

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Корнелија Т. Кљечанин

**ОПТИМИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ
ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ СКЕНИРАЊА**

докторска дисертација

Београд, 2026

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Kornelija T. Klječanin

**OPTIMISATION OF THE GEOMETRY OF
TERRESTRIAL LASER SCANNING**

doctoral dissertation

Belgrade, 2026

МЕНТОР И ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Марко Пејић, дипл. геод. инж, ванредни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије:

Др Милева Самарцић Петровић, дипл. геод. инж, ванредни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Марко Пејић, дипл. геод. инж, ванредни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Зоран Сушић, дипл. геод. инж, редовни професор
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

Датум одбране:

У Београду, _____ .

ЗАХВАЛНОСТ

Своју дубоку захвалност желим изразити свим појединцима и институцијама који су на различите начине допринијели реализацији овог истраживања и изради ове докторске дисертације.

Посебно сам захвална свом ментору, проф. др Марку Пејићу, чија је стручност, несебична подршка и мудри савјети били непроцјењиви приликом формулисања теме, дефинисања методологије и током читавог истраживачког процеса.

Захваљујем се члановима Комисије на пажљивом прегледу рада, конструктивним примједбама и корисним сугестијама које су значајно допринијеле квалитету дисертације.

Искрену захвалност упућујем и проф. др Гордани Јаковљевић, чија је помоћ при извођењу теренских мјерења и стручни савјети били од великог значаја за реализацију истраживања.

Највећу захвалност дугујем својој породици, која ми је пружала разумијевање, стрпљење и безрезервну подршку током читавог периода докторских студија.

Дисертацију посвећујем своме оцу, проф. др Теши Ристићу, као израз поштовања, љубави и захвалности за све што је учинио за моје образовање и животни пут.

Корнелија Т. Кљечанин

САЖЕТАК

Терестричко ласерско скенирање представља поступак детаљног мјерења, односно снимања објекта и терена коришћењем посебног инструмента – терестричког ласерског скенера, који великом брзином емитује ласерске зраке према објекту и региструје њихове рефлексије од објекта. Терестричко ласерско скенирање је релативно нова технологија мјерења, која се појавила крајем деведесетих година двадесетог вијека. Технологија ласерског скенирања омогућава прикупљање потпунијих података о објекту чиме се у великој мјери смањује потреба за додатним теренским радовима и непланираним трошковима.

Квалитет терестричког ласерског скенирања условљен је мјерним карактеристикама скенера (домет, тачност мјерења дужине, хоризонталног и вертикалног отклона ласерског зрака), карактеристикама површи објекта који је предмет скенирања (степен рефлективности површи), условима околине током скенирања (атмосферски притисак, влажност и температура ваздуха, вибрације), као и геометријом скенирања (упадни угао ласерског зрака и растојање до објекта). Карактеристика површи објекта представља фактор на који није могуће директно утицати. Неповољне метеоролошке услове, као што су екстремно високе или ниске температуре, магла, киша, снијег и сл., потребно је избјегавати, јер могу значајно утицати на квалитет резултата. Утицај геометрије скенирања је најтеже квантификовати, будући да захтијева виши ниво стручног знања и разумијевања самог процеса терестричког ласерског скенирања. Истовремено, то је фактор на који је у практичном смислу могуће највише утицати кроз адекватно планирање локација станица терестричког ласерског скенера (станица ТЛС).

У дисертацији су приказане теоријске основе технологије терестричког ласерског скенирања, методе регистрације и геореференцирања облака тачака, као и одговарајући математички модели опажања, регистрације и геореференцирања. Дат је приједлог 3Д оптимизације процеса терестричког ласерског скенирања, који је обухватио избор оптималног броја и локација станица ТЛС са којих ће се изводити скенирање објекта, као и избор оптималног броја и локација скенерских сигнала за потребе регистрације сусједних облака тачака. Планирање је реализовано у тродимензионалном (3Д) координатном систему, при чему је, поред распореда станица ТЛС и скенерских сигнала у хоризонталној (2Д) равни, укључена и вертикална компонента, односно висина објекта. Увођењем вертикалне компоненте и додатних параметара добијени су прецизнији и свеобухватнији резултати, уз повећану сложеност поступка.

Тема дисертације, представља значајно и актуелно подручје истраживања у области снимања терестричким ласерским скенерима. Иако за ову проблематику постоји изражено интересовање великог броја истраживача у свијету, и даље су присутне методолошке и практичне празнине у погледу оптимизације броја и распореда станица ТЛС и скенерских сигнала, посебно у условима који укључују тродимензионалне аспекте и ограничења реалног терена. Дисертација има за циљ да допринесе превазилажењу наведених изазова развојем систематизованог модела 3Д оптимизације који интегрише принципе класичног геодетског 3Д пројектовања мреже са ограничењима терестричког ласерског скенирања, као што су максимална дозвољена вриједност упадног угла ласерског зрака, потпуно скенирање објекта и минималан преклоп између сусједних облака тачака. При развоју модела узете су у

обзир и препреке изван објекта, техничка ограничења и мјерне карактеристике скенера.

С обзиром на то да је подручје, односно објекат од интереса, ријетко могуће скенирати са једне станице ТЛС, оптимизација броја и локација станица представља неопходан корак у планирању скенирања. При томе је потребно уважити минимални и максимални домет скенера, ограничење максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака, као и захтјев потпуног скенирања објекта. Истовремено, циљ је минимизирати укупан број станица ТЛС. Такође, при избору локација и броја станица ТЛС неопходно је обезбиједити довољан преклоп између сусједних облака тачака, да би се могла извршити поузданија трансформација облака тачака из координатног система скенера у заједнички координатни систем (тзв. регистрација облака тачака). То практично значи да један заједнички дио објекта буде скениран у оквиру двије сусједне станице. Квалитет регистрације облака тачака условљен је, такође, бројем и распоредом скенерских сигнала у зони објекта (скенерски сигнали на објекту и у непосредној близини објекта).

При избору локација станица ТЛС често се јављају просторне препреке (објекти, вегетација и сл.) које нарушавају геометрију мреже и доводе до појаве неповољних упадних углова ласерског зрака на површ објекта. Због тога је неопходно дефинисати линију максималног удаљења скенера од објекта за несметано скенирање узимајући у обзир препреке у непосредној близини објекта и линију максималног приближења скенера објекту уважавајући ограничење које се односи на максималну дозвољену вриједност упадног угла. На тај начин се одређује *допустива област постављања терестричког ласерског скенера*, која је математички формализована и укључена у модел оптимизације локација станица ТЛС.

За оптимизацију распореда станица ТЛС и скенерских сигнала формулисан је математички модел вишекритеријумске оптимизације, у којем су технолошка ограничења ТЛС система (максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта) и граничне вриједности критеријума квалитета 3Д геодетске мреже дефинисале допустиви скуп рјешења, док је варирањем координата унутар тог скупа одређена оптимална конфигурација ТЛС мреже.

Предложена методологија оптимизације верификована је на примјеру планирања процеса терестричког ласерског скенирања зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци. Добијени резултати указују на могућност смањења броја станица ТЛС и укупног броја скенерских сигнала уз очување квалитета регистрације облака тачака, истовремено унапређујући квалитет коначног 3Д модела, чиме се потврђује практична примјењивост предложеