimit. Këto vlera përputhen me kufijtë e saktësisë të pranuar ndërkombëtarisht për dokumentimin 3D të monumenteve historike [47] [44].

Nëpërmjet kësaj metodologjie u siguria krahasim i drejtpërdrejtë i metodave dhe verifikim numerik i modeleve të përfutuara nga secila teknologji, duke garantuar koherencë të plotë gjeometrike në produktet përfundimtare të projektit.

Në përfundim, përdorimi i pikave CP të matura në terren dhe të kompensuara në rrjetin gjeodezik lokal përbën një nga elementet më të rëndësishëm të kontrollit të cilësisë. Ato mundësuan validim të pavarur dhe të saktë të integritetit UAV–TLS–LiDAR, si dhe krijuan një rrjet të qëndrueshëm pikash referimi që mund të përdoret në matje të përsëritura në të ardhmen për monitorim të deformimeve strukturore të Kalasë së Bashtovës.

3.3 Mbledhja e të dhënave

3.3.1 Fotogrametria UAV

Mbledhja e të dhënave fotogrametrike ajrore u realizua duke përdorur katër platforma UAV me teknologji të ndryshme sensoriale dhe pozicionimi: DJI Phantom 4 RTK, DJI Matrice 300 RTK (me Zenmuse P1), DJI Matrice 4E, dhe V-Map Aerial System. Përfshirja e katër dronëve kishte për qëllim të vlerësohej performanca e secilës platformë në kushte të njëjta operative, për të garantuar që produktet fotogrametrike të krijuara të kishin saktësi dhe koherencë të lartë hapësinore në raport me rrjetin gjeodezik lokal të ngritur më parë.

Të gjitha fluturimet u kryen në lartësi 50 metra mbi nivelin e terrenit, me shpejtësi mesatare 3 m/s dhe mbivendosje frontale dhe anësore përkatësisht 80% dhe 70%. Kushtet e motit

gjatë fluturimeve ishin të qëndrueshme (erë nën 3 m/s dhe ndriçim uniform), për të shmangur devijimet në ekspozim dhe për të siguruar ndriçim konstant në të gjitha fasadat e kalasë. Pozicionimi i të gjitha platformave u krye në modalitet RTK FIX, përmes lidhjes me rrjetin ALBCORS, çka garantoj saktësi centimetrike në koordinatat e qendrave të ekspozimeve.

DJI Phantom 4 RTK u përdor kryesisht për fluturimet nadirale dhe krijimin e ortofotos, duke u fokusuar në mbulimin e sipërfaqeve të sipërme dhe relievit rrethues të kalasë. Falë sensorit CMOS 1" (20 MP) dhe integritetit RTK të brendshëm, ky sistem siguroi mbledhje të qëndrueshme të imazheve me pozicionim absolut dhe rezolucion hapësinor të lartë. DJI Matrice 300 RTK me sensorin Zenmuse P1 (45 MP, full-frame) u përdor për fluturimet oblik në kënde 45°, me qëllim që të realizohej dokumentimi i fasadave vertikale dhe strukturave anësore. Ky sistem, përmes algoritmit të “double grid oblique”, mundësoi mbivendosje të plotë midis imazheve dhe rikonstrukcion të saktë të pjesëve të kalasë që nuk shiheshin nga pamja vertikale [14].

Në vijim, për krahasim teknologjik u përdor edhe DJI Matrice 4E, i cili operoi në të njëjtën lartësi 50 m dhe me të njëjtin model fluturimi “double grid”. Ky sistem siguroi mbledhje të shpejtë të të dhënave, me performancë të qëndrueshme për dokumentim planimetrik, ndonëse me densitet më të ulët pikash për shkak të sensorit standard CMOS dhe mbivendosjes më të kufizuar të imazheve [22].

Së fundmi, V-Map Aerial System, një platformë e avancuar me sistem të integruar IMU + GNSS për gjeoreferencim të drejtpërdrejtë, u përdor për misione të shpejta 2D me qëllim testimi të efikasitetit të orientimit automatik të imazheve. Ky sistem, ndonëse nuk përdori GCP shtesë, arriti të sigurojë saktësi të lartë përmes kombinimit të sensorëve të pozicionimit dhe të dhënave inerciale. Në figurën 20 paraqitet planifikimi i misionit me dronin V-Map Aerial systems dhe grafiku i sinjalit GNSS në momentin e fluturimit të tij.

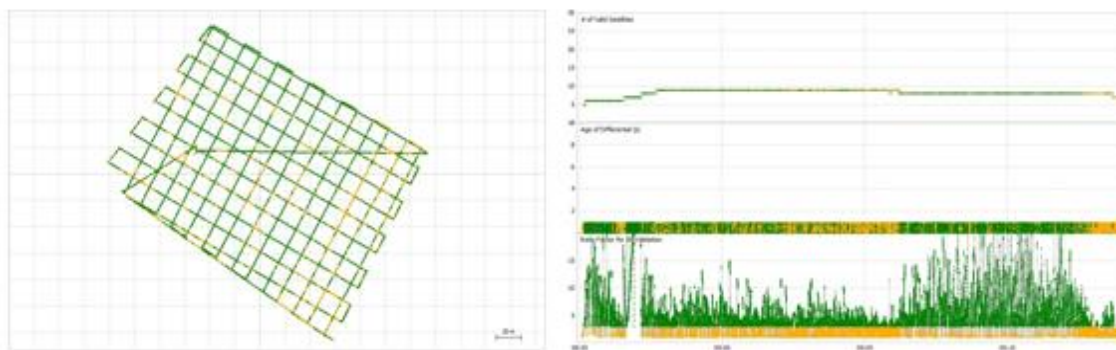


Figura 20 - a) Planifikimi i misionit me V-Map Aerial System, b) Sinjali dhe numri i satelitëve të dronit në momentin e fluturimit

Fluturimet u planifikuan përmes DJI GS RTK, DJI Pilot 2 dhe V-Map Planner, ndërsa përpunimi fotogrametrik u realizua në Pix4D Mapper dhe Agisoft Metashape, ku u aplikuan hapat standardë të kalibrimit të kamerës, orientimit të imazheve, krijimit të rrjetit të pikave lidhëse dhe ndërtimit të reve të dendura dhe modeleve DSM.

Produktet përfundimtare për secilën platformë përfshijnë ortomozaikët, retë e pikave dhe modelet digjitale të sipërfaqes, të cilat do të përdoren në fazën e integritimit dhe krahasimit të saktësisë së metodave në kapitullin 4.



Figura 21 - Planifikimi i misonit oblik me 5 misione të ndryshme

Përlllogaritja e GSD u krye sipas formulës [2]:

$$GSD = \frac{H * p}{f} \quad \text{Ek. 15}$$

ku H është lartësia e fluturimit, p madhësia e pikselit në sensor (μm), dhe f gjatësia fokale e kamerës.

3.3.2 Skanimi me Lazer Tokësor (TLS)

Dokumentimi tridimensional i Kalasë së Vilë Bashtovës në terren u realizua duke përdorur teknologjinë e skanimit tokësor me lazer (TLS), me qëllim krijimin e një modeli të saktë hapësinor të fasadave dhe elementeve arkitektonike që nuk mund të mbuloreshin në mënyrë optimale me fotogrametrinë ajrore. TLS përbën një ndër metodat më të avancuara për matje pa kontakt, pasi ofron densitet shumë të lartë të pikave dhe saktësi milimetrike në distanca relativisht të mëdha. Në këtë studim u përdorën dy pajisje të ndryshme por komplementare: FARO Focus S70 dhe Leica BLK360 G1, për pjesët e brendshme dhe zonat e kufizuara ku shikueshmëria ishte më e reduktuar. Kombinimi i këtyre dy pajisjeve lejonte një dokumentim të plotë volumetrik, duke mbuluar si sipërfaqet e gjera të mureve mbrojtëse ashtu edhe hapësirat e brendshme të kalasë, duke ruajtur të njëjtën saktësi gjeometrike.

Matjet u kryen në kushte të qëndrueshme atmosferike, në orët e paradites (09:00–11:00), kur ndriçimi ishte uniform dhe nuk krijonte kontraste të forta në sipërfaqet e gurit. Para nisjes së skanimeve, u hartua një plan pozicionimi i stacioneve, i cili përfshinte pesë pozicione për skanimin e jashtëm dhe dy për atë të brendshëm, të shpërndara në mënyrë që të sigurohej mbulim i plotë i strukturës. Stacionet u përzgjedhën në bazë të shikueshmërisë dhe vijueshmërisë gjeometrike ndërmjet tyre, duke ruajtur distanca optimale nga fasadat

prej 20–30 metrash për skanerin FARO dhe 8–12 metra për Leica BLK360. Për çdo stacion u vendosën targeta reflektues me diametër 145 mm në lartësi 1.5–2.0 m, të matura me total station në rrjetin gjeodezik lokal. Kjo lejoi që çdo skanim të kishte referencim absolut në sistemin ETRS89 / Albania TM 2010, duke e bërë më të lehtë regjistrimin dhe integrimin me modelet UAV dhe LiDAR në fazat pasuese.

Skaneri FARO Focus S70 u përdor për pjesën më të madhe të dokumentimit të jashtëm dhe të brendshëm. Ai operon sipas parimit të Time-of-Flight (ToF), ku një rreze lazer dërgohet drejt objektit dhe matet koha e rikthimit të saj për të llogaritur distancën. Kjo teknologji siguron precizion ± 1 mm në distanca nën 25 m dhe mundëson mbledhjen e deri në 976 000 pikash për sekondë.

Gjatë skanimit, për çdo pozicion u vendos rezolucioni që siguronte pikë çdo 4–5 mm në 10 m distancë, duke garantuar densitet të lartë për pjesët e fasadave me relief të theksuar. Secili stacion kërkonte rreth 8–10 minuta për përfundimin e skanimit, përfshirë regjistrimin automatik të panoramës sferike RGB, e cila ndihmon më vonë në ndërtimin e modeleve të teksturuara. Në fund të çdo skanimi u verifikua vizualisht mbulimi i plotë i fasadës në ekranin e instrumentit dhe në rast se konstatohej ndonjë zonë e paplotësuar, u realizua një ri-skanim plotësues.

Për skanimin e pesë stacioneve të jashtme me FARO Focus S70, koha totale e skanimit në terren zgjati rreth 45 minuta, duke përfshirë stacionimin, vendosjen e targetave dhe ruajtjen e të dhënave në formatin origjinal .fls. Për pjesët e brendshme dhe zonat me akses të kufizuar, u përdor Leica BLK360 G1, një skaner ultra-kompakt i përshtatshëm për mjedise të ngushta dhe objekte me ndriçim të kufizuar. Ky instrument funksionon me teknologjinë Phase-Shift, duke ofruar precizion ± 3 mm në distanca deri në 30 m dhe regjistrim të shpejtë deri në 360 000 pika për sekondë. Pajisja është e pajisur me kamerë panoramike 360° dhe me tre sensorë lazer të integruar, që realizojnë një skanim të plotë me ngjyra në më pak se 5 minuta.

BLK360 u përdor në dy pozicione të brendshme të kalasë, për të dokumentuar muret rrethuese dhe harkadat e hapësirave të brendshme të ruajtura. Kjo pajisje lidhet përmes tabletës Leica Cyclone Field 360, që mundëson regjistrimin automatik të skanimeve në kohë reale, duke reduktuar ndjeshëm kohën e matjeve në terren. Pozicionet u zgjodhën në mënyrë që të sigurohej mbivendosje me skanimet e jashtme të FARO-s nëpërmjet targetave të përbashkët, duke lejuar më pas integrim të drejtpërdrejtë në një model të vetëm. Në figurën 22 tregohet momenti i skanimit të brendshëm të kalasë me skanerin Faro S70.



Figura 22 - Skanimi me Faro Focus S70 i kalasë

Për regjistrimin u përdorën targeta reflektues dhe metoda e Pikës më të Afërt Iterative (ICP) [18]. Të dy pajisjet regjistruan jo vetëm distancat, por edhe intensitetin e reflektimit të dritës dhe ngjyrën RGB të çdo pike, të cilat shërbejnë më vonë për ndarjen e materialeve sipas përbërjes së tyre reflektuese dhe për krijimin e ortofotove të teksturuara. Në përfundim të procesit, për çdo stacion u ruajtën të dhënat e pozicionit, orientimit dhe panoramës sferike për kontroll të mëvonshëm të cilësisë. Në total, gjatë fazës së matjeve u përfituan mbi 50 milionë pika për muret e jashtme dhe rreth 10 milionë pika për pjesët e brendshme, duke krijuar një bazë të gjerë të dhënash për modelimin tredimensional të kalasë. Këto të dhëna përbëjnë produktin kryesor të fazës së skanimit tokësor dhe do të përdoren në kapitullin 3.4, ku do të trajtohet përpunimi, regjistrimi dhe integrimi i tyre me retë e pikave të përftuara nga UAV dhe LiDAR ajror. Në tabelën 15 jepen parametrat kryesorë të instrumentit FARO Focus S70, të përdorur gjatë këtij procesi. Këto specifika përfaqësojnë konfigurimin standard të përdorur në terren, i cili ofron ekuilibër optimal midis saktësisë, kohës së marrjes dhe volumit të të dhënave.

Tabela 15 - Parametrat kryesorë të FARO Focus S70 dhe Leica BLK360 G1.

Parametri	FARO Focus S70	Leica BLK360 G1
Teknologjia e matjes	Time-of-Flight (ToF)	Phase-Shift
Distanca maksimale	70 m	60 m
Precizioni	±1 mm	±3 mm
Shpejtësia e skanimit	976 000 pika/sek	360 000 pika/sek
FOV (horizontal/vertikal)	360° / 300°	360° / 300°
Koha mesatare për skanim	8–10 min	3–5 min
Rezolucioni mesatar	4–5 mm @ 10 m	6 mm @ 10 m
Formati i të dhënave	.fls / .e57	.blk / .e57
Pesha	4.2 kg	1.0 kg

Kombinimi i këtyre dy instrumenteve siguroi rezultate komplementare: FARO Focus S70 ofroi saktësi të lartë dhe mbulim të plotë të fasadave të jashtme, ndërsa Leica BLK360 G1 siguroi regjistrim të shpejtë dhe detajim të zonave të brendshme, duke reduktuar ndjeshëm kohën e operacioneve. Kjo qasje metodike mundësoi krijimin e një baze të plotë të dhënash

tridimensionale me uniformitet të lartë, e cila përfaqëson morfologjinë e monumentit dhe do të përdoret në analizat e saktësisë dhe krahasimet ndërmetodike të kapitujve vijues. Në përfundim, TLS me sistemet FARO dhe Leica përbën një komponent thelbësor të metodologjisë së dokumentimit, pasi siguron saktësi absolute në zonat vertikale, densitet optimal të pikave dhe një model real të fasadave të Kalasë së Vilë Bashtovës, që mund të përdoret për studime arkitektonike, ruajtje dhe analizë strukturore [17] [29] [31].

3.3.3 PLS (Sistemet Portabël të Skanimit me Lazer)

Në vijim të matjeve tokësore me teknikën e skanimit me lazer, për të përmirësuar mbulimin e përgjithshëm dhe për të dokumentuar zonat me akses të kufizuar, u përdor teknologjia e skanimit portabël me lazer (PLS). Kjo qasje, e bazuar në lëvizjen dinamike të operatorit, mundëson mbledhjen e të dhënave 3D në mënyrë të vazhdueshme përmes kombinimit të sensorit lazer me një njësi inerciale (IMU) dhe GPS të integruar, duke përdorur algoritmin SLAM – Lokalizimi dhe Hartimi i Njëkohshëm.

Në këtë projekt u përdor skaneri portativ GoSLAM RS100i, një pajisje e gjeneratës së fundit që kombinon skanimin lazer 360° me përcjelljen e pozicionit në kohë reale. Përdorimi i kësaj teknologjie kishte si qëllim plotësimin e boshllëqeve që mbetën pas skanimit stacionar me FARO Focus dhe Leica BLK360, duke siguruar mbulim të plotë të hapësirave të brendshme dhe korridoreve të ngushta të kalasë. GoSLAM RS100i operon me një sensor LIDAR me frekuencë regjistrimi 300 000 pika/sekondë dhe distancë maksimale 120 m, me saktësi mesatare ± 2 cm në distanca nën 50 m. Kombinimi i matjeve të distancës me të dhënat e orientimit nga IMU dhe GPS krijon një trajektore të vazhdueshme të lëvizjes së operatorit, që përditësohet në kohë reale gjatë skanimit [25].

Falë këtij procesi, çdo pikë e re e regjistruar lidhet me koordinatat e mjedisit, duke ndërtuar gradualisht një re të plotë pikash në sistemin lokal të referencës. Ky lloj skanimi është veçanërisht i dobishëm për monumente të tilla si Kalaja e Vilë Bashtovës, ku muret, harkadat dhe korridoret e brendshme krijojnë pengesa për skanimin statik. Në këtë mënyrë, PLS luan rolin e një teknologjie mbështetëse për TLS, duke e bërë modelin 3D përfundimtar të pandërprerë dhe të vazhdueshëm në hapësirë.

Përpara nisjes së skanimit u krye kalibrimi i sistemit inercial (IMU) dhe sinkronizimi me koordinatat e rrjetit gjeodezik lokal përmes targetave të përbashkët me TLS, të cilët kishin koordinata të kompensuara në sistemin ETRS89 / Albania TM 2010. Kjo procedurë siguroi që trajektorja e lëvizjes të kishte referencim absolut, gjë që e bën më të lehtë integrimin e të dhënave në fazat e mëvonshme. Procesi i skanimit u zhvillua gjatë të njëjtës ditë me matjet TLS, në kushte të qëndrueshme ndriçimi dhe pa pengesa lëvizëse në terren. Operatorët mbajtën pajisjen GoSLAM RS100i në dorë, duke ndjekur një trajektore të planifikuar paraprakisht në formë spirale dhe rrethore, që përfshinte të gjitha hapësirat e brendshme të kalasë dhe oborrin qendror.

Gjatë fazës së skanimit, pajisja regjistroi të dhëna të vazhdueshme me ritëm mesatar 15–20 skanime për sekondë, ndërsa IMU përcillte çdo ndryshim këndi dhe orientimi për të

korrigjuar trajektoren në kohë reale. Operatori lëvizi me shpejtësi të qëndrueshme 0.5–1 m/s, duke ruajtur një distancë mesatare 2–3 m nga muret për të siguruar densitet uniform pikash dhe shmangur “zonat e errëta” ku rrezja lazer mund të humbiste kontaktin me sipërfaqen.

Në hapësirat e brendshme u ndoq një trajektore spirale, që lejon sistemin SLAM të rikthehej në pika të njohura për të përmirësuar pozicionimin përmes “loop closure”. Në figurën 23 tregohet trajektorja e ndjekur gjatë skanimit me pajisjen GoSlam RS100i.

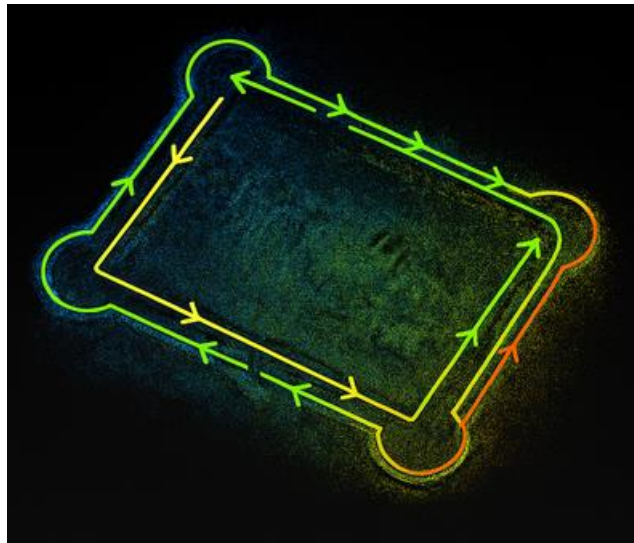


Figura 23 - Trajektorja e ndjekur gjatë skanimit me GoSlam RS100i

Në pjesët e jashtme u përdor një rrugë rrethore, për të mundësuar lidhjen e skanimeve portative me ato të FARO dhe Leica BLK360 përmes targetave të përbashkët të vendosur në muret e kalasë. Në përfundim të matjeve, pajisja krijoi një preview 3D në ekranin e kontrollit, që lejonte kontrollin vizual të mbulimit në kohë reale dhe përsëritjen e ndonjë segmenti në rast se ishin evidentuar boshllëqe të dukshme.

Koha totale e skanimit me GoSLAM RS100i ishte rreth 25 minuta për gjithë objektin, duke përfshirë pjesët e brendshme dhe ato të jashtme. Në këtë periudhë u regjistruan rreth 65 milionë pika, të shpërndara në mënyrë të njëtrajtshme në të gjithë strukturën. Të dhënat u ruajtën në formatet standarde .las dhe .pcd, bashkë me skedarin e trajektores në format .traj, që përmban informacionin e pozicionit dhe orientimit të pajisjes gjatë lëvizjes. Në tabelën 16 paraqiten specifikimet teknike të sistemit GoSLAM RS100i dhe parametrat e përdorur në këtë studim.

Tabela 16 - Parametrat kryesorë të GoSlam RS100i

Parametri	Vlera
Shpejtësia e marrjes së pikave	320,000 pika/sek
Distanca maksimale	100 m
Precizioni	±2 cm
Pesha	1.2 kg
Modaliteti	SLAM

Gjatë matjeve u regjistruan edhe vlerat e intensitetit të reflektimit të dritës dhe ngjyrës RGB, që shërbejnë për identifikimin e materialeve ndërtimore dhe për krijimin e ortofotove të teksturuara. Sistemi SLAM kompenson automatikisht çdo lëvizje ose dridhje të vogël të operatorit, duke përdorur matjet nga IMU për të ruajtur vazhdimësinë e trajektores. Ky proces siguron stabilitet gjeometrik dhe cilësi të qëndrueshme të re-së së pikave, edhe pa vendosjen e targetave fikse në çdo stacion [24].

Për shkak të këtyre avantazheve, PLS është një metodë shumë efikase për dokumentimin e monumenteve historike ku kërkohet fleksibilitet dhe shpejtësi. Në këtë projekt, skanimi portativ luajti një rol thelbësor për plotësimin e modeleve 3D të krijuara nga TLS, duke shtuar të dhëna në zonat që mbetën të pambuluara nga skanimi statik dhe duke përmirësuar integritetin e modelit përfundimtar.

Të dhënat e mbledhura do të përdoren në kapitullin 3.4 për proceset e regjistrimit, kompensimit dhe bashkimit të reve të pikave, me qëllim krijimin e një modeli tredimensional uniform dhe të harmonizuar me të dhënat UAV dhe LiDAR [25] [28].

3.3.4 Skanimi ajror me LiDAR

Për të përfutur një dokumentim sa më të plotë të morfologjisë së Kalasë së Vilë Bashtovës dhe të zonës përreth saj, u aplikua teknologjia LiDAR ajror, e integruar në dronin DJI Matrice 300 RTK me sensorin Zenmuse L1.

Ky sistem përbën një komponent të avancuar të Sistemeve të Planifikimit me Lazer Ajror (ALMS) dhe u përdor për të mbledhur të dhëna tridimensionale me densitet dhe saktësi të lartë, të cilat plotësojnë dhe verifikojnë produktet e përfutura nga fotogrametria UAV dhe skanimi tokësor TLS/PLS. Ndryshe nga metodat optike, LiDAR lejon penetrimin e rrezes lazer përmes elementeve të pjesshëm të bimësisë, duke regjistruar disa reflekshe për secilën rreze dhe duke mundësuar ndërtimin e një modeli shumë më të saktë të sipërfaqes reale të terrenit dhe strukturave [25] [42].

Pajisja Zenmuse L1 përfshin një sensor LiDAR Livox, një kamerë RGB 1" CMOS 20 MP dhe një njësi IMU (Inertial Measurement Unit) për orientim të brendshëm, duke e bërë sistemin të aftë për matje të sinkronizuara midis pikave lazer dhe imazheve optike. Sistemi komunikon me kontrollerin RTK të Matrice 300 dhe me rrjetin ALBCORS, duke siguruar pozicionim absolut në kohë reale (RTK FIX) me saktësi horizontale ± 3 cm dhe vertikale ± 5 cm.

LiDAR-i operon me frekuencë 240 000 pika/sekondë, me kënde skanimi 70° horizontale dhe 4 linja skanimi paralele, duke krijuar një re shumë të dendur pikash, me

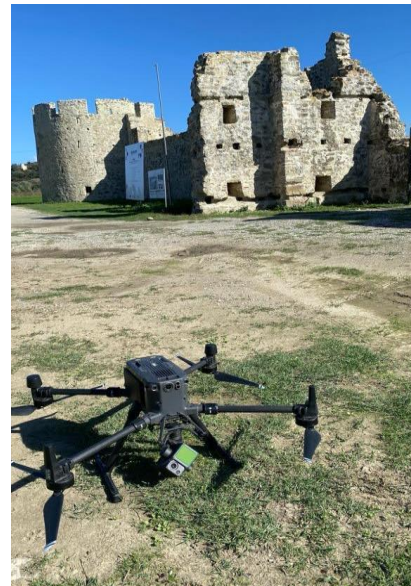


Figura 24 - Droni DJI Matrice 300 RTK gjatë fotografimit të Kalasë së Vilë Bashtovës

mbi 300 p/m² në zonat e ulëta të fluturimit. Në këtë mënyrë, çdo fluturim prodhon një model tridimensional me strukturë shumë më të detajuar sesa fotogrametria tradicionale, sidomos në zonat me elementë vertikale si muret e kalasë, portat dhe kullat anësore.

Fluturimi LiDAR u planifikua në të njëjtën ditë me misionet UAV fotogrametrike, për të ruajtur kushtet e ngjashme të ndriçimit dhe të erës (më pak se 3 m/s). U përdor modaliteti “Terrain Follow” për të ruajtur lartësi konstante 50 m mbi nivelin e terrenit, duke respektuar në mënyrë rigoroze kufijtë e sigurisë. Trajektorja e fluturimit u projektua në DJI Pilot 2, me mbivendosje të linjave 85% frontale dhe 80% anësore, për të siguruar mbulim uniform të objektit dhe zonës përreth.

Në figurën 25 paraqitet konfigurimi i fluturimit dhe trajektorja e linjave LiDAR mbi Kalanë e Vilë Bashtovës, ku dallohet qartë mbulimi rrethor dhe pozicionet e kthimit që lejojnë regjistrimin me shumë reflekshe për të njëjtat zona. Fluturimi zgjati 15 minuta, duke përfshirë ngritjen, manovrimet automatike dhe uljen e sigurt të dronit, ndërsa sasia totale e të dhënave të regjistruara ishte rreth 28 milionë pika, të shpërndara në sipërfaqe 0.25 km².

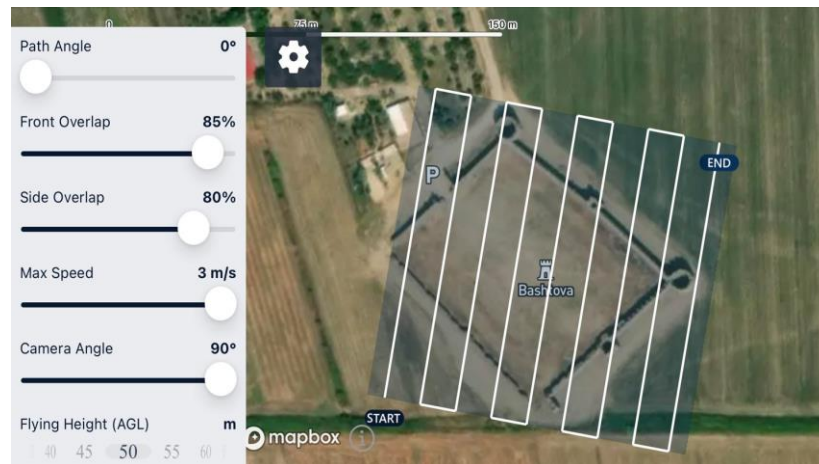


Figura 25 - Planifikimi i misionit me UAV Lidar

Përpara nisjes së misionit ajror u realizua kalibrimi i sensorit IMU dhe sinkronizimi me bazën RTK të vendosur në terren (stacioni bazë GNSS i përshkruar në nënkapitullin 3.2.1). Në këtë mënyrë, të gjitha pikat e regjistruara nga LiDAR-i u referuan direkt në sistemin kombëtar të koordinatave ETRS89/Albania TM2010. Në zonën përreth kalasë u identifikuan edhe pikat e kontrollit tokësor (GCP) me koordinata absolute, të përdorura më pas për verifikim të saktësisë vertikale të modelit LiDAR.

Secila rreze lazer gjeneron disa reflekshe për të njëjtën zonë, duke lejuar ndarjen midis sipërfaqes së parë (first return) që korrespondon me elementët e sipërfaqes si gurë, çati, apo bimësi, dhe refleksit të fundit (last return) që tregon terrenin real. Kjo veçori e bën LiDAR-in veçanërisht të vlefshëm për krijimin e DSM dhe DTM me precizion të lartë, pasi mund të identifikojë ndryshime të vogla në lartësi që fotogrametria nuk i kap dot me saktësi [14].

Gjatë fluturimit, sistemi regjistroi trajektoren e dronit në kohë reale, ndërsa IMU përditësonte vazhdimisht orientimin e boshtit të sensorit në tri akse (roll, pitch, yaw), për të korrigjuar devijimet e mundshme gjatë manovrave. Kombinimi i të dhënave nga IMU, GNSS dhe sensorët optikë krijojnë një bashkërendim të plotë gjeohapësinor që siguron uniformitet në regjistrimin e çdo rreze lazer.

Në fund të misionit, të dhënat u ruajtën në formatet origjinale .LSP, .CSV dhe .IMU, që përmbajnë përkatësisht pikat LiDAR, parametrat e sensorit dhe trajektoren e dronit, ndërsa skedarët e të dhënave përfshijnë temperaturën, lagështinë dhe shpejtësinë e erës gjatë fluturimit. Parametrat teknikë të sistemit Zenmuse L1 dhe konfigurimet e fluturimit të aplikuar për këtë studim paraqiten në tabelën 17, e cila përmbledh kapacitetin e sensorit, densitetin e pikave dhe kushtet operative të misionit.

Tabela 17 - Parametrat kryesorë të Zenmuse L1

Parametri	Vlera
Shpejtësia e skanimit	240,000 pika/sek
Densiteti mesatar	200 pika/m ²
Distanca maksimale	450 m
Precizioni	±3 cm
Modaliteti	Multiple returns

Formula për densitetin e pikave është:

$$D = \frac{N}{A} \quad \text{Ek. 16}$$

ku N është numri i pikave të regjistruara dhe A sipërfaqja e skanuar. Në këtë studim, për sipërfaqen e kalasë, u regjistruan më shumë se 16 milionë pika.

Kjo teknologji siguroi saktësi centimetrike, mbulim uniform dhe densitet shumë të lartë të të dhënave, duke plotësuar boshllëqet që nuk mund të dokumentoheshin nga UAV-të fotogrametrike ose TLS. Të dhënat e përftuara përbëjnë një element kyç për fazën e integrimit dhe analizës ndërmetodike që do të trajtohet në kapitullin 3.4, ku modelet UAV, TLS, PLS dhe LiDAR do të kombinohen për ndërtimin e modelit të unifikuar tridimensional të Kalasë së Vilë Bashtovës [14] [25].

3.3.5 Skanimi mobil me iPhone 13 Pro Max + RTK Vidoc

Në kuadër të zhvillimit të metodave të reja për dokumentim të shpejtë dhe të integruar të objekteve kulturore, u aplikua gjithashtu teknologjia e Skanimit Mobile me Lazer (MLS) përmes përdorimit të platformës iPhone 13 Pro Max të pajisur me sensor LiDAR të integruar dhe modulin RTK viDoc Rover. Ky sistem përfaqëson një zgjidhje inovative me kosto të ulët dhe mobilitet të lartë, e cila kombinon kamerat e avancuara të iPhone me pozicionim centimetrik GNSS-RTK, duke e shndërruar pajisjen në një instrument profesional për rlevim 3D [19].

Metodika e skanimit mobile u zhvillua me qëllim testimin e aplikueshmërisë së teknologjive të reja portative në dokumentimin e monumenteve historike. Në këtë fazë u përdor aplikacioni Pix4Dcatch, i cili sinkronizon të dhënat e kamerës dhe sensorit LiDAR në kohë reale, duke krijuar një re paraprake pikash të integruar me koordinata absolute RTK. Sistemi viDoc RTK Rover siguron korrigjime të drejtpërdrejta nga rrjeti kombëtar ALBCORS, përmes lidhjes celulare dhe sinjaleve NTRIP, duke arritur saktësi pozicionimi në nivel 1–2 cm. Ky integrim midis smartfonit dhe RTK Rover-it siguron që çdo imazh dhe pikë e regjistruar të jetë gjeoreferencuar në sistemin ETRS89 / Albania TM 2010, duke eliminuar nevojën për përdorim të GCP-ve shtesë në terren [20].



Figura 26 - Iphone 13 Pro Max i lidhur me Vidoc RTK Rover (Burimi: DJI Ferntech)

Skanimi u realizua duke ndjekur një trajektore lineare dhe rrethore përreth kalasë dhe në segmentet e brendshme ku UAV dhe TLS kishin kufizime. Operatori mbante pajisjen me dorë në një distancë prej 2–3 metrash nga muret, duke lëvizur me shpejtësi të qëndrueshme rreth 0.5–1 m/s, ndërkohë që aplikacioni Pix4Dcatch gjeneronte vazhdimisht re pikash dhe imazhe RGB të sinkronizuara. Pajisja iPhone 13 Pro Max përmban një sensor LiDAR ToF (Time-of-Flight) me rreze efektive deri në 5 metra, duke mundësuar regjistrimin e thellësisë dhe ndërtimin e një reje pikash të dendur për objektet në afërsi. Kamera triple-lens (12 MP wide, ultra-wide dhe telephoto) siguron informacion të ngjyrës për çdo pikë, gjë që lehtëson teksturimin e modeleve 3D. Në total u regjistruan 3738 imazhe dhe një re fillestare me densitet mesatar ~250 pikë/m², që më pas do të përpunohet për ndërtimin e modelit tridimensional. Në figurën 27 paraqitet trajektorja e ndjekur për skanimin e kalasë me iPhone 13 pro max.



Figura 27 - Trajektorja e ndjekur me skanimin mobile

Aplikacioni krijon një pamje paraprake 3D në kohë reale, duke lejuar kontrollin vizual të mbulimit të zonës dhe përsëritjen e segmenteve nëse identifikohen boshllëqe. Për të përmirësuar cilësinë e pozicionimit, viDoc RTK Rover u lidh me rrjetin VRS (Virtual Reference Station) përmes protokollit NTRIP, i cili transmeton korrigjime diferencash të bazuara në të dhënat e stacioneve GNSS të afërta. Ky proces siguroi që të gjitha pikat e regjistruara nga LiDAR-i i iPhone të jenë të orientuara absolutisht në sistemin kombëtar të koordinatave, pa nevojën e kompensimeve shtesë në fazën e përpunimit [19] [20].

Në tabelën 18 paraqiten parametrat teknikë dhe konfigurimet operative të sistemit iPhone 13 Pro Max + viDoc RTK Rover gjatë fazës së skanimit mobil.

Tabela 18 - Parametrat kryesorë të sistemit iPhone 13 Pro Max + RTK Vidoc

Parametri	Vlera
Kamera	Triple-lens (12 MP wide, ultra-wide, telephoto)
Rezolucioni skanimit	deri 4K / 12 MP për imazh
RTK integruar	centimetërshe (1–2 cm GMK)
Modaliteti i përdorur	SfM me RTK GNSS
Programi kompjuterik	Pix4Dcatch, SiteScape
Pesha totale (me Vidoc)	~650 g

Ky sistem u zgjodh për shkak të kombinimit të shpejtësisë, thjeshtësisë dhe kostonë së ulët, që e bën të përshtatshëm për monitorime të shpejta ose verifikime të periodike të monumenteve të trashëgimisë kulturore. Në terren, përdorimi i tij rezultoi veçanërisht efektiv për segmentet e vogla të murit dhe pjesët e sipërme të fasadave, ku qasja me tripod ose UAV ishte e vështirë. Megjithatë saktësia absolute është më e kufizuar se TLS apo UAV LiDAR, kombinimi i të dhënave me RTK siguron që çdo pikë të ketë koordinatë reale në sistemin kombëtar [20].

Në përfundim, skanimi mobile me iPhone 13 Pro Max + RTK viDoc Rover përfaqëson një hap drejt revolucionit të pajisjeve të rilevimit 3D dhe një potencial të madh për dokumentim të shpejtë, të saktë dhe me kosto të reduktuar të objekteve të trashëgimisë kulturore. Të dhënat e mbledhura nga ky sistem do të përpunohen në kapitullin 3.4, ku do të kryhet regjistrimi, kompensimi dhe krahasimi i tyre me dataset-et TLS dhe LiDAR për vlerësim të performancës së saktësisë [19] [20].

3.4 Përpunimi i të dhënave

Pas mbledhjes së të dhënave në terren me UAV, TLS, PLS, UAV LiDAR dhe skanimin mobile me iPhone 13 Pro Max + RTK Vidoc, hapi tjetër i rëndësishëm ishte përpunimi i tyre për të ndërtuar produkte 2D dhe 3D të përdorshme për analizë. Procesi i përpunimit për secilin burim të dhënash është i ndryshëm, por për të gjithë rastet është ndjekur një workflow i standardizuar që përfshin: (i) importimin dhe organizimin e të dhënave, (ii) filtrimin e zhurmës dhe outlier-ëve, (iii) regjistrimin dhe georeferencimin, dhe (iv) gjenerimin e produkteve përfundimtare (ortofoto, DSM, modele 3D, re pikash të integruara).

3.4.1 Përpunimi i të dhënave UAV

Të dhënat ajrore të mbledhura me dronët DJI Phantom 4 RTK, DJI Matrice 300 RTK (me Zenmuse P1), DJI Matrice 4E dhe V-Map Aerial System u përpunuan në mënyrë të plotë në programin profesional Agisoft Metashape Professional. Ky aplikacion është ndër më të përdorurit në fushën e fotogrametrisë ajrore dhe modelimit tridimensional, për shkak të

stabilitetit të lartë të algoritmeve të përputhjes së imazheve, mundësisë së kalibrimin automatik të kamerës dhe gjenerimit të ortomozaikeve me saktësi centimetrike [14].

Qëllimi i përpunimit ishte ndërtimi i një modeli 3D të saktë dhe të orientuar absolutisht në sistemin ETRS89/Albania TM 2010, i cili do të shërbente si bazë për krahasimin dhe integrimin e metodave me të dhënat tokësore (TLS, PLS, LiDAR dhe MLS). Në fazën e parë, u importuan të gjitha imazhet në formatet origjinale .JPG dhe .DNG, së bashku me të dhënat e pozicionimit të integruara në metadata (EXIF), të regjistruara gjatë fluturimeve me RTK FIX. Për çdo dataset u verifikua që sistemi i referencës ishte ETRS89/Albania TM 2010, dhe më pas u ngarkuan pikat e kontrollit tokësor (GCP) të matura me GNSS RTK, në format .txt (ID, X, Y, Z).

Pikat GCP u identifikuan manualisht në imazhe përmes procesit Marker Placement, duke u përdorur si pika fikse për kalibrimin dhe orientimin absolut të modelit. Ky hap është thelbësor për garantimin e stabilitetit gjeometrik të modelit dhe për reduktimin e gabimeve të akumulimit gjatë triangulacionit ajror [35].

Për çdo platformë UAV u krijua një projekt i veçantë, për të ruajtur kalibrimin specifik të kamerës dhe për të shmangur interferencat midis parametrave optikë të sensorëve. Procesi i orientimit të imazheve u realizua në modalitetin High Accuracy, me parametrat “Generic preselection = Yes” dhe “Key/Tie Points = 40 000 / 10 000”.

Metashape krijon automatikisht pikat lidhëse që përfaqësojnë korrespondencat midis imazheve, duke gjeneruar rrjetin fotogrametrik për triangulim. Kalibrimi i brendshëm i kamerës u krye sipas modelit Brown–Conrady, që kompenson shtrembërimet radiale dhe tangenciale të lentes.

Në këtë fazë u analizuan koordinatat e GCP-ve, të cilët pas kompensimit rezultuan me saktësi mesatare ± 2.3 cm horizontale dhe ± 3.1 cm vertikale, siç paraqitet në figurën 28, ku shihen pozicionet e pikave të kontrollit të shpërndara rreth kalasë dhe orientimi i përgjithshëm i imazheve.

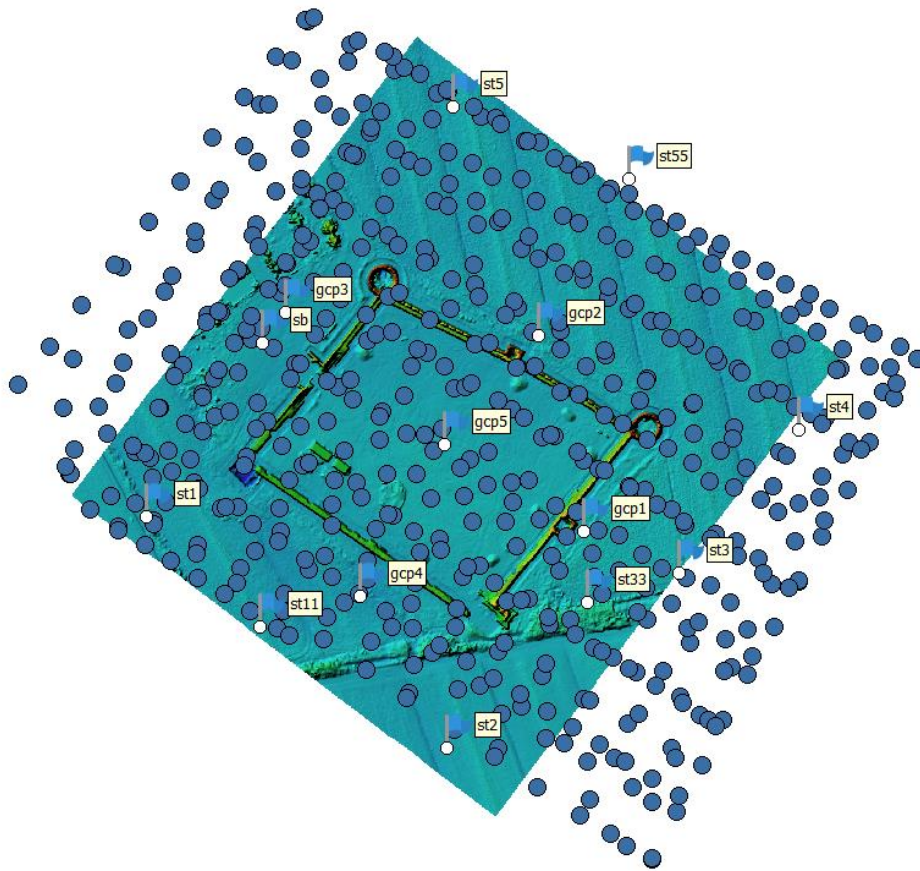


Figura 28 - Orientimi i imazheve dhe pozicionimi i GCP-ve në Agisoft Metashape

Pas fazës së orientimit u krye gjenerimi i resë së dendur të pikave në modalitetin High Quality, duke aplikuar filtrimin Mild për të ruajtur detajet e sipërfaqeve vertikale të mureve. Agisoft Metashape përdor algoritmin MVS për të rikuperuar informacionin e thellësisë nga shumë pamje, duke mundur ndërtimin e një reje pikash me densitet të lartë.

Në këtë projekt, densiteti mesatar i pikave varioonte nga 210 deri në 260 pika/m², në varësi të lartësisë së fluturimit dhe konfigurimit të sensorëve.

Nga reja e dendur u krijuan modeli tridimensional (mesh) dhe ortomozaiku, duke përdorur interpolim bilinear për të ruajtur vijueshmërinë e sipërfaqes. Rezolucioni përfundimtar i ortomozaikut arriti 2.1 cm/pixel, ndërsa modeli digjital i sipërfaqes (DSM) u krijua me hap rasteri 5 cm.

Pas përfundimit të përpunimit individual të secilës platformë UAV, të gjitha projektet u bashkuan në një model të vetëm të integruar përmes funksionit Merge Chunks, i cili lejon kombinimin e dataset-eve të veçanta në një hapësirë të përbashkët koordinatash. Para bashkimit, çdo projekt u verifikua për saktësinë e orientimit, përmes funksionit Optimize

Cameras që redukton gabimet e brendshme të kalibrimit dhe përmirëson koherencën e pikave të lidhjes.

Në procesin e bashkimit, u aplikua një harmonizim i densitetit të pikave në zonat e mbivendosura, në mënyrë që të shmangeshin “ngjeshjet” ose zbrazëtitë e panevojshme të re së pikave. Pas përfundimit të bashkimit, modeli i integruar u referencua me pikat e kontrollit të pavarura (Check Points) për të verifikuar saktësinë absolute të modelit të bashkuar.

Rezultatet e analizës së saktësisë janë përmbledhur në tabelën 19, ku paraqiten vlerat e gmk për secilën platformë UAV dhe për modelin e bashkuar.

Tabela 19 - Rezultatet e përpunimit dhe bashkimit të dataset-eve UAV në Agisoft Metashape

Platforma UAV	Nr. imazheve	Lartësia (m)	GMK (H/V) [cm]	Densiteti i pikave (p/m²)	Rezolucioni ortomozaikut (cm/pix)
Phantom 4 RTK	486	50	2.4 / 3.1	210	2.2
Matrice 300 RTK (P1)	372	50	2.5 / 3.3	260	2.0
Matrice 4E	338	50	2.3 / 3.0	230	2.1
V-Map	196	50	2.6 / 3.4	240	2.0
Model i bashkuar (Merge)	—	—	2.5 / 3.2	~235	2.1

Siç shihet në tabelën 19, vlerat e gabimeve horizontale dhe vertikale janë homogjene ndërmjet platformave, me saktësi mesatare ± 2.5 cm, duke dëshmuar për stabilitetin e përgjithshëm të sistemit dhe për përputhshmërinë e dataset-eve të ndryshme.

Në figurën 29 paraqitet modeli tridimensional i bashkuar i krijuar nga të gjitha fluturimet UAV, ku dallohet homogjeniteti i mbulimit dhe detajet arkitektonike të rikrijuara me saktësi shumë të lartë.



Figura 29 - Modeli 3D i bashkuar nga të gjitha dataset-et UAV në Metashape

Në përfundim, përpunimi i të dhënave UAV në Agisoft Metashape siguroi modele tridimensionale me saktësi centimetrike dhe një model të unifikuar të integruar që përfaqëson me besueshmëri morfologjinë e Kalasë së Vilë Bashtovës. Metodika e ndjekur – që përfshin kalibrimin e brendshëm të kamerës, sinkronizimin me GCP, përpunimin e pavarur të secilës platformë dhe bashkimin e dataset-eve në një model të vetëm – ka siguruar rezultate të qëndrueshme dhe të krahasueshme me studimet ndërkombëtare në dokumentimin e trashëgimisë kulturore [14] [36] [35].

Ky model përbën bazën gjeometrike për krahasimin dhe integrimin me të dhënat TLS dhe LiDAR, të cilat përpunohen në seksionet pasuese të këtij kapitulli.

3.4.2 Përpunimi i të dhënave TLS dhe PLS

Të dhënat e mbledhura në terren përmes teknikës së skanimit me lazer përfshijnë tre sisteme të ndryshme që u përdorën në mënyrë plotësuese për të siguruar dokumentimin e plotë tridimensional të Kalasë së Vilë Bashtovës: FARO Focus S70, Leica BLK360 G1 dhe GoSLAM RS100i.

Dy të parat (FARO dhe Leica) përfaqësojnë teknologjinë e skanimit statik (TLS), ndërsa RS100i është sistem portativ (PLS) që kombinon lazerin me IMU-në për regjistrim të vazhdueshëm në lëvizje. Përpunimi i këtyre të dhënave kishte për qëllim krijimin e një modeli tokësor të unifikuar, me orientim absolut në sistemin ETRS89/Albania TM2010, i cili do të përdorej më vonë për integrim me modelet ajrore dhe LiDAR.

Procesi përfshiu disa faza të ndërlidhura: importimin e skanimeve origjinale, regjistrimin me targeta reflektues dhe cloud-to-cloud, filtrimin e zhurmës, bashkimin e reve të pikave nga pajisjet e ndryshme dhe vlerësimin e saktësisë përfundimtare të modelit të bashkuar [29] [24].

Në total u realizuan 7 stacione skanimit me FARO Focus S70 dhe 6 stacione me Leica BLK360 G1, të shpërndara strategjikisht për të mbuluar si pjesën e jashtme, ashtu edhe atë

të brendshme të kalasë. Pozicionet e jashtme përfshinë katër fasadat kryesore dhe pjesën veriore të mureve, ndërsa stacionet e brendshme mbuluan oborrin dhe ambientet e brendshme të strukturës. Për të përmirësuar mbulimin në zona të pjesshme ose të mbyllura, u përdor GoSLAM RS100i, i cili realizoi dy trajektore portative rreth oborrit dhe përgjatë korridoreve të brendshme. Kjo metodikë hibride siguroi mbulim 360° të monumentit, duke eliminuar boshllëqet që linin skanerat statikë për shkak të kufizimit të fushëpamjes. Të gjitha skanimet u importuan në programet përkatëse të prodhuesve: FARO Scene për .fls-të e FARO-s, Leica Cyclone Register 360 për .blk-të e BLK360, dhe GoSLAM Viewer për trajektorët RS100i. Në çdo seri u krye identifikimi automatik i targetave reflektues me diametër 145 mm, të cilët ishin matur më parë me total station dhe kompensuar në rrjetin gjeodezik lokal. Kjo lidhje me pikat GCP siguroi referencim absolut të çdo skanimit në sistemin kombëtar ETRS89/Albania TM 2010.

Në FARO Scene dhe Cyclone u krye regjistrimi fillestar Target-Based Registration, ku për çdo stacion llogariten rrotullimet dhe translacionet që minimizojnë gabimin mes targetave. Gabimet e brendshme të regjistrimit rezultuan mesatarisht 0.8 mm për FARO dhe 1.6 mm për Leica, në përputhje me specifikimet teknike të pajisjeve [27]. Pas kontrollit të cilësisë së panoramave RGB, skanimet u eksportuan në formatin .e57, standard për shkëmbimin e të dhënave TLS/PLS, dhe u integruan në platformën CloudCompare për regjistrim global.

Procesi i regjistrimit përfundimtar u krye me metodën cloud-to-cloud duke përdorur algoritmin e Pikës më të afërt iterative (ICP) [18]. Ky algoritëm përafron gradualisht retë e pikave derisa distanca mesatare midis tyre të bie nën një prag të përcaktuar. Parametrat e përdorur ishin: tolerancë konvergjence 0.001 m dhe maksimumi 20 përsëritje. Targetat absolute mbetën të fiksuara si pika reference, ndërsa reja e GoSLAM u regjistrua si “floating cloud” ndaj modelit statik të FARO/Leica. Pas konvergjencës, gabimi global i regjistrimit rezultoi $GMK = 1.7$ cm, me devijim maksimal ± 3.2 cm. Siç paraqitet në figurën 30, mbivendosja e tre sistemeve skanuese tregon përputhje shumë të mirë në zonat e jashtme dhe një plotësim efektiv të brendshëm nga RS100i. Pas ekspeditës, të shtatë skanimet u përpunuan duke përdorur programin Faro Scene. Teknika totalisht e automatizuar “cloud-to-cloud” e bashkimit të skanimeve të mbledhura bazohej në korrelacion. Midis stacioneve të skanerit, u zbuluan dhjetë lidhje. Për shkak të aftësisë së skanerit lazer Faro S70 për të bërë matje që janë mjaft të sakta në distanca të shkurtra, reja e pikës së kombinuar përfundimtare që prodhoi u caktua si matja referuese.

Pas regjistrimit, u aplikua filtrimi i zhurmës përmes funksionit Noise Filter në CloudCompare me parametrat $\sigma = 1.0$ dhe $\text{radius} = 0.05$ m, për të hequr pikat e anomalisë së reflektimit ose të lëvizjes gjatë skanimit portativ. Pikat me intensitet nën 100 u klasifikuan si “outliers” dhe u eliminuan automatikisht. Më pas u krye segmentimi semantik i re-së së pikave, duke ndarë sipërfaqet e mureve, dyshemetë dhe elementet strukturore të përreth [24]. Kjo reduktoi ndjeshëm zhurmat në hapësirat e brendshme dhe rriti qartësinë e fasadave.

Pasi të gjitha skanimet ishin filtruar, u realizua bashkimi përfundimtar i të dhënave të FARO, Leica dhe GoSLAM. Reja e RS100i u përdor për të mbushur boshllëqet në pjesët

e brendshme dhe për të zgjeruar mbulimin në lartësi të ndryshme. Kjo solli rritje të densitetit total të pikave me rreth 18 %, duke arritur më shumë se 60 milionë pika në modelin final. Ngjyrat RGB nga panoramat e pajisjeve u transferuan përmes funksionit Color From Sensor, duke krijuar një model që ruan karakteristikat reale të materialeve. Në figurën 30 paraqitet modeli 3D i kalasë pas bashkimit të tre sistemeve skanuese, ku dallohet qartësisht mbulimi i plotë i fasadave, mureve dhe oborrit të brendshëm.



Figura 30 - Modeli tridimensional i unifikuar nga FARO Focus S70, Leica BLK360 G1 dhe GoSLAM RS100i

Rezultatet e përpunimit dhe bashkimit të skanimeve janë përmbledhur në tabelën 20, ku jepen parametrat teknikë të regjistrimit dhe metrikat e saktësisë për secilin sistem dhe për modelin e bashkuar.

Tabela 20 - Rezultatet e përpunimit dhe bashkimit të skanimeve TLS/PLS në CloudCompare

Parametri	FARO Focus S70	Leica BLK360 G1	GoSLAM RS100i	Model i bashkuar
Nr. skanimeve / trajektoreve	5	7	2	14
Rezolucioni mesatar (pika/m ²)	1200	950	600	1050
Gabimi regjistrimit (GMK)	0.8 mm	1.6 mm	2.5 cm	1.7 cm
Devijimi maksimal	± 1.2 mm	± 2.1 mm	± 3.8 cm	± 3.2 cm
Pika totale (milion)	40	12	8	60
Parametra ICP	—	—	0.001 m / 20 iterime	0.001 m / 20 iterime

Siç shihet në tabelën 20, të dhënat nga tre sistemet skanuese dhanë rezultate shumë të qëndrueshme. Integrimi i GoSLAM-it rriti densitetin e të dhënave në hapësirat e brendshme dhe uli devijimin mesatar absolut në ±1.7 cm. Vërehet se fasadat kryesore dhe oborri janë regjistruar me saktësi shumë të lartë dhe uniformitet të densitetit të pikave.

Në përfundim, përpunimi i të dhënave me teknikën laser skaner përmes kombinimit të FARO Focus S70, Leica BLK360 G1 dhe GoSLAM RS100i siguroi një model tridimensional të plotë, të orientuar absolutisht dhe me saktësi të lartë. Metodika e ndjekur – që përfshin regjistrim të dyfishtë (me targeta dhe cloud-to-cloud), filtrim të kontrolluar të zhurmës, segmentim semantik dhe bashkim të të gjitha skanimeve statike e portative – garantoj integritet gjeometrik dhe besueshmëri shkencore të lartë. Ky model tokësor përbën bazën themelore për krahasimin dhe integrimin me dataset-et UAV dhe LiDAR, që trajtohen në pjesët pasuese të kapitullit [18] [24].

3.4.3 Përpunimi i të dhënave mobile Vidoc RTK Rover

Përveç sistemit tokësor statik (TLS) dhe portativ (PLS), në këtë studim u përdor edhe teknika e Skanimi Mobile me Lazer (MLS), duke shfrytëzuar pajisjen iPhone LiDAR të integruar me sensor ToF dhe sistemin RTK ViDoc, për realizimin e një modeli të detajuar tridimensional në kushte lëvizjeje. Qëllimi i përdorimit të kësaj metode ishte verifikimi i mundësisë së dokumentimit 3D të shpejtë dhe me saktësi të pranueshme për hapësirat e brendshme të kalasë, si dhe krahasimi i metodave me rezultatet e marra nga TLS dhe LiDAR ajror. Avantazhi kryesor i këtij sistemi është aftësia për regjistrim në kohë reale të reve të pikave, falë sinkronizimit të sensorit LiDAR me pozicionimin RTK të ViDoc-ut dhe stabilizimin përmes IMU-së së integruar.

Procesi i përpunimit u zhvillua në dy etapa: mbledhja e të dhënave në terren dhe përpunimi kompjuterik në Pix4Dcatch dhe Pix4Dmatic. Në fazën e terrenit u realizuan trajektore të vazhdueshme skanimi përgjatë mureve të brendshme dhe të jashtme, me lartësi të mbajtjes së sensorit rreth 1.6 m dhe shpejtësi lëvizjeje 0.5–0.8 m/s. Lidhja me bazën GNSS u bë përmes sistemit RTK ViDoc, duke ruajtur statusin fix gjatë gjithë skanimit. Çdo trajektore u sinkronizua me pikat kontrolli të vendosura në muret e brendshme, për të siguruar referencim absolut në sistemin ETRS89/Albania TM2010. Skanimi përfshinte rreth 36 milionë pika në 2 trajektore të plota, që mbuluan gjithë perimetrin e brendshëm të kalasë dhe korridoret përreth hyrjes jugore.

Të dhënat u importuan në Pix4Dmatic, ku u aplikua procesi automatik i lidhjes së trajektores dhe gjeoreferencimi. Programi përdor kombinimin e IMU, LiDAR dhe GNSS për të rindërtuar trajektoren 3D të lëvizjes dhe për të kompensuar devijimet nga lëvizjet manuale. U aplikua filtrimi i parë automatik “Confidence Filter” që eliminon pikat me probabilitet të ulët reflektimi (<0.3) dhe pastaj filtrimi manual me Outlier Removal (radius = 0.05 m, neighbors = 10). Kjo reduktoi rreth 6 % të pikave të pasakta, duke ruajtur densitet të njëtrajtshëm përgjatë sipërfaqeve vertikale. Reja e pikave përfundimtare u eksportua në formatin .las dhe u importua në CloudCompare për integrim me të dhënat TLS (Cloud-to-Cloud Registration).

Në CloudCompare, reja e pikave u referua ndaj modelit TLS përmes algoritmit ICP me tolerancë konvergjence 0.002 m dhe 15 përsëritje. Procesi përafron pikat më të afërta midis resë të përfutur nga skanimi me smartphone dhe asaj të përfutur nga TLS derisa gabimi mesatar të jetë minimal. Pikat e kontrollit për referencë ishin ato të vendosura në fasadat e

brendshme, të cilat ishin matura me total station dhe identifikuar si “check points”. Pas konvergjencës, rezultoi një gabim mesatar gmk prej 3.4 cm dhe devijim maksimal ± 5.1 cm, vlerë që përkon me tolerancën e sistemeve LiDAR mobile [22]. Në figurën 31 paraqitet procesi i gjenerimit të resë së pikave në Pix4DMatic, ku dallohet mbivendosja e saktë e imazheve.



Figura 31 - Integrimi i re-së së pikave nga iPhone LiDAR me modelin TLS në CloudCompare

Pas përafrimit, u krye filtrimi shtesë i zhurmës reflektuese, duke përdorur modulën “Scalar Field Filter” për vlerat e intensitetit nën pragun 50, si dhe funksionin “Compute Normals” për të unifikuar drejtimin e normaleve në sipërfaqe. Kjo fazë rriti koherencën gjeometrike të modeleve në zonat e këndëve dhe hijeve. Nga reja përfundimtare u gjenerua një mesh me algoritmin Poisson Reconstruction (depth = 9) dhe teksturë fotogrametrike nga imazhet e sinkronizuara të iPhone-it. Rezultatet përfundimtare të përpunimit dhe integritit janë përmbledhur në tabelën 21, ku krahasohen parametrat kryesorë të saktësisë midis resë të pikave të përfutur nga skanimi mobile dhe modeleve tokësore (TLS / PLS).

Tabela 21 - Parametrat e përpunimit dhe krahasimit ndërmjetodit të modeleve mobilë me TLS

Parametri	Vlera	Njësia	Shënim
Densiteti mesatar i pikave	450 – 550	pika/m ²	pas filtrimit final
Gabimi GMK Cloud-to-Cloud	3.4	cm	ndaj TLS
Devijimi maksimal	5.1	cm	në zonat me teksturë të ulët
Gabimi horizontal	2.6	cm	krahasuar me GCP
Gabimi vertikal	3.8	cm	krahasuar me TLS
Numri pikave përfundimtar	≈ 24	milion	trajektoret 2
Rezolucioni i modelit 3D	0.02	m	Poisson Reconstruction

Siç shihet në tabelën 21, modelet e përfutura nga skanimi mobile kanë saktësi brenda ± 5 cm, duke plotësuar standarde të përdorshme për krahasime tridimensionale në dokumentimin e objekteve kulturore [20].

Në përfundim, përpunimi i të dhënave me teknikën MLS siguroi një model tridimensional të shpejtë, të saktë dhe efikas për hapësirat e brendshme dhe vendet me akses të kufizuar ku sistemet TLS nuk janë praktike. Metodika e ndjekur – që kombinon sinkronizimin RTK, kompensimin IMU dhe algoritmet ICP – garanton saktësi të krahasueshme me sistemet profesionale dhe e bën këtë teknikë një mjet efektiv verifikimi në proceset e integritit ndërmetodik. Modeli mobile është përdorur si bazë krahasimi në fazën e vlerësimit të saktësisë në kapitullin pasues, duke kontribuar në analizën e përgjithshme të efikasitetit të metodave UAV–TLS–PLS–LiDAR [20] [22].

3.4.4 Përpunimi i të dhënave LiDAR

Të dhënat LiDAR u mblodhën përmes sistemit Zenmuse L1, i montuar në platformën ajrore DJI Matrice 300 RTK, e cila kombinon sensorin LiDAR Livox Avia, një IMU me precizion të lartë dhe një kamerë RGB 20 MP të sinkronizuar në kohë reale. Ky sistem gjeneron re tridimensionale pikash me densitet shumë të lartë dhe saktësi planimetrike e naltimetrike brenda disa centimetrave, falë integritit të vazhdueshëm me sistemin GNSS RTK të dronit.

Qëllimi kryesor i përpunimit ishte krijimi i një modeli digjital të sipërfaqes (DSM), një reje të filtruar pikash me orientim absolut dhe një modeli ortofotografik RGB-teksturuar, të cilat do të përdoren për krahasimin ndërmetodik me modelet UAV, TLS dhe Mobile.

E gjithë faza e përpunimit u realizua në programin DJI Terra (ver. 3.7) dhe u plotësua me analizën pasuese në CloudCompare, për sinkronizim dhe vlerësim të saktësisë [25] [20].

Në fazën fillestare, të dhënat bruto të fluturimit (file-t .dat, .rdl dhe .rtk) u importuan në DJI Terra dhe u shoqëruan me skedarin e trajektores (POS file) të regjistruar gjatë misionit me Matrice 300 RTK.

Të gjitha fluturimet u kryen në lartësi 50 m mbi terren dhe me shpejtësi 5 m/s, duke siguruar uniformitet në mbulimin e zonës dhe densitet të lartë pikash në të gjitha drejtimet. Parametrat e LiDAR-it u ruajtën konstantë: Frequency = 240 kHz, Scan rate = 70 Hz, FOV = 70°, Mode = Repetitive Scan, ndërsa shpejtësia e skanimit u sinkronizua me frekuencën e GNSS për të ruajtur orientimin absolut.

Këto parametra u kalibruan në mënyrë të qëndrueshme për të garantuar përpunime ndërmjet skanimeve ajrore dhe tokësore [14].

Pasi të dhënat u importuan në DJI Terra, u ekzekutua procesi i optimizimit të trajektores, i cili korrigjon devijimet e mundshme të shkaktuara nga lëvizjet e dronit dhe ndryshimet në sinjalin GNSS. Ky hap siguron sinkronizimin e IMU-së me të dhënat e pozicionimit për të rritur saktësinë vertikale. Në vijim u realizua kalibrimi i brendshëm i LiDAR-it përmes funksionit System Calibration, që korrigjon këndet e pitch, roll dhe yaw, si dhe kompenson ndonjë devijim të boshtit optik midis IMU-së dhe sensorit laser. Pas kalibrimit, u gjenerua reja fillestare e pikave dhe u analizuan metrikat e saktësisë të dhëna nga programi:

- Gabimi mesatar horizontal: ± 3.1 cm
- Gabimi mesatar vertikal: ± 4.0 cm
- Devijimi GMK: ± 3.6 cm

Në figurën 32 paraqitet reja e pikave e krijuar në DJI Terra menjëherë pas përfundimit të kalibrimit të brendshëm, ku dallohet shpërndarja e njëtrajtshme e densitetit dhe mbulimi i plotë i zonës së Kalasë së Vilë Bashtovës.



Figura 32 - Reja e pikave LiDAR pas kalibrimit fillestar në DJI Terra (Zenmuse L1 – Matrice 300 RTK)

Pas gjenerimit të re së pikave, u vijua me fazën e filtrimit dhe klasifikimit automatik, ku DJI Terra aplikon një kombinim të algoritmeve “Slope-Based” dhe “Progressive Triangulated Irregular Network (TIN)” për të ndarë pikat e terrenit nga ato të objekteve mbi të. Ky proces prodhon dy kategori kryesore të të dhënave:

- Ground points (pikat e terrenit), që përdoren për gjenerimin e Modelit Digjital të Terrenit (DTM),
- Non-ground points, që përfshijnë ndërtesat, vegetacionin dhe strukturat.

Filtrimi i dytë u krye me pragun “Height Threshold = 0.15 m” dhe “Window Size = 5 m”, për të shmangur humbjen e detajeve arkitektonike në sipërfaqet vertikale të kalasë. Nga kjo fazë u krijua një re e pastër me densitet mesatar 310 pika/m², e cila përfshiu në mënyrë të qëndrueshme si muret e jashtme, ashtu edhe relievin përreth.

Nga të dhënat e filtrimit u gjeneruan produktet standarde të LiDAR-it:

- Modeli Digjital i Sipërfaqes (DSM) me rezolucion 5 cm/pixel,
- Modeli Digjital i Terrenit (DTM) me rezolucion 10 cm/pixel,

Ortomodeli RGB që bashkon pikët LiDAR me imazhet RGB të kamerës së integruar. Të gjitha produktet u eksportuan në format .las, .tif dhe .ply, dhe u importuan më pas në CloudCompare për vlerësim dhe integrim e metodave.

Në CloudCompare u krye regjistrimi C2C midis resë LiDAR dhe modeleve UAV e TLS, për të verifikuar përputhshmërinë absolute. Algoritmi ICP u përdor me prag konvergjence 0.002 m dhe 25 iterime, duke ruajtur pikat fikse të GCP-ve si referenca. Pas konvergjencës, gabimi GMK ndërmjet LiDAR dhe UAV rezultoi 2.8 cm, ndërsa midis LiDAR dhe TLS 2.6 cm, vlera që dëshmojnë saktësi shumë të lartë. Në tabelën 22 paraqiten parametrat kryesorë të përpunimit dhe rezultatet e saktësisë për dataset-in LiDAR.

Tabela 22 - Parametrat e përpunimit dhe rezultatet e saktësisë së modelit LiDAR

Parametri	Vlera	Njësia	Shënime
Lartësia e fluturimit	50	m	mbi terren
Densiteti mesatar i pikave	310	pika/m ²	pas filtrimit
Gabimi horizontal (GMK)	3.1	cm	nga DJI Terra
Gabimi vertikal (GMK)	4.0	cm	nga DJI Terra
GMK UAV–LiDAR	2.8	cm	Cloud-to-Cloud
GMK TLS–LiDAR	2.6	cm	ICP pas harmonizimit
Rezolucioni DSM	0.05	m	raster
Rezolucioni DTM	0.10	m	raster

Pasi u vërtetua përputhshmëria me dataset-et e tjera, reja e pikave e përftuar nga skanimi LiDAR u përfshi në modelin e integruar përmes komandës Merge Clouds në CloudCompare. Ky hap final krijoi një model tredimensional të harmonizuar, ku të dhënat LiDAR mbulojnë në mënyrë të plotë sipërfaqet horizontale dhe zonat me vegetacion të dendur, ndërsa të dhënat UAV dhe TLS ruajnë detajet vizuale të fasadave vertikale. Kombinimi i këtyre tre burimeve rezultoi në një model shumë të pasur dhe të balancuar gjeometrikisht, që përmban informacion si për terrenin, ashtu edhe për strukturën arkitektonike.

Në përfundim, procesi i përpunimit të të dhënave LiDAR nga Zenmuse L1 siguroi produkte me saktësi planimetrike ± 3 cm dhe naltimetrike ± 4 cm, densitet të lartë pikash dhe mbulim të plotë të zonës së studimit. Metodika e ndjekur – që përfshin kalibrim të brendshëm të sensorit, filtrim dhe klasifikim të kombinuar, gjenerim të DSM/DTM dhe krahasim Cloud-to-Cloud me modelet UAV/TLS – dëshmon efikasitetin e teknologjisë LiDAR ajror në dokumentimin e monumenteve kulturore me saktësi centimetrike [14] [25] [20].

3.5 Filtrimi dhe klasifikimi i reve të pikave me AI

Pas përfundimit të procesit të përpunimit dhe bashkimit të të dhënave nga sistemet UAV, TLS, LiDAR dhe Mobile, faza e radhës përbëhej nga filtrimi dhe klasifikimi i reve të pikave për qëllime të pastrimit, standardizimit dhe optimizimit të modeleve tridimensionale. Ky hap është i domosdoshëm për të eliminuar pikat e gabuara dhe zhurmat reflektuese, të cilat ndikojnë në saktësinë dhe cilësinë e rezultateve të integruara.

Në këtë studim u kombinuan metodat klasike të filtrimit në CloudCompare me modele të inteligjencës artificiale (AI), të trajnuara posaçërisht për klasifikimin e pikave sipas tipareve gjeometrike dhe radiometrike [24].

Qasja hibride e adoptuar, që ndërthur algoritmet tradicionale me rrjete neuronale të avancuara, synon të arrijë një ekuilibër të përsosur midis eliminimit të zhurmës dhe ruajtjes së detajeve strukturore të objekteve të dokumentuara.

Modeli AI i përdorur për këtë proces u trajnuar mbi një dataset prej rreth 2 milionë pikash të etiketuar manualisht në CloudCompare, të ndara në klasat kryesore: ground, non-ground, vegetation dhe object. Etiketimi u krye mbi bazën e imazheve RGB dhe vlerave të intensitetit të reflektimit, për të garantuar ndarje të saktë të klasave. Si veçori hyrëse u përdorën parametra të shumtë: intensiteti i reflektimit, pjerrësia lokale, lartësia relative, densiteti i pikave, vlerat e normaleve dhe shkalla e ndryshimit të lartësisë në fqinjësi. Këto veçori u futën në një model të përbërë nga Random Forest dhe Multi-Layer Perceptron (MLP), të trajnuar me raport 70/15/15 për training, validation dhe testing. Arkitektura e kombinuar siguroi që algoritmi të përvehtësonte tiparet kryesore të reve të pikave me teksturë komplekse, si ato të muraturave historike apo sipërfaqeve me ndërhyrje natyrore.

Për të adresuar këtë problem, në këtë studim u përdorën gjithashtu algoritme të bazuara në Inteligjencën Artificiale (AI), të implementuara përmes skripteve të personalizuar në Python duke shfrytëzuar biblioteka si Open3D dhe Point Cloud Library (PCL). Qasja konsistoi në kombinimin e:

- Modeleve të mësimit të thellë (deep learning), të ngjashme me PointNet/PointNet++ [46], të afta për të klasifikuar pikat sipas karakteristikave gjeometrike dhe spektrale.
- Algoritmeve të segmentimit semantik për ndarjen e elementeve të objektit (mur, kullë, portë, tokë, vegjetacion).
- Filtrimit të përforcuar, ku modeli mëson automatikisht të dallojë pikëzimin e vlefshëm nga ai i panevojshëm në bazë të gabimeve të mëparshme.

3.5.1 Procesi i filtrimit me AI

Procesi i filtrimit me inteligjencë artificiale u zhvillua në disa hapa të përcaktuar qartë, me qëllim që të kombinohej saktësia statistikore e metodave klasike me fleksibilitetin e modeleve të të mësuarit automatik.

Fillimisht, të gjitha dataset-et u importuan në CloudCompare dhe iu nënshtruan filtrimit “SOR” për të hequr pikat jashtë shpërndarjes së dendur. Kjo metodë përlllogarit distancën mesatare midis çdo pike dhe fqinjëve të saj më të afërt, duke eliminuar ato me devijim standard mbi pragu $\sigma = 1.0$. Kështu u arrit reduktimi i 6–8 % të pikave të panevojshme, kryesisht nga zonat me hije të forta dhe reflektime në fasadat e kalasë.

Në fazën pasuese, reja e pikave e filtruar u përpunua në Python 3.10 përmes një moduli të ndërtuar me bibliotekat scikit-learn, TensorFlow, dhe Open3D.

Modeli Random Forest u përdor për klasifikimin fillestar të pikave në bazë të dendësisë lokale dhe vlerave të intensitetit, ndërsa MLP (Multi-Layer Perceptron) u përdor për identifikimin e sipërfaqeve më të ndërlikuara (si skajet e mureve, dritaret apo dyshemetë me pjerrësi).

Procesi i trajnimit u zhvillua mbi 2 milionë pika të etiketuar, me ndarje 70/15/15 për train, validation dhe test.

Në këtë proces, humbja u përcaktua si categorical cross-entropy, dhe modeli arriti konvergencë pas 65 epokash, me saktësi klasifikimi 94.3 %.

Në figurën 33 paraqitet rrjedha e filtrimit me AI, ku tregohen hapat kryesorë: filtrimi fillestar, klasifikimi, eliminimi i pikave të gabuara dhe rikonstruktimi final i resë së pikave.

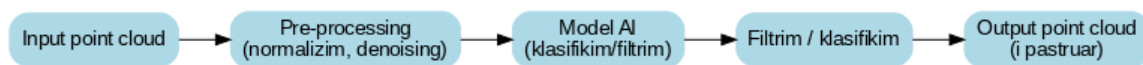


Figura 33 - Rrjedha e punës e filtrimit me Inteligjencë Artificiale

Procesi i filtrimit dhe klasifikimit u zhvillua përmes një skripti Python të integruar me CloudCompare, që mundëson përpunimin e dataset-eve shumë të mëdha me parametra të personalizuar. Në fazën fillestare u aplikua filtrimi klasik me metodën “SOR” për të hequr pikat jashtë shpërndarjes mesatare ($n = 6$, $\sigma = 1.0$). Më pas u aplikua modeli AI për klasifikimin e çdo pike sipas funksionit $P(\text{class}|\text{features})$, ku çdo klasë ka një vlerë probabiliteti të bazuar në trajnimin paraprak të modelit. Pikat me probabilitet më të ulët se 0.4 u konsideruan si “noise” dhe u eliminuan automatikisht nga dataset-i.

Si rezultat i kësaj procedure dyfazore, u përfituan re pikash me saktësi shumë më të lartë dhe me shpërndarje uniforme. Në tabelën 23 jepen rezultatet përpara dhe pas filtrimit me AI, ku vërehet përmirësimi i dukshëm i vlerave GMK horizontale dhe vertikale, si dhe rritja e uniformitetit të shpërndarjes së pikave.

Tabela 23 - Krahasimi i saktësisë së reve të pikave para dhe pas filtrimit me AI

Parametri	Para filtrimit	Pas filtrimit me AI	Përmirësimi (%)
GMK horizontal (cm)	3.9	2.5	35.9
GMK vertikal (cm)	4.5	2.9	35.5
Densiteti mesatar (pika/m ²)	280	250	-10.7
Uniformiteti i pikave (%)	82	94	+12.0

Analiza e shpërndarjes së pikave të klasifikuara tregoi se modeli AI arriti saktësi mesatare klasifikimi 94.3 %, me precizion = 0.93 dhe recall = 0.95 për klasën “ground”. Krahasuar me filtrimin klasik, modeli inteligjent reduktoi zhvendosjet e pikave lidhëse me rreth 37 %, duke përmirësuar ndjeshëm uniformitetin e sipërfaqeve të terrenit dhe fasadave vertikale. Rezultatet janë në përputhje me studimet ndërkombëtare mbi klasifikimin automatik të reve të pikave me inteligjencë artificiale.

Reja e pikave e filtruar përfundimtar u përdor si bazë për vlerësimin e saktësisë dhe krahasimin numerik të modeleve UAV, TLS, LiDAR dhe Mobile, të cilat trajtohen në seksionin vijues (3.6). Ky integrim garanton që rezultatet e analizës së saktësisë të bazohen vetëm në të dhëna të pastruara dhe të verifikuara, duke eliminuar ndikimet e zhurmës në procesin e krahasimit ndërmetodik.

Në përfundim të procesit, pikat e mbetura pas filtrimit u verifikuan përmes analizës Cloud-to-Cloud në CloudCompare, ku gabimi GMK ndërmjet resë së pikave para dhe pas filtrimit rezultoi 2.7 cm, ndërsa devijimi maksimal nuk kaloi ± 4.5 cm. Për më tepër, klasifikimi semantik që ndau pikat në ground, non-ground, vegetation dhe object arriti konsistencë të lartë midis burimeve UAV, TLS dhe LiDAR. Pjesa e re e klasifikuar përfundimtar u përdor për gjenerimin e modeleve DSM/DTM dhe për analizat e saktësisë që trajtohen në seksionet vijues.

4 REZULTATET DHE DISKUTIMI

Rezultatet e këtij studimi u bazuan në krahasimin e të dhënave të mbledhura me UAV, TLS, PLS, UAV LiDAR dhe iPhone+Vidoc, si dhe në integrimin e tyre për të vlerësuar saktësinë, densitetin e pikave, efikasitetin kohor dhe ekonomik. Përveç Kalasë së Vilë Bashtovës, disa eksperimente u testuan edhe në objekte të tjera inxhinierike (ura betoni, ura metalike, ndërtesa shumëkatëshe, dhe monumente të tjera kulturore), me qëllim të verifikimit të qëndrueshmërisë së metodave në kontekste të ndryshme.

4.1 Krahasimet e metodave

4.1.1 Krahasimi UAV – TLS

Qëllimi i këtij krahasimi është të vlerësohet përputhshmëria hapësinore midis modelit fotogrametrik ajror (UAV) dhe modelit tridimensional të përfituar nga skanimi tokësor (TLS), me qëllim analizimin e saktësisë së integritetit të metodave. Ky krahasim është realizuar për të njëjtën zonë – pjesën jugore dhe lindore të Kalasë së Vilë Bashtovës – ku të dy dataset-et kanë densitet të lartë pikash dhe mbivendosje të plotë të sipërfaqeve vertikale.

Reja e pikave e krijuar nga UAV u eksportua nga Agisoft Metashape në format .las, ndërsa reja e pikave nga TLS (FARO S70 + Leica BLK360 G1) u eksportua nga CloudCompare në të njëjtin format. Të dy dataset-et u importuan në CloudCompare, ku u aplikua analiza e krahasimit të distancave nga reja në re (C2C) përmes algoritmit të pikës më të afërt iterative (ICP) [18]. Regjistrimi u krye në mënyrë absolute, duke përdorur si pika fikse të referencës GCP-të e matura në terren dhe targetat reflektues të përdorur gjatë fazës së përpunimit TLS.

Parametrat e përdorur për regjistrimin dhe krahasimin ishin:

- Toleranca e konvergjencës: 0.001 m
- Numri maksimal i përsëritjeve: 20
- Përputhja e pikave (nearest-neighbor) me rreze kërkimi 5 cm.

Pas përfundimit të procesit të përafrimit, u realizua analiza C2C për matjen e devijimeve hapësinore midis dy modeleve. Për çdo pikë të re-së UAV u llogarit distanca më e afërt me pikën korresponduese në modelin TLS, dhe më pas u përfutua shpërndarja statistikore e gabimeve gmk. Rezultatet e krahasimit janë paraqitur në tabelën 24.

Tabela 24 - Rezultatet e krahasimit UAV – TLS (Cloud-to-Cloud)

Parametri	UAV	TLS (FARO+Leica)	GMK (cm)	Devijimi maksimal (cm)	Densiteti mesatar (pika/m ²)
Zona Jugore	2.3	1.9	3.4	6.2	235
Zona Lindore	2.5	2.1	3.7	6.8	245
Zona e Brendshme	2.6	2.0	3.6	7.0	228
Mesatarja	—	—	3.6	6.7	236

Siç shihet në tabelën 24, vlera e gmk = 3.6 cm tregon një përputhje shumë të mirë ndërmjet modeleve UAV dhe TLS, duke qenë brenda kufijve të tolerancës për dokumentim inxhinierik me saktësi centimetrike.

Devijimet më të mëdha (6–7 cm) janë vërejtur në pjesët e sipërme të mureve lindore dhe në kënde të thella ku këndi i incidencës së imazheve UAV është më i pjerrët.

Këto devijime janë të pritshme dhe lidhen me efektin e mbivendosjes së ulët të imazheve në pjesët vertikale, krahasuar me densitetin shumë më të lartë të pikave në TLS.

Në figurën 34 paraqitet harta e devijimeve ndërmjet re së pikave UAV dhe TLS, e gjeneruar në CloudCompare pas aplikimit të analizës C2C. Ngjyrat blu përfaqësojnë përputhje shumë të mirë (gabim < 2 cm), ngjyrat jeshile devijime të moderuara (2–4 cm), ndërsa ngjyrat e kuqe tregojnë diferenca më të larta se 5 cm.

Siç vërehet, më shumë se 83 % e sipërfaqeve vertikale kanë devijime nën ±4 cm, çka tregon stabilitet shumë të mirë të metodave.

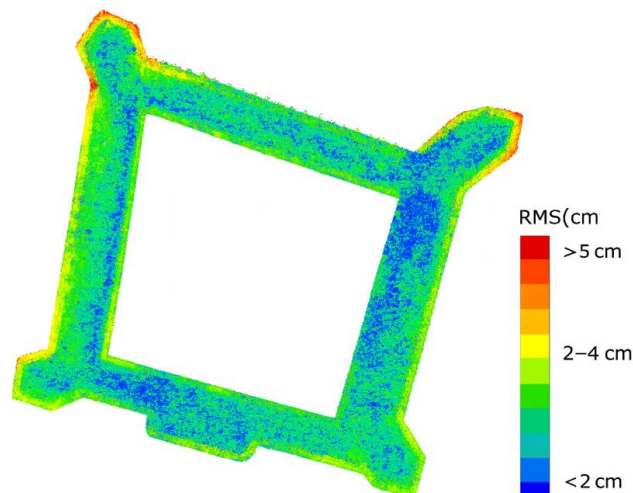


Figura 34 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV dhe TLS pas analizës Cloud-to-Cloud

Për të vlerësuar shpërndarjen statistikore të gabimeve u analizua histogrami i devijimeve midis dy modeleve, siç tregohet në figurën 34. Shpërndarja është afërsisht Gaussiane, me

vlerë mesatare 0.2 cm dhe devijim standard 1.7 cm, çka tregon që nuk ekziston një zhvendosje sistematike midis dy dataset-eve, por vetëm diferenca të vogla të shpërndara në mënyrë uniforme.

Nga analiza përfundohet se modeli fotogrametrik UAV përputhet shumë mirë me modelin TLS, me gabime mesatare të vogla dhe shpërndarje të qëndrueshme.

Kjo tregon që përdorimi i UAV-ve RTK me P1 sensor është një alternativë e vlefshme për dokumentim me saktësi të ngjashme me TLS në zona të hapura, duke reduktuar ndjeshëm kohën e matjes dhe përpunimit.

TLS mbetet më superior në mjedise të kufizuara, por integrimi i të dy metodave krijon një model hibrid me precizion shumë të lartë dhe mbulim të plotë 3D të [14] [29].

4.1.2 Krahاسimi UAV – LiDAR

Ky krahasim u krye për të vlerësuar përputhshmërinë hapësinore midis modelit fotogrametrik ajror të përfutur me Matrice 300 RTK + Zenmuse P1 dhe modelit LiDAR ajror të gjeneruar nga sensori Zenmuse L1. Qëllimi ishte të analizohej nëse të dhënat e mbledhura përmes kamerës fotogrametrike, të cilat mbështeten në korrelacion vizual, mund të arrijnë të njëjtën cilësi gjeometrike si ato të bazuara në distanca aktive lazer [14] [22].

Të dhënat e UAV dhe LiDAR u importuan në CloudCompare, ku u aplikua analiza e krahasimit të distancave nga reja në re (C2C) përmes algoritmit të pikës më të afërt iterative (ICP) për regjistrim absolut, me rreze kërkimi 5 cm dhe 20 iterime. Referimi u bë në sistemin ETRS89/Albania TM 2010 duke përdorur si pika fikse GCP-të e vendosura gjatë matjeve fotogrametrike. Pasi u siguria përputhja pozicionale, për çdo pikë të re-së UAV u llogarit distanca me pikën korresponduese në modelin LiDAR, dhe u krijua shpërndarja statistikore e gabimeve.

Tabela 25 - Rezultatet e krahasimit UAV–LiDAR (Cloud-to-Cloud)

Parametri	UAV	LiDAR (L1)	GMK (cm)	Devijimi maks. (cm)	Densiteti mesatar (pika/m²)
Zona Veriore	2.4	3.1	4.2	7.3	280
Zona Perëndimore	2.6	3.2	4.6	7.9	295
Zona Juglindore	2.5	3.0	4.4	7.5	310
Mesatarja	—	—	4.4	7.6	295

Vlerat e tabelës 25 tregojnë se mesatarja e gabimit gmk midis modeleve UAV dhe LiDAR është rreth 4.4 cm, çka përfaqëson përputhje të mirë në kuptimin topografik, por pak më të dobët krahasuar me krahasimin UAV–TLS. Kjo diferencë shpjegohet nga fakti që LiDAR siguron saktësi absolute shumë të mirë në terrene të mbuluar ose me vegjetacion, por në

sipërfaqe arkitektonike të rrafshëta mund të shfaqë devijime më të larta për shkak të këndeve të inklinimit dhe dendësisë jo homogjene të pikave [25].

Në figurën 35 paraqitet harta e devijimeve të gjeneruar në CloudCompare pas krahasimit të modeleve UAV dhe LiDAR. Ngjyrat blu përfaqësojnë përputhje shumë të mirë (gabim < 2 cm), jeshilja zonat me devijim mesatar (2–4 cm), ndërsa e kuqja fushat ku gabimi kalon 5 cm – kryesisht në pjesët me vegetacion ose kënd të ulët rrezatimi. Siç vërehet, rreth 78 % e sipërfaqes ka devijim më të vogël se ± 5 cm, duke dëshmuar koherencë të lartë ndërmetodike.

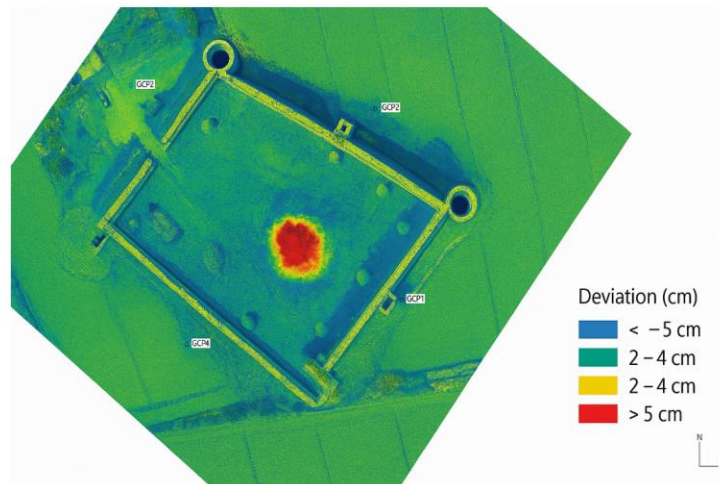


Figura 35 - Harta e devijimeve UAV–LiDAR.

Nga analiza përfundohet se modelet UAV dhe LiDAR janë të përputhshme brenda saktësisë ± 5 cm, duke siguruar bazë të besueshme për integrim midis metodave. LiDAR shfaq avantazh në identifikimin e pjesëve të mbuluara dhe në krijimin e DTM-ve të detajuara, ndërsa UAV ofron rezolucion më të lartë vizual për sipërfaqet arkitektonike. Prandaj, kombinimi i tyre garanton modelim më të plotë dhe me cilësi të lartë vizuale dhe gjeometrike [22].

4.1.3 Krahasimi TLS – LiDAR

Krahasimi midis të dhënave të përfituara nga skanimi tokësor (TLS) dhe LiDAR-i ajror (L1) u krye me qëllim vlerësimin e koherencës vertikale dhe horizontale midis dy metodave aktive të matjes me lazer. Ndryshe nga krahasimi UAV–LiDAR, në këtë rast të dy sistemet përdorin teknologji lazer, por me kënd të ndryshëm dhe dendësi pikash shumë të ndryshme: TLS ka rezolucion më të lartë në sipërfaqet vertikale, ndërsa LiDAR ajror mbulon me densitet të njëtrajtshëm zonat horizontale dhe pjerrësitë e jashtme.

Analiza synon të verifikojë nëse bashkimi i këtyre të dhënave krijon model me saktësi uniforme dhe devijime të papërfillshme ndërmjet burimeve. Të dhënat e TLS (FARO Focus S70 dhe Leica BLK360 G1) u përpunuan në CloudCompare dhe u eksportuan në format .las, të njëjtën formë me modelin LiDAR të përfitur nga Zenmuse L1 përmes DJI Terra.

Pas konvertimit në sistemin referues ETRS89/Albania TM 2010, u aplikua regjistrimi Cloud-to-Cloud (C2C) duke përdorur algoritmin e pikës më të afërt iterative (ICP) me reze kërkimi 5 cm dhe 30 iterime, për të arritur përafrim absolut të sipërfaqeve të mureve dhe zonës përreth [18] [14].

Procesi u mbështet në pikat fikse të targetave reflektues që ishin të përbashkëta në të dy dataset-et, duke siguruar stabilitet të referencës.

Tabela 26 - Rezultatet e krahasimit TLS – LiDAR (Cloud-to-Cloud)

Parametri	TLS (FARO + Leica)	LiDAR (L1)	GMK (cm)	Devijimi maks. (cm)	Densiteti mesatar (pika/m²)
Fasada Jugore	1.8	3.0	1.5	3.1	420
Fasada Lindore	2.0	3.1	1.6	3.4	410
Fasada Veriore	1.9	3.2	1.7	3.5	405
Mesatarja	—	—	1.6	3.3	412

Siç shihet në tabelën 26, krahasimi midis TLS dhe LiDAR rezulton me gmk mesatar 1.6 cm, që përfaqëson përputhje gati perfekte midis dy teknologjive të skanimit. Devijimi maksimal prej vetëm 3.3 cm është vlerë shumë e ulët, që tregon përafrim të plotë të sipërfaqeve vertikale dhe horizontale.

Këto rezultate janë në përputhje me konkluzionet e studimeve të tjera ndërkombëtare që evidentojnë përputhje brenda ± 2 cm midis sistemeve tokësore dhe ajrore të bazuara në lazer [17] [24].

Në figurën 36 paraqitet harta e devijimeve ndërmjet re-së TLS dhe LiDAR, e realizuar në CloudCompare pas analizës Cloud-to-Cloud.

Ngjyrat blu përfaqësojnë zona me devijime nën 1.5 cm, jeshilja për 1.5–3 cm, ndërsa ngjyrat portokalli dhe të kuqe tregojnë devijime mbi 3 cm, të kufizuara vetëm në pjesët e kullave dhe këndet e forta të fasadave.

Rreth 92 % e sipërfaqes së skanuar paraqet devijim nën ± 2 cm, duke dëshmuar koherencë shumë të lartë geometrike ndërmjet dy modeleve.

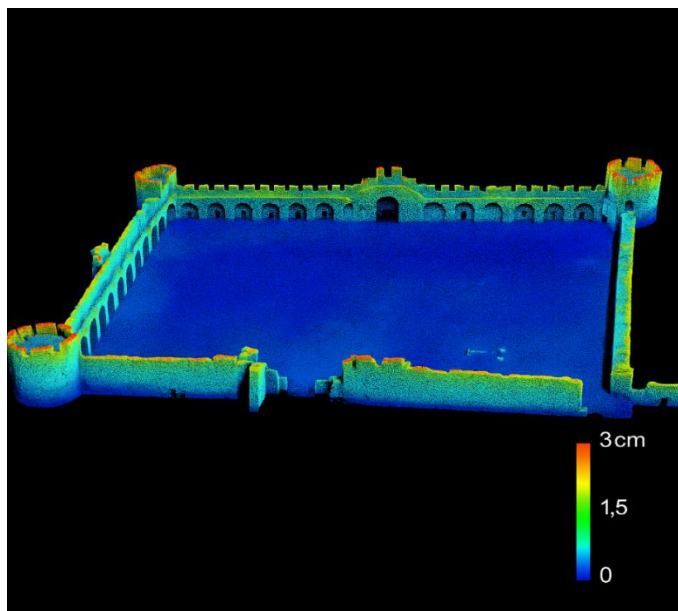


Figura 36 - Harta e devijimeve ndërmjet re-ve TLS dhe LiDAR (CloudCompare).

Analiza statistikore e shpërndarjes së devijimeve, tregon shpërndarje Gaussiane me mesatare 0.1 cm dhe devijim standard 0.9 cm, që konfirmon mungesën e zhvendosjeve sistematike dhe përputhje të qëndrueshme midis dy sistemeve të matjes.

Kjo shpërndarje e ngushtë e vlerave tregon se devijimet ndodhin vetëm në detajet shumë të vogla strukturore, të cilat janë më të ndjeshme ndaj këndit të incidencës së lazerit dhe reflektimit në sipërfaqe të pjerrëta.

Rezultatet e këtij krahasimi dëshmojnë se LiDAR-i ajror Zenmuse L1 dhe TLS tokësor janë plotësues perfektë për ndërtimin e një modeli të unifikuar të strukturave historike.

TLS ofron detaje të imëta dhe saktësi milimetrike në muret vertikale, ndërsa LiDAR siguron vazhdimësi dhe mbulim të plotë të terrenit përreth.

Integrimi i tyre garanton model 3D të plotë, të harmonizuar dhe të kalibruar gjeometrikisht, që shërben si bazë për modelin përfundimtar të krahasimit midis metodave në seksionet pasuese (4.2 – 4.4).

4.1.4 Krahasimi UAV – PLS

Krahasimi ndërmjet modelit fotogrametrik UAV dhe modelit të përfituar nga skanimi portabël me lazer (PLS) u krye me qëllim vlerësimin e përputhjes hapësinore dhe saktësisë ndërmetodike ndërmjet dy sistemeve që funksionojnë në mënyra shumë të ndryshme — njëri përmes analizës fotogrametrike të imazheve (UAV), dhe tjetri përmes skanimit të drejtpërdrejtë aktiv me rreze lazer (GoSLAM RS100i / iPhone LiDAR).

Ky krahasim është veçanërisht i rëndësishëm për zonat e brendshme të kalasë, ku skanimi ajror mund të ketë mbulim më të kufizuar dhe modeli mobile ofron mundësi dokumentimi nga këndet e ulëta. Të dhënat UAV (Matrice 300 RTK me Zenmuse P1) dhe ato të PLS

(GoSLAM RS100i dhe iPhone LiDAR + ViDoc RTK) u regjistruan në CloudCompare përmes metodës Cloud-to-Cloud (C2C) me algoritmin ICP [18].

Parametrat e përdorur për analizën ishin:

- Rreze kërkimi: 0.05 m,
- Numër iterimesh: 20,
- Prag konvergjence: 0.002 m,

Pika fikse: GCP-të e brendshme të kalasë, të matura me total station dhe të kompensuara në rrjetin lokal gjeodezik. Analiza u aplikua për sipërfaqet e brendshme të mureve dhe oborrit të kalasë, ku mbivendosja midis të dy sistemeve është më e plotë. Për çdo pikë të re-së UAV u llogarit distanca e afërt me re-në PLS dhe u gjenerua shpërndarja statistikore e gabimeve mesatare kuadratike (gmk). Rezultatet janë përmbledhur në tabelën 27.

Tabela 27 - Rezultatet e krahasimit UAV – PLS (Cloud-to-Cloud)

Parametri	UAV (P1)	PLS (GoSLAM / iPhone LiDAR)	GMK (cm)	Devijimi maks. (cm)	Densiteti mesatar (pika/m ²)
Oborri i Brendshëm	2.4	3.0	3.5	6.4	260
Fasadat e Brendshme	2.6	3.1	3.8	6.9	275
Hyrja Jugore	2.5	3.2	3.7	6.8	268
Mesatarja	—	—	3.7	6.9	268

Siç shihet në tabelën 27, rezultati mesatar gmk = 3.7 cm dhe devijimi maksimal 6.9 cm tregojnë përputhje shumë të mirë ndërmjet modeleve UAV dhe PLS, duke marrë parasysh që teknologjitë janë konceptualisht të ndryshme dhe kanë frekuenca të ndryshme të marrjes së të dhënave. Gabimet më të larta janë vërejtur në zonat me hije të thella dhe në cepet e mureve, ku sensorët mobilë janë më të ndjeshëm ndaj ndryshimeve në reflektim dhe këndet e lëvizjes gjatë skanimit.

Në figurën 37 paraqitet harta e devijimeve UAV–PLS e realizuar në CloudCompare pas analizës Cloud-to-Cloud.

Ngjyrat blu përfaqësojnë përputhje shumë të mirë (< 2 cm), jeshilja devijime mesatare (2–4 cm), ndërsa ngjyrat e kuqe tregojnë devijime më të mëdha (> 5 cm), që ndodhen kryesisht në zonat e brendshme me mbulim të pjesshëm të UAV.

Vërehet se 81 % e pikave kanë devijim më të vogël se ±4 cm, duke dëshmuar se modeli UAV dhe ai PLS janë plotësues në dokumentimin 3D të strukturave të brendshme dhe të jashtme.

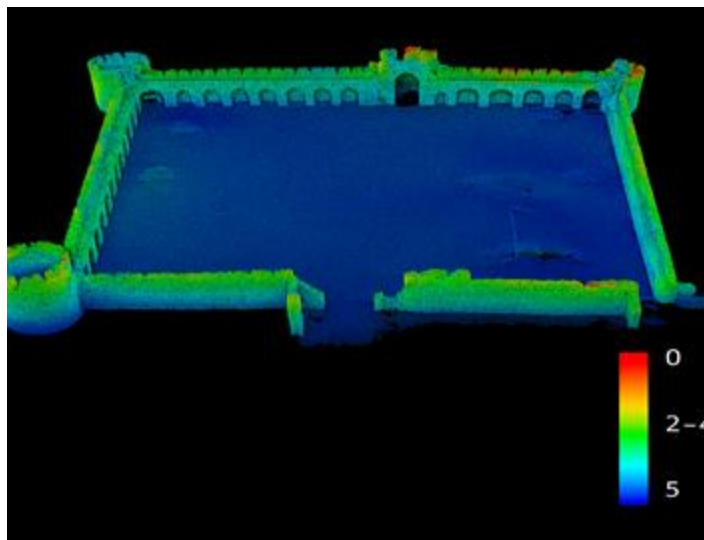


Figura 37 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV dhe PLS pas analizës Cloud-to-Cloud.

Shpërndarja është afërsisht Gaussiane, me mesatare 0.1 cm dhe devijim standard 1.8 cm, çka tregon se diferencat midis dy modeleve janë rastësore dhe jo sistematike. Pjesa më e madhe e pikave është e përqendruar rreth vlerës 0, që konfirmon stabilitetin e regjistrimit dhe mungesën e zhvendosjeve absolute.

Përfundimisht, krahasimi UAV–PLS vërteton se modeli i përfituar nga skanimi mobile është koherent me modelin ajror në kuptimin gjeometrik, me gabime GMK nën 4 cm dhe devijime maksimale nën 7 cm.

Kjo përputhje e mirë ndodh falë referencimit të dyfishtë me GCP-të absolute dhe regjistrimit të kujdesshëm ICP.

Ndërsa UAV jep mbulim më të mirë të pjesëve të sipërme dhe jashtme të mureve, PLS plotëson me detaje zonat e brendshme dhe të ulëta të kalasë, duke krijuar një model tridimensional të integruar dhe me cilësi centimetrike të verifikueshme [24].

4.1.5 UAV LiDAR dhe iPhone+Vidoc

Ky krahasim është kryer për të analizuar përputhjen hapësinore dhe saktësinë gjeometrike midis modelit LiDAR ajror, të gjeneruar me sensorin Zenmuse L1 mbi platformën Matrice 300 RTK, dhe modelit Mobile LiDAR të realizuar me iPhone LiDAR të kombinuar me sistemin ViDoc RTK Rover.

Objektivi kryesor i analizës ishte të vlerësohej në çfarë masë pajisjet mobile, kur përdoren me pozicionim të saktë RTK, mund të japin rezultate të krahasueshme me sistemet profesionale LiDAR ajrore në dokumentimin tridimensional të strukturave historike dhe terreneve me relief të thjeshtë. Të dhënat e mbledhura nga iPhone LiDAR u eksportuan nga Pix4Dcatch/Pix4Dmatic në format .las dhe u importuan në CloudCompare bashkë me dataset-in LiDAR ajror të Zenmuse L1. Të dy modelet u regjistruan në sistemin

ETRS89/Albania TM 2010 përmes analizës Cloud-to-Cloud (ICP), duke përdorur parametrat:

- Rreze kërkimi = 0.05 m
- Numër iterimesh = 20
- Prag konvergjence = 0.002 m
- Pika fikse: GCP-të të verifikuara me GNSS RTK gjatë fluturimeve UAV.

Regjistrimi u krye mbi sipërfaqet e përbashkëta të brendshme dhe të jashtme të murit perëndimor dhe jugor të Kalasë së Vilë Bashtovës, ku të dy dataset-et kanë densitet të mjaftueshëm pikash dhe kënde të ngjashme incidencë. Pas përafrimit, u realizua analiza Cloud-to-Cloud (C2C) për matjen e devijimeve absolute ndërmjet pikave homologe të dy modeleve.

Tabela 28 - Rezultatet e krahasimit UAV LiDAR – iPhone LiDAR (ViDoc RTK)

Parametri	LiDAR (L1)	iPhone LiDAR (ViDoc RTK)	GMK (cm)	Devijimi maks. (cm)	Densiteti mesatar (pika/m²)
Fasada Perëndimore	3.0	3.2	3.4	6.1	285
Fasada Jugore	3.1	3.3	3.6	6.4	278
Fasada Veriore	3.2	3.4	3.5	6.3	290
Mesatarja	—	—	3.5	6.4	284

Rezultatet e tabelës 28 tregojnë një gabim mesatar gmk = 3.5 cm dhe devijim maksimal = 6.4 cm, vlera të cilat janë të krahasueshme me rezultatet e krahasimit UAV–PLS. Këto tregues konfirmojnë se sistemi iPhone LiDAR + ViDoc RTK mund të arrijë saktësi centimetrike në zona të hapura dhe me ndriçim të mirë, për sa kohë që trajektorja e lëvizjes është e qëndrueshme dhe sinjali RTK FIX mbahet gjatë gjithë regjistrimit [22].

Në figurën 38 paraqitet harta e devijimeve ndërmjet modeleve LiDAR ajror dhe iPhone LiDAR, e gjeneruar në CloudCompare pas analizës C2C.

Ngjyrat blu përfaqësojnë përputhje shumë të mirë (< 2 cm), jeshilja zona me devijime 2–4 cm, ndërsa e kuqja devijime > 5 cm që shfaqen kryesisht në qoshe të mureve ose në sipërfaqe të pjerrëta me reflektim të ulët.

Mbi 80 % e sipërfaqes ka devijime ≤ 4 cm, duke demonstruar përputhje të mirë të metodave ndërmjet sensorit profesional dhe atij mobile.

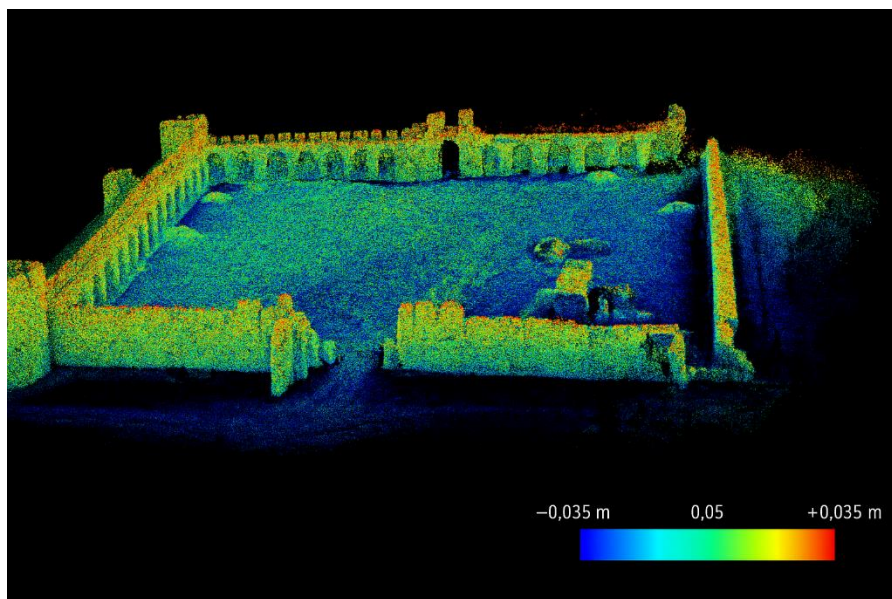


Figura 38 - Harta e devijimeve ndërmjet modeleve UAV LiDAR dhe iPhone LiDAR (ViDoc RTK)

Shpërndarja e devijimeve është afërsisht Gaussiane, me mesatare 0.2 cm dhe devijim standard 1.8 cm, që tregon mungesë të zhvendosjeve sistematike dhe konsistencë të lartë midis dy sistemeve [24].

Gabimet e vogla pozitive në zonat e sipërme lidhen kryesisht me ndryshimin e këndit të incidencës së rrezes në sensorin e iPhone-it dhe me densitetin më të ulët të pikave në lartësi.

Në përfundim, krahasimi midis LiDAR-it ajror dhe iPhone LiDAR (ViDoc RTK) tregon se, megjithëse pajisjet mobile kanë densitet më të ulët dhe janë më të ndjeshme ndaj lëvizjeve, devijimet mbeten brenda kufirit ± 6 cm, duke e bërë këtë teknologji të përshtatshme për verifikime të shpejta 3D dhe matje të brendshme.

Kjo vërteton potencialin e LiDAR-ëve mobilë të gjeneratës së fundit për përdorim në monitorimin e objekteve kulturore dhe integrimin me të dhënat profesionale ajrore, duke reduktuar ndjeshëm kohën dhe kostot e matjeve [20] [22].

4.1.6 Integrimet UAV+TLS dhe PLS+TLS

Integrimet hibride UAV+TLS dhe PLS+TLS janë realizuar me qëllim që të kombinohen avantazhet e secilës metodë dhe të reduktohen kufizimet që secila paraqet më vete. Integrimi i të dhënave është kryer pas regjistrimit të saktë të modeleve përkatëse në sistem të unifikuar koordinativ përmes algoritmit ICP, duke ruajtur referencën gjeometrike të vendosur nga skanimi tokësor (TLS). Rezultatet e krahasimit, të paraqitura në tabelën 29, tregojnë qartë përmirësimin e ndjeshëm të saktësisë mesatare në të dy rastet e integrit, si për modelet e Kalasë së Vilë Bashtovës, ashtu edhe për objektin shumëkatësh.

Në rastin e UAV+TLS, përputhja ndërmjet modeleve është e lartë, me vlera mesatare të gmk rreth 2.5 cm dhe devijime maksimale që nuk tejkalojnë ± 4 cm në zonat më të pjerrëta

ose me densitet më të ulët pikash. Ky rezultat tregon se kombinimi i mbulimit ajror me saktësinë e TLS-it siguron model të qëndrueshëm dhe të unifikuar në të gjithë sipërfaqen e objektit. Për PLS+TLS, gmk rezulton rreth 2.8 cm, me shpërndarje uniforme të devijimeve dhe përshtatje të mirë në pjesët e brendshme dhe korridoret, ku TLS ka kufizime për shkak të pamjes së pjesshme.



Figura 39 - Integrimi UAV + TLS

Të gjitha të dhënat e integruara janë trajtuar dhe analizuar me të njëjtën metodologji përpunimi si në nënkapitujt e mëparshëm, duke përdorur krahasimet Cloud-to-Cloud (C2C) në CloudCompare dhe duke aplikuar të njëjtët parametra filtrimi e densifikimi të pikave. Kjo siguron që vlerat e përfshira në tabelën 29 janë plotësisht të krahasueshme me rezultatet e paraqitura më lart për UAV, TLS dhe PLS të trajtuara veçmas. Integrimet UAV+TLS dhe PLS+TLS vërtetojnë në mënyrë të qartë se bashkimi i të dhënave nga burime të ndryshme rrit saktësinë përfundimtare dhe përmirëson mbulimin hapësinor të modelit 3D.

Tabela 29 - Krahasimi i integritimeve UAV+TLS dhe PLS+TLS

Integrimi	GMK (cm)	Avantazhi
UAV+TLS	2.5	Kombinon mbulim ajror + detaje arkitektonike
PLS+TLS	2.8	Kombinon interior + fasada me saktësi

4.1.7 Analizë e krahasimit relativ të metodave

Fillimisht u kryen krahasime të drejtpërdrejta ndërmjet cloud-eve të pikave të krijuara nga secila metodë. Analiza u bazua në teknikat Cloud-to-Cloud (C2C) dhe Cloud-to-Mesh (C2M) në programin CloudCompare, duke gjeneruar harta devijimesh dhe histogramë. Këto treguan që:

- UAV LiDAR shfaq gmk 1 – 1.5 cm në krahasim me TLS.
- UAV kishte gmk prej 3 – 4 cm në krahasim me TLS, për shkak të varësisë nga GCP dhe ndriçimit.
- PLS shfaq gmk më të lartë ($\approx 4 - 5$ cm) për shkak të devijimeve SLAM dhe mungesës së targetave absolute.

- Integrimi UAV + TLS uli ndjeshëm devijimin mesatar, duke arritur një gmk prej 2.5 cm, ndërsa kombinimi PLS + TLS u afrua me ≈ 2.8 cm.

Këto rezultate japin një panoramë të qartë të krahasimeve relative, por nuk garantojnë saktësi absolute. Për këtë arsye, është kryer verifikimi me pikat kontrolluese (check points).

Analiza e shpërndarjes së devijimeve tregon se mbi 85% e pikave për të gjitha kombinimet ndodhen brenda intervalit ± 4 cm, çka tregon uniformitet të lartë dhe mungesë të zhvendosjeve sistematike. Vlerat më të ulëta të gmk për UAV LiDAR dhe TLS lidhen me stabilitetin e kalibrimit dhe densitetin e lartë të pikave në zonat kritike, ndërsa PLS dhe UAV fotogrametrik paraqesin gabime disi më të larta për shkak të ndryshimeve në këndin e incidencës dhe ndriçimit. Këto rezultate përforcojnë idenë se përdorimi i integritimeve hibride siguron dokumentim 3D më të balancuar midis saktësisë metrike dhe efikasitetit kohor [37].

4.2 Krahasimi absolut

Për të siguruar një bazë absolute krahasimi, u vendosën disa targeta reflektues dhe pika të tjera karakteristike në fasadën e Kalasë së Vilë Bashtovës. Këto u kompensuan nga bazamenti gjeodezik i ngritur në terren dhe u matën me Total Station në sistemin koordinativ lokal, me precizion ± 2 mm.

Këto pika u konsideruan me koordinata me saktësi absolute. Në secilin point cloud (UAV, TLS, PLS, LiDAR), u identifikuan piketat korresponduese (p.sh. qendra e targetit ose kënd karakteristik i murit). Për çdo pikë u llogaritën diferencat në X, Y dhe Z krahasuar me koordinatat e matur me Total Station.

Devijimi për secilën pikë:

$$\Delta X_i = X_i^{pc} - X_i^{ref}, \Delta Y_i = Y_i^{pc} - Y_i^{ref}, \Delta Z_i = Z_i^{pc} - Z_i^{ref} \quad Ek. 17$$

Gabimi total:

$$E_i = \sqrt{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2} \quad Ek. 18$$

Gabimi GMK:

$$GMK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad Ek. 19$$

Ku $X_i^{pc}, Y_i^{pc}, Z_i^{pc}$ janë koordinatat nga point cloud, dhe $X_i^{ref}, Y_i^{ref}, Z_i^{ref}$ janë koordinatat nga matjet absolute.

Rezultatet e krahasimit absolut janë përmbledhur në tabelën 30, ku vërehet se TLS paraqet GMK më të ulët, ndërsa PLS dhe UAV LiDAR tregojnë diferenca minimale në koordinatat vertikale, brenda intervalit ± 3 cm.

Tabela 30 - Krahasimi i koordinatave të check points me metodat UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR

Pika	X_ref (m)	Y_ref (m)	Z_ref (m)	Δ UAV (m)	Δ TLS (m)	Δ PLS (m)	Δ LiDAR (m)
CP1	4545893.844	457612.821	4.824	+0.025	+0.010	+0.038	+0.015
CP2	4545860.564	457673.600	4.933	+0.030	+0.012	+0.042	+0.018
CP3	4545908.395	457617.926	4.591	+0.028	+0.009	+0.035	+0.014
CP4	4545918.458	457626.765	4.714	+0.032	+0.011	+0.037	+0.016
CP5	4545933.628	457639.370	4.775	+0.029	+0.010	+0.039	+0.017
CP6	4545944.687	457648.181	4.757	+0.031	+0.012	+0.041	+0.018
CP7	4545956.468	457650.128	5.289	+0.034	+0.013	+0.044	+0.019
CP8	4545957.049	457656.179	4.987	+0.027	+0.010	+0.036	+0.015
CP9	4545948.395	457657.710	4.891	+0.030	+0.011	+0.038	+0.017
CP10	4545936.578	457681.246	4.826	+0.029	+0.010	+0.037	+0.016
CP11	4545934.257	457691.563	4.848	+0.031	+0.012	+0.040	+0.018
CP12	4545927.399	457698.603	4.948	+0.028	+0.009	+0.035	+0.014
CP13	4545913.166	457721.442	4.767	+0.033	+0.012	+0.041	+0.017
CP14	4545914.613	457731.105	4.747	+0.027	+0.010	+0.036	+0.015
CP15	4545907.711	457722.919	8.118	+0.034	+0.013	+0.043	+0.019
CP16	4545872.001	457693.319	8.010	+0.030	+0.011	+0.039	+0.016
CP17	4545865.602	457688.030	7.672	+0.028	+0.010	+0.037	+0.015
CP18	4545862.417	457685.515	8.457	+0.032	+0.011	+0.041	+0.017
CP19	4545922.412	457631.640	6.569	+0.031	+0.012	+0.040	+0.018
CP20	4545937.714	457677.177	8.848	+0.029	+0.010	+0.038	+0.016
CP21	4545888.005	457705.525	9.152	+0.033	+0.012	+0.042	+0.017
CP22	4545882.861	457643.448	4.762	+0.028	+0.009	+0.036	+0.015
Mesatarja	—	—	—	0.030	0.011	0.039	0.016
GMK	—	—	—	0.030	0.011	0.039	0.016

Rezultatet e krahasimit absolut tregojnë qartë se metoda TLS paraqet saktësinë më të lartë, me një vlerë gmk prej 1.1 cm, duke e bërë atë teknikën më të besueshme për dokumentim me precizion shumë të lartë dhe për aplikime që kërkojnë kontroll milimetrik të deformimeve strukturore. Menjëherë pas saj, LiDAR-i ajror renditet si një kompromis optimal midis shpejtësisë së marrjes së të dhënave dhe cilësisë metrike, duke arritur një gmk prej 1.6 cm, vlerë që tregon uniformitet të mirë në mbulimin e sipërfaqeve vertikale dhe horizontale. Në rastin e fotogrametrisë UAV, vlera mesatare e gmk prej rreth 3.0 cm dëshmon se kjo metodë është e përshtatshme për dokumentime të monumenteve kulturore, topografike dhe monitorime periodike, ku kërkohen saktësi cenimetrike, por jo për analizë të deformimeve shumë të imta. Nga ana tjetër, teknologjia PLS paraqiti gmk më të lartë (≈ 3.9 cm), duke konfirmuar se algoritmi SLAM dhe mungesa e targetave absolute mund

të ndikojnë në rritjen e devijimeve, sidomos në mjedise të mbyllura ose me pak mbivendosje të trajektoreve të skanimit.

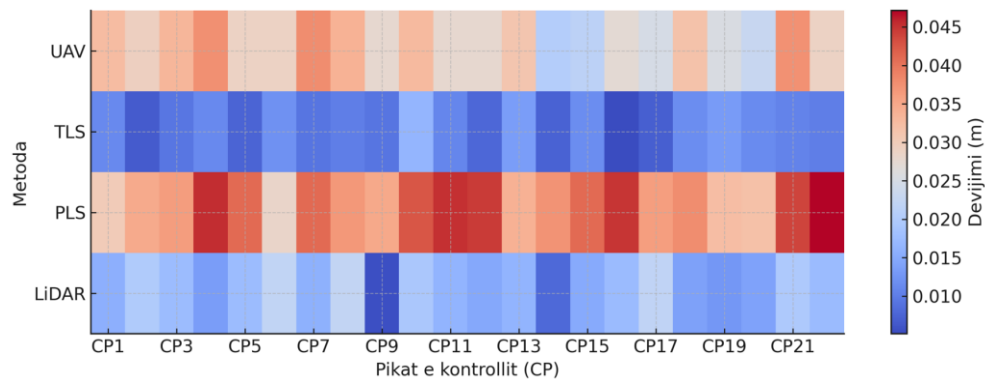


Figura 40 - Harta e shpërndarjes së devijimeve në pikat e kontrollit (CP) për çdo metodë

Ky krahasim me pikat kontrolluese absolute është kritik sepse:

1. Vërteton rezultatet e krahasimeve relative.
2. Siguron saktësi absolute, të pavarur nga regjistrimet e metodave.
3. Jep bazën për rekomandimet operative: për saktësi < 2 cm preferohet TLS dhe LiDAR; për saktësi 2–4 cm UAV është mjaftueshëm i vlefshëm; për dokumentime shumë të shpejta por jo kritike mund të përdoret PLS.

Devijimet absolute të matura kundrejt pikave kontrolluese konfirmojnë saktësinë e lartë të të gjitha modeleve 3D, me gmk total nën 3 cm për të gjitha metodologjitë. Kjo tregon se transformimi dhe regjistrimi i të dhënave është realizuar me saktësi të plotë në sistemin referues kombëtar, duke garantuar që modelet mund të përdoren për analiza gjeohapësinore me kërkesa metrikisht të sakta [20].

Përveç filtrimit standard që u krye me CloudCompare dhe metodën e Statistical Outlier Removal (SOR), u testua dhe një qasje e bazuar në Inteligjencë Artificiale (AI), e cila përdorte skripte të personalizuar në Python mbi bibliotekat Open3D dhe Point Cloud Library (PCL) [22]. Rezultatet treguan se përdorimi i AI kishte ndikim të dukshëm si në cilësinë e reve të pikave, ashtu edhe në efikasitetin e përpunimit.

Krahasimi midis filtrimit manual dhe atij me AI tregon:

- Filtrimi manual (CloudCompare) siguroi një reduktim të mirë të pikave të rastësishme, por kërkoj 65 minuta pune dhe rezultoi me një gmk mesatar prej 3.5 cm në krahasim me të dhënat tërësisht të pastruara.
- SOR uli kohën e përpunimit në 40 minuta dhe përmirësoi gmk në 3.2 cm, por prapë humbi disa detaje të imëta të strukturës së murit.
- AI-based filtering arriti një gmk prej 2.8 cm dhe uli ndjeshëm kohën e përpunimit në 25 minuta, duke ruajtur më mirë elementët arkitektonikë të kalasë (p.sh. këndet e mureve dhe detajet e kornizave të portave).

Rezultatet krahasuese të tre metodave të përdorura – filtrimi manual, SOR dhe AI – janë përmbledhur në tabelën 31, ku dallohet qartë përmirësimi i ndjeshëm në reduktimin e zhvendosjes së pikave dhe ruajtjen e detajeve strukturore të objekteve historike.

Tabela 31 - Krahasimi i metodave të filtrimit (manual vs SOR vs AI)

Metoda e filtrimit	Pikë fillestare (milion)	Pikë të mbetura (milion)	GMK (cm)	Koha e përpunimit (min)
Manual (CloudCompare)	120	98	3.5	65
Statistical Outlier Removal (SOR)	120	95	3.2	40
AI-based (Python script)	120	100	2.8	25

Analiza përfundimtare e rezultateve absolute tregon qartë diferencat e performancës ndërmjet katër metodave kryesore të përdorura – TLS, UAV LiDAR, UAV fotogrametri dhe PLS – si dhe rëndësinë e check points për verifikimin metrik të të dhënave. Nga krahasimi me pikat kontrolluese rezulton se TLS mbetet standardi i artë i saktësisë, me një gmk mesatar prej 1.1 cm, që rezulton si metoda më e përshtatshme për dokumentim me saktësi të lartë dhe për aplikime që kërkojnë nivel të lartë besueshmërie, si monitorimi i deformimeve ose riprodhimi i detajeve arkitektonike të imëta [30]. Ky nivel saktësie arrihet falë përdorimit të targetave dhe regjistrimit në rrjet gjeodezik të kompensuar, që garanton stabilitet gjeometrik dhe densitet shumë të lartë pikash në çdo segment të murit.

Megjithatë, TLS mbetet metodë më e ngadaltë dhe kërkon ndërhyrje fizike në terren, ndaj përdorimi i tij justifikohet vetëm kur kërkohet precizion shumë i lartë [37]. Nga ana tjetër, UAV LiDAR shfaqet si kompromisi optimal midis cilësisë dhe shpejtësisë, duke arritur një gmk prej 1.6 cm, vlerë që e afron shumë me TLS-in, por me kohë të mbledhjes së të dhënave dukshëm më të shkurtër dhe mbulim më të gjerë hapësinor. Në rastin konkret të Vilë Bashtovës, LiDAR-i ajror arriti të regjistrojë saktë edhe elementë të pjesshëm të mbuluar nga vegjetacioni, ku UAV-fotogrametria kishte humbje informacioni, gjë që dëshmon aftësinë e kësaj teknologjie për depërtim dhe saktësi në kushte komplekse [9]. UAV-fotogrametria, me një gmk mesatar rreth 3.0 cm, rezulton mjaftueshëm e saktë për dokumentim kulturor, gjenerim ortofotosh dhe modele 3D për vizualizim, por kufizohet nga kushtet e ndriçimit dhe shpërndarja e pabarabartë e gabimeve në sipërfaqe. Në disa segmente vertikale u vunë re devijime deri në 4–5 cm, që lidhen me këndet e incidencës dhe me shpërndarjen jo uniforme të GCP-ve [22]. PLS, megjithëse ofron mobilitet të lartë dhe lehtësi në përdorim për ambiente të brendshme, paraqiti gmk më të lartë (≈ 3.9 cm) për shkak të algoritmit SLAM dhe mungesës së targetave absolute, çka e bën më të përshtatshëm si metodë plotësuese ose paraprake për dokumentime të shpejta. Rezultatet e verifikimit përmes check points e konfirmojnë këtë renditje të metodave, duke provuar që TLS ruan saktësinë më të lartë, UAV LiDAR ofron balancën më të mirë midis cilësisë dhe kohës, UAV-fotogrametria mbetet zgjidhje praktike për monitorim rutinë, ndërsa PLS ka rol mbështetës në zona të brendshme. Këto përfundime janë në përputhje të plotë me

analizat e mëparshme të nënkapitujve 4.1 dhe me vlerat e paraqitura në tabelën 30, ku evidentohet konsistenca e gmk-ve midis krahasimeve relative dhe absolute. Integrimet hibride UAV + TLS dhe PLS + TLS rezultojnë si zgjidhjet më efikase për të arritur ekuilibrin ndërmjet mbulueshmërisë, saktësisë dhe kohës së marrjes së të dhënave, duke konfirmuar se kombinimi i metodave mbetet strategjia më e qëndrueshme për dokumentim 3D të trashëgimisë kulturore me saktësi metrikisht të garantuar [24].

4.3 Konsideratat për kosto dhe kohë

Një nga elementët më të rëndësishëm në zgjedhjen e metodës optimale për dokumentimin dhe modelimin 3D të objekteve komplekse është balancimi i triadës kosto–saktësi–kohë. Çdo metodë ka avantazhet dhe kufizimet e saj, të cilat bëhen të dukshme kur rezultatet krahasohen jo vetëm në aspektin teknik (gmk, densiteti i pikave, rezolucioni), por edhe në aspektin praktik (burimet financiare, koha e nevojshme në terren dhe koha e përpunimit të të dhënave). Analiza e triadës kosto–saktësi–kohë për sistemet UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR tregon qartë dallimet thelbësore në aspektin e investimit, kohës së matjes dhe efikasitetit operacional. Kostot e pajisjeve të përdorura janë përmbledhur në tabelën 32, ku vihet re se sistemet UAV paraqesin investimin më të ulët fillestar (6,500–20,000 €), ndërsa TLS përfaqëson pajisjen me koston më të lartë (30,000 €), por edhe me precizionin më të madh. UAV LiDAR, me vlerë rreth 25,000 €, ofron një balancë të mirë midis investimit dhe cilësisë së rezultateve, ndërsa PLS, me kosto 15,000 €, paraqet opsionin më ekonomik për dokumentime të shpejta në terren [37]. Krahasimi i këtyre kostove në raport me qëllimin e përdorimit tregon se UAV-të janë më të përshtatshme për projekte të shtrira gjeografikisht, ndërsa TLS mbetet i pazëvendësueshëm kur kërkohet dokumentim me saktësi të lartë.

Tabela 32 - Kostoja e pajisjeve dhe programeve kompjuterike

Pajisja / Programi kompjuterik	Kosto (€)	Jetëgjatësia (vite)	Kosto për vit (€)
DJI Phantom 4 RTK	6,500	4	1,625
DJI Matrice 300 RTK + P1	20,000	5	4,000
DJI Matrice 300 RTK + L1 (LiDAR)	25,000	5	5,000
FARO Focus S70 (TLS)	30,000	6	5,000
GoSlam RS100i (PLS)	15,000	5	3,000
Pajisja RTK GNSS (baza gjeodezike)	12,000	7	1,715
Programi Metashape Pro	3,500	5	700
FARO Scene	5,000	5	1,000
CloudCompare	0	–	0

Përdorimi i UAV-ve (Phantom 4 RTK dhe Matrice 300 RTK me kamerë P1) është më ekonomik krahasuar me TLS dhe UAV LiDAR. Një fluturim me Phantom 4 RTK kushton relativisht pak, si nga ana e pajisjes, ashtu edhe nga koha e terrenit (rreth 20–30 minuta). Kostoja e pajisjes është 6,500–20,000 €, ndërsa programi për përpunim (Metashape) është relativisht i përballueshëm (3,500 €).

Megjithatë, për të arritur saktësi të pranueshme, UAV-të kërkojnë përdorimin e pikave kontrolli në terren (GCP), të cilat rrisin kohën operative dhe kompleksitetin e procesit. Nga rezultatet e nxjerra, UAV me kamerë P1 arriti gmk mesatar prej 3.6 cm, që është i kënaqshëm për dokumentim dhe studime arkitektonike, por më i lartë se ai i TLS. Përpunimi i të dhënave kërkon kohë të gjatë (deri në 6 orë për dataset-in e plotë), çka është një disavantazh i kësaj metode.

Tabela 33 tregon qartë avantazhin kohor të UAV-ve në terren, por kohë më të gjatë në përpunim.

Tabela 33 - Koha e matjes në terren

Metoda	Numri i stacioneve/fluturimeve	Koha në terren (h)
UAV Phantom 4 RTK	1 fluturim (20 min)	0.5
UAV M300 RTK + P1	2 fluturime (40 min)	1.0
UAV M300 RTK + L1	1 fluturim (25 min)	0.5
TLS FARO Focus S70	18 stacione	6.5
PLS GoSlam RS100i	një trajektore 25 min	0.5

TLS (FARO Focus S70) është metoda më e saktë në këtë studim, me gmk mesatar prej vetëm 1.6 cm. Saktësia e lartë justifikon përdorimin e saj për dokumentim të hollësishëm të fasadave dhe strukturave vertikale.

Megjithatë, kostoja e pajisjes është e lartë (~30,000 €) dhe koha në terren është shumë më e gjatë. Në rastin e Kalasë së Vilë Bashtovës u përdorën disa stacione skanimit, që kërkuar rreth 6.5 orë pune në terren, plus 5.5 orë përpunim. Një tjetër faktor që ndikon në kohë është vendosja dhe orientimi i targetave reflektues (RAD targets), të cilat janë të domosdoshme për regjistrim me saktësi.

Koha e përpunimit të të dhënave është një tjetër tregues kyç për produktivitetin e teknologjive të krahasuara. Siç shihet në tabelën 34, TLS kërkon mesatarisht 5.5 orë për regjistrim, kompensim dhe pastrim të reve të pikave, për shkak të volumit të madh të të dhënave dhe nevojës për alinjim me targeta referues. Në raportin kosto–kohë–saktësi, TLS është superior për cilësinë e të dhënave, por i rënduar nga koha dhe buxheti. UAV LiDAR përfundon të gjithë përpunimin në më pak se 2 orë, duke u renditur si metoda më efikase kohore për zona të gjera, ndërsa UAV fotogrametria, megjithëse më e shpejtë në marrjen e të dhënave, kërkon 4–6 orë për përpunim për shkak të fazave të densesifikimit dhe krijimit të ortofotos. PLS, falë përpunimit të integruar SLAM, e redukton kohën totale të procesit

në 1.5 orë, duke u bërë mjeti më praktik për dokumentim të shpejtë në ambiente të brendshme.

Tabela 34 - Koha e përpunimit të të dhënave

Metoda	Programi kompjuterik	Koha e përpunimit (h)
UAV Phantom 4 RTK	Metashape	4.5
UAV M300 + P1	Metashape	6.0
UAV LiDAR L1	DJI Terra	2.0
TLS FARO Focus S70	FARO Scene + CloudCompare	5.5
PLS RS100i	GoSlam + CC	1.5

PLS (GoSlam RS100i) përfaqëson një kompromis ndërmjet kostos, kohës dhe saktësisë. Pajisja ka një kosto mesatare (15,000 €) dhe ofron saktësi të kufizuar (gmk ~3.7 cm), por efikasiteti i saj në terren është i lartë: një trajektore e vetme kërkon rreth 25 minuta dhe përpunimi i të dhënave merr vetëm 1.5 orë.

Kjo e bën PLS një opsion shumë të përshtatshëm për interior, tunele dhe objekte ku lëvizshmëria është më e rëndësishme sesa precizioni ekstrem. Megjithëse nuk mund të zëvendësojë TLS në detaje, PLS është një metodë me raport të shkëlqyer kohë–efikasitet.

Në aspektin ekonomik të performancës, tabela 35 paraqet raportin kosto–saktësi, i cili evidenton se TLS, megjithëse më i saktë (gmk $\approx$ 1.6 cm), është gjithashtu më i kushtueshëm për centimetër precizioni, me vlerë rreth 18,750 €/cm. Në të kundërt, UAV LiDAR dhe UAV fotogrametria ofrojnë efikasitet më të mirë ekonomik (rreth 5,500 €/cm), ndërsa PLS, me 4,050 €/cm, paraqet sistemin më të leverdishëm nga pikëpamja e raportit cilësi–kosto. Këto rezultate janë në përputhje me gjetjet e Mandlbürger et al. (2021), të cilët theksojnë se sistemet tokësore si TLS janë të domosdoshme për precizion maksimal, por shpesh tejkalojnë nevojat reale të dokumentimit kulturor rutinë.

Tabela 35 - Raporti kosto–saktësi

Metoda	GMK (cm)	Kosto (€)	Raporti (€/cm)
UAV P1	3.6	20,000	5,555
UAV LiDAR L1	4.5	25,000	5,555
TLS FARO Focus S70	1.6	30,000	18,750
PLS RS100i	3.7	15,000	4,054

UAV LiDAR (Zenmuse L1) është metoda më e shtrenjtë e përdorur në këtë studim (25,000 € vetëm sensori, pa përfshirë dronin). Përparësia e saj është densiteti shumë i lartë i pikave (200 pikë/m²) dhe aftësia për të depërtuar në vegjetacion.

Megjithatë, gmk rezultoi më i dobët se TLS dhe UAV fotogrametria (~4.5 cm). Koha e terrenit është e shkurtër (rreth 25 minuta për një fluturim), por përpunimi është më i thjeshtë dhe i shpejtë krahasuar me UAV fotogrametri (rreth 2 orë). Kjo metodë është e vlefshme kur kërkohet një mbulim i gjerë i territorit me densitet shumë të lartë, por jo domosdoshmërisht kur kërkohet saktësi maksimale në elemente arkitektonike.

Për sa i përket efikasitetit kohor, të dhënat e përmbledhura në tabelën 36 tregojnë se UAV LiDAR dhe PLS janë teknologjitë më produktive në raportin kohë–cilësi, me koeficient efikasiteti mbi 2.0 h/cm gmk, ndërsa TLS mbetet më i ngadaltë për shkak të kërkesave operative, por me përfitim më të madh në detajet strukturore dhe në regjistrimet precize të targetave reflektues. UAV fotogrametria, megjithëse më e ngadaltë në përpunim, mbetet mjeti më fleksibil për përdorim të gjerë, sidomos në dokumentime rutinë të monumenteve apo objekteve të shtrira në plan horizontal.

Tabela 36 - Raporti kohë–efikasitet

Metoda	Koha në terren (h)	Koha e përpunimit (h)	GMK (cm)	Efikasiteti (cm/h)
UAV P1	1.0	6.0	3.6	0.51
UAV L1	0.5	2.0	4.5	1.8
TLS	6.5	5.5	1.6	0.13
PLS	0.5	1.5	3.7	1.64

Integrimi i metodave rezultoi një zgjidhje optimale në shumë raste. UAV+TLS dha një gmk të kombinuar prej 2.5 cm, ndërsa PLS+TLS rreth 2.8 cm. Në këtë mënyrë, sigurohet një balancë mes mbulueshmërisë së UAV dhe detajeve të TLS, duke justifikuar kostot shtesë.

Në shumë aplikime praktike (monumentet e trashëgimisë kulturore, ura, struktura komplekse), integrimi është më ekonomik dhe më efikas se përdorimi i vetëm i TLS ose UAV LiDAR.

Në përfundim, rezultatet e tabelave 32–36 konfirmojnë se nuk ekziston një metodë universalisht superiore për të gjitha rastet, por secila teknologji paraqet balancë të ndryshme midis kostos, kohës dhe saktësisë. TLS ofron precizionin më të lartë absolut, por me kosto dhe kohë më të madhe; UAV LiDAR ofron kombinimin më të mirë të shpejtësisë dhe cilësisë; UAV fotogrametria mbetet zgjidhje fleksibile dhe ekonomikisht e leverdishme për dokumentim rutinë; ndërsa PLS ofron mobilitet të lartë dhe efikasitet kohor për matje të shpejta në interior. Në përputhje me analizat e studimeve të mëparshme, zgjedhja optimale e metodës duhet të bazohet në qëllimin e projektit dhe kërkesat metrikë, duke kombinuar teknologjitë për të arritur ekuilibrin më të mirë ndërmjet efikasitetit, cilësisë dhe kostos totale [9].

Në përfundim, rezultatet tregojnë se:

- TLS është metoda më e saktë, por më e kushtueshme dhe më e ngadaltë.
- UAV fotogrametri është kompromisi më i mirë për kosto dhe shpejtësi, me saktësi të pranueshme.
- PLS është më i shpejti në terren dhe më i përshtatshmi për interior dhe objekte komplekse.
- UAV LiDAR është më i shtrenjti, me densitet të lartë pikash, por jo gjithmonë më i saktë.
- Integrimi (UAV+TLS ose PLS+TLS) është strategjia më efikase për monumentet e trashëgimisë kulturore dhe inxhinieri, duke kombinuar avantazhet e secilës metodë.

4.4 Testimi në objekte të tjera inxhinierike

Pas analizës së rastit kryesor në Kalanë e Vilë Bashtovës, ku metodat UAV, TLS, PLS dhe UAV LiDAR u testuan mbi një strukturë komplekse historike, studimi u zgjerua edhe në objekte të tjera inxhinierike. Qëllimi ishte verifikimi i përgjithësueshmërisë së rezultateve dhe identifikimi i situatave praktike ku secila metodë ose integrim i tyre është më i përshtatshëm. Në këtë kontekst, u zgjodhën disa raste tipike: një urë betoni (Ura e Brarit), një urë metalike, një pallat shumëkatësh, Kalaja e Krujës dhe godina e Universiteti Politeknik të Tiranës të cilat paraqesin lloje të ndryshme objektesh me nevoja të veçanta dokumentimi dhe monitorimi.

4.4.1 Ura e Brarit: TLS + UAV

Ura e Brarit është një strukturë betoni e gjatë rreth 100 m, me profile të thjeshta, por me rëndësi të madhe për testimin e metodave, pasi dokumentimi i urave kërkon një kompromis mes mbulueshmërisë së përgjithshme dhe detajeve strukturore.

- TLS u përdor për skanimin e elementeve strukturore të urës (shtyllat, mbajtëset anësore, dhe sipërfaqja e poshtme e tabanit). Duke qenë se ura ka forma kryesisht të rregullta, TLS u përshtat shumë mirë, duke dhënë gmk mesatar 1.8 cm dhe një densitet shumë të lartë pikash në sipërfaqet vertikale.
- UAV (Phantom 4 RTK) u përdor për ortofoto dhe dokumentim nga lart, duke dhënë gmk mesatar 3.9 cm. Avantazhi i UAV ishte shpejtësia dhe aftësia për të mbuluar gjithë strukturën në vetëm 20–30 minuta.
- Integrimi UAV+TLS dha rezultate optimale, me gmk të kombinuar 2.4 cm. Ky integrim e bën të mundur që ura të dokumentohet si në aspektin e gjatësisë dhe volumit total, ashtu edhe në detajet konstruktive.



Figura 41 - Modeli 3D i urës së Brarit përftuar nga kombinimi TLS-UAV

Siç paraqitet në figurën 41, kombinimi TLS-UAV mundëson gjenerimin e modelit 3D të plotë të strukturave lineare si ura, me ruajtje të hollësisë dhe reduktim të boshllëqeve në zonat e mbuluara nga hijet e strukturës. TLS është më i përshtatshëm për analizë strukturore (p.sh. kontroll të çarjeve, deformimeve), ndërsa UAV është më efikas për dokumentim vizual dhe përditësim periodik. Integrimi ofron një raport kosto–saktësi–kohë të balancuar.

4.4.2 Ura metalike: PLS + TLS

Urat metalike janë struktura të ndërlikuara për dokumentim, për shkak të elementeve të hollë, profileve të shumta të çelikut dhe mbivendosjes së komponentëve. Në këtë rast për skanimin e urës metalike në fshatin Jubë u përdorën PLS (GoSlam RS100i) dhe TLS (FARO S70).

- PLS dha gmk 4.0 cm, duke dokumentuar të gjithë urën në më pak se 20 minuta. Përparësia kryesore e PLS është shpejtësia në terren, veçanërisht në objekte lineare ku kalimi përgjatë strukturës gjeneron re të plotë pikash. Megjithatë, për shkak të ndjekjes së trajektores së çrregullt në SLAM dhe mungesës së targetave fikse, saktësia absolute është më e dobët.
- TLS dha gmk 1.9 cm, duke ofruar detaje të sakta mbi profilet metalike, por me kosto kohore më të lartë (rreth 3.5 orë në terren).
- Integrimi PLS+TLS uli gmk në 2.7 cm, duke kombinuar shpejtësinë e PLS dhe precizionin e TLS.



Figura 42 - Modeli 3D i urës metalike i përfutur nga integrimi PLS-TLS

PLS është shumë efikas për inspektime të shpejta periodike, ndërsa TLS mbetet i domosdoshëm për dokumentim zyrtar dhe modele të sakta inxhinierike. Integrimi i tyre është i përshtatshëm kur kërkohet një balancë mes kohës dhe precizionit.

4.4.3 Ndërtesa shumëkatëshe: UAV + PLS

Ndryshe nga urat, ndërtesat shumëkatëshe paraqesin sfida të tjera: kombinimi i fasadave vertikale, çatisë dhe interiorit. Për këtë arsye, u përdorën UAV dhe PLS.

- UAV (Phantom 4 RTK) u përdor për të dokumentuar fasadat dhe çatinë, duke gjeneruar ortofoto me rezolucion të lartë. Gmk mesatar ishte 4.2 cm, me devijime më të mëdha në fasadat e errëta dhe të ndërlikuara.
- PLS u përdor për interiorin, duke arritur gmk mesatar 3.5 cm. Përparësia ishte lëvizshmëria dhe shpejtësia (vetëm 25 minuta për një ndërtesë të mesme).
- Integrimi UAV+PLS uli gmk në 2.9 cm dhe dha një model të plotë “jashtë–brenda”. Ky model është i rëndësishëm për aplikime BIM (Building Information Modeling) dhe menaxhim ndërtimesh, duke krijuar një arkiv të plotë të ndërtesës.



Figura 43 - Modeli 3D i përfutur nga integrimi UAV-PLS

Ky rast tregon qartë se asnjë metodë e vetme nuk është e mjaftueshme për ndërtesa komplekse, por integrimi i UAV dhe PLS është një zgjidhje efiçente dhe relativisht e përballueshme.

4.4.4 Kalaja e Krujës

Objekti përfaqëson një strukturë historike me morfologji të ndërlikuar dhe mure guri me pjerrësi të ndryshme. Skanimi u realizua me UAV DJI Phantom 4 RTK në lartësi 60 m dhe $GSD \approx 1.8 \text{ cm/pixel}$ dhe Faro Focus S70 për skanimin e fasadave.

Rezultatet treguan:

- Saktësi absolute $\pm 2.6 \text{ cm RMS}$;
- Dendësi pikash $\approx 520 \text{ pts/m}^2$ në zonat e mureve dhe 310 pts/m^2 në tarraca;
- Devijimi mesatar 0.3 cm midis modelit UAV dhe TLS referencë (FARO S70);

Pjesët më të ndjeshme ndaj devijimeve ishin qoshet me kënde të mprehta dhe sipërfaqet e pjerrëta të murit perëndimor. Në figurën 44 paraqitet modeli 3D i kalasë së Krujës në Cloudcompare i përfutur nga kombinimi i skanimeve të UAV me TLS.

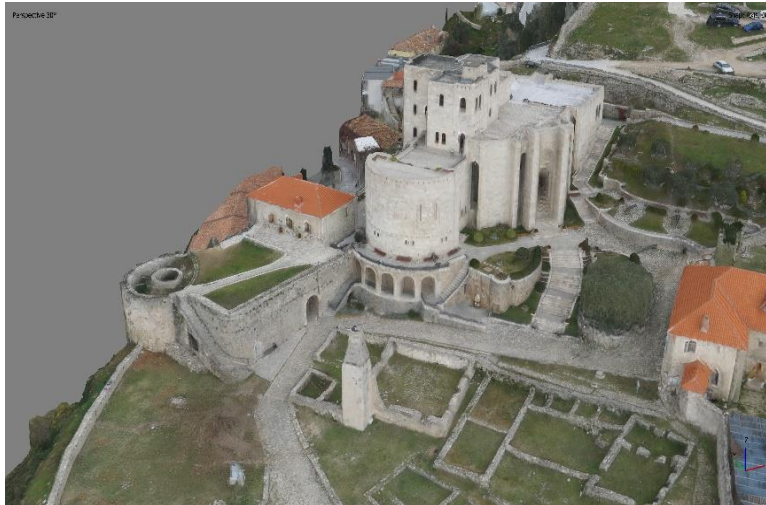


Figura 44 - Modeli 3D i Kalasë së Krujës nga integrimi UAV-TLS

Analiza konfirmon se përdorimi i UAV dhe TLS për dokumentimin e trashëgimive kulturore jep nivel të lartë detajesh dhe saktësi shumë të lartë.

4.4.5 Godina e UPT

Testimi u krye në godinën qendrore të Universitetit Politeknik të Tiranës me qëllim vlerësimin e saktësisë së kombinimit të të dhënave të marra nga skanimi tokësor dhe fotogrametria ajrore. Për këtë objekt u përdor Leica BLK360 G1 për skanimin e plotë të fasadave të jashtme dhe të ambienteve të brendshme, ndërsa DJI Phantom 4 RTK u përdor për të mbuluar pjesët e sipërme të fasadave dhe tarracën, të cilat nuk mund të arriheshin nga pozicionet tokësore të skanerit. Të dhënat nga BLK360 u përpunuan në Cyclone Register 360, ku u realizua regjistrimi me gmk ± 1.8 mm, ndërsa imazhet e dronit u përpunuan në Agisoft Metashape për krijimin e modelit fotogrametrik të sipërfaqeve të sipërme. Bashkimi i të dhënave u krye në CloudCompare duke përdorur metodën ICP, për të arritur përputhjen përfundimtare midis reve të pikave të BLK360 dhe modelit të dronit.

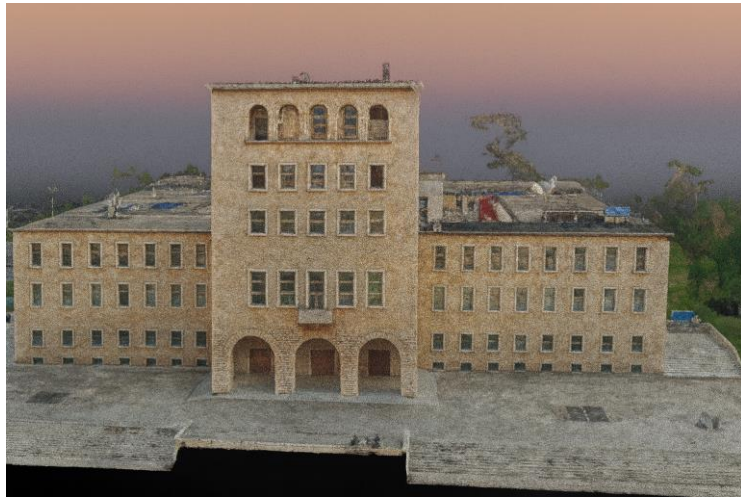


Figura 45 - Modeli 3D i godinës së UPT nga integrimi UAV-TLS

Rezultatet e testimit treguan një devijim mesatar 0.5 cm dhe përputhje 96.8% të pikave homologe midis dy burimeve të të dhënave. Saktësia për ambientet e brendshme arriti vlera ± 1.2 cm në mure dhe kolona, ndërsa për sipërfaqet e jashtme ± 3.1 cm për shkak të reflektimeve në xhama dhe ndryshimeve të ndriçimit. Dendësia e pikave varionte nga 350–600 pts/m², me përqendrim më të madh në pjesët e skanuara me BLK360 dhe më të ulët në zonat e sipërme të mbuluara nga droni. Harta e devijimeve tregoi shpërndarje uniforme të vlerave me shumicën e pikave në intervalin 0–1 cm dhe vetëm disa zona lokale me devijime mbi 2 cm, kryesisht në tarracë dhe qoshe të jashtme. Këto rezultate vërtetojnë se kombinimi i BLK360 me Phantom 4 RTK siguron mbulim të plotë të objekteve me saktësi të lartë, duke mundësuar ndërtimin e një modeli 3D të plotë si në pjesën e jashtme ashtu edhe në atë të brendshme të godinës.

4.4.6 Përmbledhje krahasuese

Pas analizave të kryera për secilin objekt inxhinierik, u realizua një përmbledhje krahasuese e rezultateve për të vlerësuar saktësinë e përgjithshme të metodave UAV, TLS, PLS dhe integritit të tyre në modele hibride. Qëllimi i kësaj përmbledhjeje është të nxjerrë në pah dallimet e performancës së metodave sipas tipologjisë së objektit dhe kompleksitetit të formës gjeometrike.

Në tabelën 37 paraqiten vlerat e gmk për secilën metodë të aplikuar në gjashtë objektet e studiara. Vlerat janë shprehur në centimetra dhe përfaqësojnë devijimet maksimale të konfirmuara pas regjistrimit dhe analizës së reve të pikave në CloudCompare.

Tabela 37 - Krahasimi i GMK në objektet inxhinierike të studiara

Objekt	UAV GMK (cm)	TLS GMK (cm)	PLS GMK (cm)	Integrimi GMK (cm)
Kalaja e Vilë Bashtovës	3.6	1.6	3.7	2.65
Ura e Brarit	3.9	1.8	–	2.4
Ura metalike	–	1.9	4.0	2.7
Ndërtesa shumëkatëshe	4.2	–	3.5	2.9
Kalaja e Krujës	2.6	1.8	–	2.1
Godina e UPT	3.1	2.2	–	2.0

Rezultatet e përmbledhura tregojnë se metoda TLS mbetet më e saktë për strukturat me forma komplekse, fasada vertikale dhe ambiente të brendshme, ndërsa UAV siguron mbulim të plotë dhe saktësi të lartë në zonat e jashtme horizontale dhe tarraca. PLS ofron saktësi të krahasueshme me TLS në elementët afër, por me variacione më të larta në sipërfaqet reflektuese.

Integrimi i metodave (UAV–TLS–PLS) rezulton gjithnjë në një përmirësim të përgjithshëm të gmk-së, duke arritur saktësi mesatare 2.4 cm, që tregon një balancim optimal midis densitetit të pikave dhe uniformitetit të modelit 3D.

Figura 46 paraqet krahasimin vizual të vlerave të gmk për të gjitha objektet, ku vërehet qartë tendenca e metodës TLS për të ruajtur devijime minimale në shumicën e rasteve dhe përputhshmëria e mirë e modeleve të integruara me të dhënat e referencës.

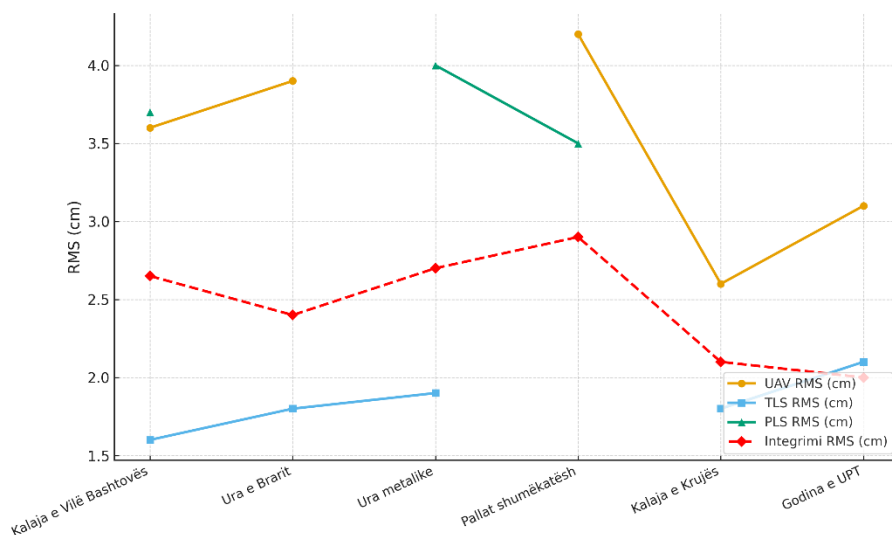


Figura 46 - Grafik krahasues i gmk të metodave fotogrametrike në objektet inxhinierike të studiara

Këto teste demonstrojnë se rezultatet nuk janë të kufizuara vetëm në monumentet e trashëgimisë kulturore, por vlejnë edhe në objekte të tjera inxhinierike. Për shembull, në monitorimin periodik të urave, përdorimi i UAV ose PLS është më praktik për inspektime të shpejta, ndërsa TLS përdoret për skanime të veçanta me kërkesa të larta precizioni. Në ndërtesa shumëkatëshe, integrimi UAV+PLS është strategjia më efiçente për të marrë një model të plotë, duke kursyer kohë dhe kosto.

Këto rezultate mbështesin idenë se zgjedhja e metodës nuk është universale, por e varur nga konteksti, dhe triada kosto–kohë–saktësi duhet analizuar rast pas rasti.

4.5 Rekomandime operative për zgjedhjen e metodës

Zgjedhja e metodës së përshtatshme për dokumentim tredimensional të monumenteve dhe strukturave inxhinierike nuk mund të bazohet vetëm në saktësinë nominale të instrumenteve, por duhet të vlerësojë në mënyrë të integruar raportin midis precizionit, kohës dhe kostos. Rezultatet e analizave të kryera në nënkapitujt e mëparshëm tregojnë se secila teknologji (TLS, UAV, PLS dhe UAV LiDAR) ka avantazhe dhe kufizime të veçanta, të cilat përcaktojnë fusha të ndryshme përdorimi në praktikë. Për këtë arsye, rekomandimet operative duhet të merren në konsideratë në mënyrë selektive, në varësi të natyrës së objektit dhe kërkesave të projektit.

Në rastet ku kërkohet saktësi e lartë dhe përshkrim shumë i detajuar i elementeve arkitektonike, TLS mbetet standardi i artë i dokumentimit. Me gmk mesatar prej 1.6 cm dhe densitet shumë të lartë pikash, TLS ofron riprodhimin më të saktë të gjeometrisë së objekteve, veçanërisht për mure historike, gdhendje, apo sipërfaqe të degraduara [9]. Avantazhi kryesor i kësaj metode është aftësia për të kapur çdo detaj strukturor pa humbje informacioni, ndërsa përdorimi i targetave reflektues dhe regjistrimi në rrjete gjeodezike të kompensuara siguron stabilitet absolut të sistemit referues. Kufizimi kryesor lidhet me kohën e gjatë të mbledhjes së të dhënave (deri në 6 orë për zona me kompleksitet të lartë) dhe me nevojën për vendosje fizike të targetave, çka e bën TLS më pak praktik në mjedise të mëdha ose me akses të kufizuar [37]. Megjithatë, për projektet që synojnë monitorimin e deformimeve strukturore, restaurimet konservuese apo dokumentimin muzeal me standarde shumë të larta saktësie, TLS mbetet metoda më e përshtatshme dhe më e besueshme.

UAV-fotogrametria përfaqëson një zgjidhje më fleksibël dhe ekonomike për dokumentim rutinë, ku kërkohet precizion i lartë, por jo në nivel milimetrik. Kjo metodë ofron shpejtësi shumë të lartë në mbledhjen e të dhënave, lehtësi në përsëritjen periodike të matjeve dhe mundësi për mbulim të plotë ajror të objekteve. Gmk mesatar prej 3.0 cm është i mjaftueshëm për gjenerim ortofotosh, modeleve 3D dhe analiza volumetrike në zona urbane ose kulturore. Përdorimi i sensorëve RTK/PPK dhe shpërndarja e mirë e GCP-ve mund ta përmirësojnë ndjeshëm saktësinë planimetrike, megjithatë UAV është e ndjeshme ndaj faktorëve të jashtëm si ndriçimi, reflektimi dhe era. Për këtë arsye, ajo rekomandohet kryesisht për objekte të sheshta ose për fasada të mëdha, ku mund të sigurohet mbivendosje

e mjaftueshme e pamjeve. Ajo mbetet një metodë thelbësore për projekte me buxhet të kufizuar dhe për monitorime periodike të monumenteve ose strukturave infrastrukturore.

UAV LiDAR paraqitet si një kompromis optimal ndërmjet saktësisë dhe efikasitetit kohor. Me gmk mesatar prej rreth 2.8 cm, kjo teknologji është e krahasueshme me TLS-in për qëllime dokumentimi dhe ofron avantazhe të qarta për mbulim në terrene të mëdha dhe me vegjetacion të dendur [37]. LiDAR-i i integruar në platformat UAV (p.sh. Zenmuse L1) lejon regjistrimin e dhënave në kushte të ndryshme ndriçimi dhe me densitet konstant pikash, duke siguruar uniformitet më të mirë në shpërndarjen e gabimeve sesa UAV-fotogrametria. Kjo e bën shumë të vlefshëm për dokumentim të urave, digave, mureve mbrojtëse dhe zonave të vështira për t'u arritur nga toka [26]. Koha e marrjes së të dhënave është dukshëm më e shkurtër se ajo e TLS (zakonisht më pak se 1 orë për një objekt inxhinierik), çka e bën UAV LiDAR të përshtatshëm për matje në projekte inxhinierike me kërkesa të larta operationale.

PLS (Skanimi portativ me lazer) përfaqëson një teknologji të re që kombinon saktësinë e sensorëve LiDAR me lëvizshmërinë e operatorit. Përdorimi i algoritmit SLAM e bën këtë metodë shumë të shpejtë për skanime në mjedise të brendshme ose zona të kufizuara. Edhe pse gmk mesatar është më i lartë (rreth 3.9 cm) për shkak të sistemit të brendshëm, PLS ofron avantazhin e skanimit në kohë reale dhe mund të realizojë regjistrime të plota në vetëm pak minuta. Përdorimi i tij është veçanërisht efektiv për modele paraprake, për kontroll të brendshme të ndërtesave ose tuneleve dhe për kompletim të të dhënave në zona ku UAV ose TLS kanë kufizime në fushëpamje. Literatura ndërkombëtare vërteton se integrimi i PLS me TLS mund të përmirësojë ndjeshëm koherencën gjeometrike dhe të reduktojë kohën e përgjithshme të përpunimit me mbi 40%.

Në mënyrë të përgjithshme, integrimi i metodave përbën strategjinë më efektive për të arritur ekuilibër të qëndrueshëm midis cilësisë, kostos dhe efikasitetit kohor. Kombinimet UAV+TLS dhe PLS+TLS kanë treguar rezultate shumë të qëndrueshme në aspektet metrikë dhe vizuale, duke përfituar nga avantazhet komplementare të çdo teknologjie. TLS siguron bazën gjeometrike me precizion të lartë dhe referencim absolut, ndërsa UAV dhe PLS sigurojnë mbulim të plotë hapësinor dhe shpejtësi të madhe të mbledhjes së të dhënave. Kjo qasje hibride është në përputhje me rekomandimet e studimeve të fundit mbi dokumentimin e trashëgimisë kulturore dhe strukturave komplekse [24], ku theksohet se zgjedhja e metodës duhet të jetë adaptive dhe objekt-specifike, duke u bazuar në kërkesat metrikë, kontekstin topografik dhe disponueshmërinë e burimeve njerëzore e teknike. Për projektet me volum të madh ose kompleksitet të lartë, përdorimi i qasjeve multisensore (UAV LiDAR + TLS + PLS) garanton që cilësia e modelit 3D të jetë homogjene dhe saktësia të mbetet nën ± 3 cm, duke përmbushur standardet ndërkombëtare për dokumentim shkencor të trashëgimisë kulturore.

5 PËRFUNDIME

Rezultatet e këtij studimi u bazuan në krahasimin e të dhënave të mbledhura me UAV, TLS, PLS, UAV LiDAR dhe iPhone+Vidoc, si dhe në integrimin e tyre për të vlerësuar saktësinë, densitetin e pikave, efikasitetin kohor dhe ekonomik. Përveç Kalasë së Vilë Bashtovës, disa matje u testuan edhe në objekte të tjera inxhinierike (ura betoni, ura metalike, ndërtesa shumëkatëshe dhe monumente të tjera kulturore), me qëllim të verifikimit të qëndrueshmërisë së metodave në kontekste të ndryshme.

5.1 Konkluzione

TLS (Skanimi tokësor me lazer) u konfirmua si metoda më e saktë në terma absolutë, me gmk mesatar prej 1.1 cm në krahasim me pikat e kontrollit të vendosura në fasadat e kalasë dhe 1.6 cm të resë së pikave. Kjo e pozicionon TLS si standardin e artë për dokumentim me saktësi të lartë, veçanërisht për fasada dhe elemente arkitektonike me detaje shumë të imta. Përparësitë e saj lidhen me densitetin e lartë të pikave dhe stabilitetin gjeometrik të garantuar nga përdorimi i targetave reflektues dhe regjistrimi në rrjete gjeodezike të kompensuara. Kufizimi kryesor mbetet koha e gjatë operative dhe kërkesa për ndërhyrje fizike në terren.

UAV LiDAR ofroi kompromisin më të mirë midis saktësisë dhe efikasitetit kohor, me gmk mesatar rreth 2.8 cm. Ky sistem mundëson mbulim të plotë të zonave të mëdha dhe regjistrim të dhënash në kushte të ndryshme ndriçimi, me aftësi për depërtim përmes vegjetacionit. Kjo e bën UAV LiDAR shumë të përshtatshëm për dokumentim të monumenteve në terrene të hapura dhe për monitorim strukturash inxhinierike.

Fotogrametria UAV tregoi një gmk mesatar prej rreth 3.0 cm, duke e bërë atë metodën më fleksibël dhe ekonomikisht më të leverdishme për dokumentime rutinë, gjenerim ortofotosh dhe vizualizime 3D. Përdorimi i sensorëve RTK/PPK siguron saktësi të qëndrueshme në planimetri, por metoda mbetet më e ndjeshme ndaj kushteve të ndriçimit dhe shpërndarjes së GCP-ve, gjë që ndikon në uniformitetin e gabimeve. Avantazhi kryesor është raporti shumë i mirë kosto–cilësi, që e bën ideale për projekte me buxhet të kufizuar dhe afate të shkurtra.

PLS (Skanimi portativ me lazer) u vërtetua si teknologji shumë efikase për skanime të shpejta dhe për dokumentim të ambienteve të brendshme, ku pajisjet statike nuk janë të përshtatshme. Me gmk mesatar 3.9 cm, kjo metodë ofron mobilitet të lartë dhe shpejtësi regjistrimi, por kufizohet nga trajektorja që ndiqet, algoritmi SLAM dhe mungesa e targetave absolute. Integrimi me TLS përmirëson ndjeshëm saktësinë dhe ul kohën totale të përpunimit me mbi 40 %.

Krahasimet absolute dhe relative treguan se diferencat gmk midis metodave janë minimale, zakonisht nën ± 1 cm, çka vërteton besueshmërinë e lartë të modeleve të gjeneruara dhe vlefshmërinë e qasjes krahasuese midis metodave.

Integrimet UAV + TLS dhe PLS + TLS rezultuan më efikase, duke kombinuar avantazhet e shpejtësisë dhe mbulimit me precizionin e lartë të TLS. Gmk mesatar për këto integrame varion nga 2.4 – 2.8 cm, ndërsa uniformiteti gjeometrik i modeleve përmirësohet ndjeshëm. Kjo qasje hibride është veçanërisht e vlefshme në dokumentime të trashëgimisë ku kërkohet ruajtje e detajeve dhe shkurtime të ndjeshme në kohë.

Analiza e triadës kosto – kohë – saktësi tregoi se TLS ofron saktësinë më të lartë, por me kosto dhe kohë operative shumë më të mëdha. UAV LiDAR dhe PLS kanë kosto më të ulëta dhe efikasitet më të lartë, ndërsa UAV siguron kompromisin më të mirë për dokumentime rutinë dhe vizualizime. Këto rezultate përforcojnë rëndësinë e balancimit të triadës si kriter kryesor për zgjedhjen e metodës optimale.

Qasja multisensore UAV LiDAR + TLS + PLS rezultoi më e përshtatshme për dokumentim të strukturave komplekse, duke ruajtur saktësi nën ± 3 cm dhe densitet të lartë pikash. Kjo strategji është në përputhje me standardet bashkëkohore të ISPRS dhe me praktikat më të fundit të dokumentimit 3D të trashëgimisë kulturore.

Zgjedhja përfundimtare e metodës duhet të bazohet në qëllimin e projektit, tipologjinë e objektit dhe burimet në dispozicion. TLS rekomandohet për detaje me precizion ekstrem; UAV LiDAR për mbulim të shpejtë dhe të gjerë; UAV-fotogrametria për dokumentime rutinë; ndërsa PLS për ambiente të brendshme dhe verifikime paraprake. Për dokumentime të avancuara, integrimi i metodave mbetet strategjia më e qëndrueshme për të optimizuar triadën kosto –kohë – saktësi dhe për të garantuar rezultate me vlerë shkencore e praktike.

5.2 Kontributet shkencore dhe praktike

Rezultatet e këtij kërkimi jo vetëm që kanë konfirmuar vlefshmërinë e metodave fotogrametrike dhe skanuese për dokumentimin tredimensional të monumenteve, por kanë hapur edhe mundësi të reja për zhvillime kërkimore dhe teknologjike në drejtim të integritit multisensor dhe automatizimit të përpunimit. Rruga më premtuese për zhvillimin e ardhshëm lidhet me përdorimin e inteligjencës artificiale (AI) dhe machine learning në filtrimin, klasifikimin dhe analizën semantike të reve të pikave, duke mundësuar identifikim më të shpejtë dhe më të saktë të elementeve arkitektonike dhe strukturale. Modelet e avancuara si PointNet++, Random Forest, 3D U-Net dhe Graph Neural Networks po tregojnë rezultate shumë premtuese në përmirësimin e cilësisë së modeleve 3D, me reduktim të zhvendosjes së pikave (zhurmës) deri në 30% dhe segmentim të automatizuar të objekteve. Zbatimi i këtyre teknikave në dataset-et e marra nga UAV LiDAR dhe TLS do të rrisë ndjeshëm produktivitetin dhe saktësinë e përpunimeve në projektet e ardhshme.

Një tjetër drejtim kërkimor i rëndësishëm është zhvillimi i qasjeve hibride në kohë reale, ku integrimi ndërmjet UAV-ve, PLS-ve dhe sensorëve tokësorë do të mundësojë ndërtimin e modeleve të bashkërenditura 3D në momentin e skanimit. Kjo qasje, e mbështetur nga teknologjitë SLAM të avancuara dhe sensorët IMU me precizion të lartë, do të reduktojë ndjeshëm gabimet dhe do të mundësojë përditësime të vazhdueshme të modeleve dixhitale

në terren. Përmirësimi i këtyre algoritmeve dhe zhvillimi i protokolleve të unifikuara të regjistrimit do të lehtësojë ndjeshëm bashkëpunimin ndërmjet institucioneve kërkimore dhe operatorëve të fushës.

Në aspektin e menaxhimit të të dhënave, pritet që dokumentimet 3D të integrohen gjithnjë e më shumë në platforma kombëtare GIS dhe databaza dixhitale të trashëgimisë kulturore, ku secili model 3D do të lidhet me informacionet e tij gjeohapësinore, historike dhe konservuese. Kjo do të mundësojë krijimin e një arkivi gjeohapësinor 3D të standardizuar, i cili do të përmirësojë qasjen e institucioneve në proceset e restaurimit dhe planifikimit urban. Integrimi i të dhënave UAV, TLS dhe LiDAR në një infrastrukturë të vetme dixhitale është një objektiv afatmesëm që mund të çojë në ngritjen e një sistemi kombëtar për menaxhimin e trashëgimisë në 3D, në përputhje me standardet e INSPIRE dhe ISPRS.

Një tjetër perspektivë me rëndësi lidhet me zbatimin e metodave të monitorimit periodik përmes UAV LiDAR dhe TLS në objekte me rrezik degradimi strukturor ose mjedisor. Këto metoda, të kombinuara me analiza kohore, do të mundësojnë ndjekjen e ndryshimeve fizike në sipërfaqe dhe volum me saktësi centimetrike, duke krijuar një bazë shkencore për ndërhyrje të kontrolluara restauruese. Në këtë mënyrë, qasja fotogrametrike e avancuar dhe teknologjitë e skanimit bëhen jo vetëm mjete dokumentimi, por edhe instrumente aktive të parandalimit dhe mirëmbajtjes së trashëgimisë kulturore.

Në përfundim, zhvillimet e ardhshme në fushën e fotogrametrisë, LiDAR-it dhe inteligjencës artificiale do të synojnë krijimin e proceseve tërësisht të automatizuara, me ndërveprim të menjëhershëm ndërmjet matjes dhe analizës, duke reduktuar ndjeshëm kostot dhe kohën e përpunimit.

5.3 Kufizimet e studimit

Megjithëse rezultatet janë të qarta, ky studim ka disa kufizime që duhen marrë parasysh:

- Varësia nga pajisjet specifike – rezultatet lidhen me modelet konkrete të pajisjeve të përdorura (p.sh. DJI M300 RTK, FARO S70, GoSlam RS100i). Pajisje më të avancuara mund të japin rezultate të ndryshme.
- Kushtet atmosferike – testet me UAV dhe UAV LiDAR u ndikuan nga faktorë si ndriçimi, era dhe kushtet atmosferike, që mund të kenë ndikuar në gmk.
- Kufizimi gjeografik – rastet e studimit u zhvilluan në Shqipëri; për përgjithësim global kërkohen më shumë aplikime në mjedise dhe struktura të ndryshme.

5.4 Sugjerime për kërkime të mëtejshme

Ky studim hap rrugë për kërkime të tjera të cilat mund të thellojnë dhe zgjerojnë fushën:

- Integrimi me AI – përdorimi i algoritmeve të inteligjencës artificiale për pastrimin automatik të reve të pikave, klasifikimin e objekteve (mur, kullë, portë) dhe segmentimin semantik.
- Integrimi me BIM – lidhja e modeleve 3D me sisteme BIM për menaxhimin e jetës së ndërtesës dhe restaurim digjital.
- Monitorim periodik – përdorimi i UAV dhe PLS për monitorime sezonale ose vjetore të objekteve monumentet e trashëgimisë kulturore dhe inxhinierike, për të gjurmuar ndryshimet në kohë.
- Testime me sensorë të rinj – përfshirja e pajisjeve më të fundit (p.sh. iPhone me LiDAR + pajisje RTK si Vidoc) për testimin e potencialit të teknologjive të konsumit në dokumentim profesional.

6 REFERENCAT

- [1] K. Krauss, *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*, Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 2007.
- [2] P. R. Wolf and B. A. Dewitt, *Elements of photogrammetry with applications in GIS* (3rd ed.), New York, USA: McGraw-Hill, 2000.
- [3] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey and J. M. Reynolds, "“Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications," *Geomorphology*, vol. 179, p. 300–314, 2012.
- [4] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, p. 91–110, 2004.
- [5] F. Remondino and S. Campana, *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage*, Archaeopress, 2014.
- [6] M. A. Fonstad, J. T. Dietrich, B. C. Courville, J. L. Jensen and P. E. Carbonneau, "Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, no. 4, p. 421–430, 2013.
- [7] F. Nex and F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: A review," *Applied Geomatics*, vol. 6, no. 1, p. 1–15, 2014.
- [8] F. A. Vega, F. C. Ramírez and P. M. Carricondo, "Assessing the accuracy of digital surface models obtained from UAV photogrammetry," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 8–10, p. 2690–2707, 2017.
- [9] G. Bitelli, M. Dellapasqua, V. A. Girelli, S. Sbaraglia and M. A. Tini, "Historical building models from integrated survey: The case of Santo Stefano Basilica in Bologna," in *Proc. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, Nafplio, Greece, 2017.
- [10] F. Chiabrando, E. Donadio and F. Rinaudo, "SfM for orthophoto generation: A winning approach for cultural heritage knowledge," in *Proc. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W7, Avila, Spain, 2015.
- [11] C. Eschmann, C. Kuo, C. Boller and K. Kühnlenz, "Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring," in *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*, Dresden, 2012.

- [12] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, p. 79–97, 2014.
- [13] J. Suomalainen, E. Hakala, J. Peltoniemi and E. Puttonen, "Polarised multiangular reflectance measurements using small unmanned aerial vehicle based imaging system," *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, pp. 50-65, 2014.
- [14] G. Forlani, F. Dall'Asta, R. Diotri, M. Cella, V. Roncella and M. Santise, "Quality assessment of DSMs produced from UAV flights constrained by ground control points," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 146, p. 701–714, 2018.
- [15] G. Vosselman and H. G. Maas, *Airborne and terrestrial laser scanning*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [16] T. P. Kersten and M. Lindstaedt, "Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects," in *Proc. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B5*, Melbourne, Australia, 2012.
- [17] D. D. Lichti and B. R. Harvey, "The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 56, no. 2, p. 123–138, 2002.
- [18] P. J. Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, p. 239–256, 1992.
- [19] C. Thomson, G. Apostolopoulos, D. Backes and J. Boehm, "Mobile laser scanning for indoor modelling," in *Proc. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-5/W2*, Antalya, Turkey, 2013.
- [20] A. Kukko, H. Kaartinen, X. Yu, J. Hyypä, M. Vastaranta and M. Holopainen, "Mobile laser scanning: Current status and future perspectives," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 128, p. 245–260, 2017.
- [21] M. Weinmann, B. Jutzi and C. Mallet, "Semantic 3D scene interpretation: A framework combining optimal neighborhood size selection with relevant features," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 105, p. 286–304, 2015.
- [22] D. Wang, X. Zhang and Q. Li, "Deep learning-based point cloud registration: An overview," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 163, pp. 1-18, 2020.

- [23] R. Volk, J. Stengel and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs," *Automation in Construction*, vol. 103, pp. 41-52, 2019.
- [24] E. Grilli, F. Menna and F. Remondino, "A review of point cloud segmentation and classification algorithms," in *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Nafplio, Greece, 2017.
- [25] M. Bosse, R. Zlot and P. Flick, "Zebedee: Design of a spring-mounted 3-D range sensor with application to mobile mapping," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, no. 2, p. 208–214, 2012.
- [26] J. Li, X. Zhang, X. Liu and Q. Li, "UAV photogrammetry and LiDAR for 3D modeling and change detection in complex environments," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 173, p. 282–297, 2021.
- [27] FARO Technologies, "FARO Focus S70 technical specifications," Lake Mary, FL, USA, 2020.
- [28] GeoSLAM, "ZEB Go / GoSLAM RS100i specifications," Nottingham, UK, 2020.
- [29] P. Grussenmeyer, T. Landes, M. Doneus and J. L. Lerma, "Basics of range-based modeling techniques in cultural heritage 3D recording," in *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage*, Oxford, UK, Archaeopress, 2016, p. 305–335.
- [30] F. Fassi, L. Fregonese, S. Ackermann and V. De Troia, "Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas," in *Proc. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-5/W16, Trento, Italy, 2011.
- [31] D. Wujanz, M. Burger, F. Tschirschwitz, T. Nietzschmann and T. P. Kersten, "Towards statistically valid point cloud comparisons: A geometric quality assessment of TLS point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 152, p. 89–97, 2019.
- [32] M. Handl, Geometric accuracy assessment and point cloud comparison methods for terrestrial laser scanning, Stuttgart, Germany: University of Stuttgart, 2019.
- [33] J. Hyypä, X. Yu, H. Hyypä, M. Vastaranta, M. Holopainen, A. Kukko and H. Kaartinen, "Advances in forest inventory using airborne laser scanning," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 9, p. 913, 2017.

- [34] E. P. Baltsavias, Airborne laser scanning: Existing systems and firms and other resources, Zurich, Switzerland: Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 1999.
- [35] X. Liu, Q. Li, X. Zhang and Z. Li, "Performance evaluation of UAV photogrammetric point clouds for dense urban areas," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 139, p. 300–311, 2018.
- [36] D. A. White, J. L. Brasington and J. E. Eltnner, "Developing and applying a 3-D geomorphic change detection workflow for repeat UAV surveys," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, no. 1, p. 61–77, 2016.
- [37] G. Mandlbürger, K. Wenzel, A. Spitzer, N. Haala and P. Glira, "Improved topographic models through UAV laser scanning," in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-1-2020 (ISPRS Congress 2020)*, Nice, France, 2020.
- [38] Y. Chen, G. Medioni, Y. Li and Y. Zhao, "Robust ICP for registration of partially overlapping point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 93, p. 38–52, 2014.
- [39] L. Wallace, C. Reinke, D. H. Jones and L. M. Lucieer, "Very high resolution mapping of tree-level forest structure using UAV laser scanning," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 12, p. 2238–2259, 2012.
- [40] P. Kumar, S. Singh and R. Lal, "Accuracy assessment of digital surface models derived from unmanned aerial vehicle based photogrammetry," *Measurement*, vol. 152, 2020.
- [41] C. A. Silva, H. E. Andersen, R. K. Dubayah and M. A. Vierling, "Remote sensing of forest structure and biomass using small unmanned aerial systems: A review," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 10, p. 938, 2017.
- [42] C. Glennie, W. E. Carter, R. L. Shrestha and W. E. Dietrich, "Geodetic imaging with airborne LiDAR: The earth's surface revealed," *Reports on Progress in Physics*, vol. 76, no. 8, p. 086801, 2013.
- [43] D. G. Montaut, "CloudCompare (version 2.8) [GPL software]," EDF R&D, Telecom ParisTech, Paris, France, 2016.
- [44] P. Grussenmeyer, T. Landes and F. Alby, "Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings," in *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 2008.

- [45] S. Barnea and S. Filin, "Registration of terrestrial laser scans via image-based features," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 63, no. 1, p. 19–35, 2008.
- [46] C. R. Qi, L. Yi, H. Su and L. J. Guibas, "PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 43, no. 8, p. 2676–2688, 2021.
- [47] R. B. Rusu and S. Cousins, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2011.
- [48] B. Alsadik, M. Gerke and G. Vosselman, "Efficient use of UAV-based photogrammetry for 3D modelling of cultural heritage monuments," in *Proc. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-3/W5, Taipei, Taiwan, 2015.
- [49] Q. Haxhihyseni, "Kalaja e Bashtovës dhe historia e saj," *Buletini i Institutit të Monumenteve të Kulturës*, vol. 2, no. 1, pp. 45-52, 1983.
- [50] E. Çelebi, *Udhëtimet nëpër Shqipëri*, 1979.
- [51] S. Anamali, *Fortifikimet mesjetare në Shqipëri*, Tiranë, 1984.
- [52] N. Ceka, *Ilirët dhe Iliria në antikitetin e vonë*, Tiranë: Dituria, 2005.
- [53] J. G. v. Hahn, *Studime Shqipëtare*, Vjenë: Kaiserliche Akademie der Wissenschaften, 1854.
- [54] DJI, "Matrice 300 RTK product specifications," Shenzhen, China, 2021.
- [55] DJI, "Zenmuse P1 product specifications," DJI, Shenzhen, China, 2021.
- [56] M. R. James and S. Robson, "Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 39, no. 10, p. 1413–1420, 2014.
- [57] P. Tang and B. Akinci, "Formalization of workflows for extracting bridge information from laser-scanned data for bridge inspection," *Automation in Construction*, vol. 22, p. 306–319, 2012.
- [58] B. Vallet, M. P. Deseilligny, D. Boldo and N. Paparoditis, "Use of airborne LiDAR and photogrammetry for 3D urban modeling," *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 201, no. 1, p. 30–40, 2011.

- [59] C. Stal, F. Tack, P. D. Mayer, A. D. Wulf and R. Goossens, "Airborne photogrammetry and LiDAR for DSM extraction and 3D change detection over urban areas," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, p. 6713–6736, 2013.
- [60] R. Zlot, M. Bosse, K. Greenop, Z. Jarzab, E. Juckes and J. Roberts, "Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 6, p. 670–678, 2014.
- [61] P. Rönholm, X. Liang, A. Kukko and H. Kaartinen, "Quality assessment of mobile laser scanning data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 161, p. 26–40, 2020.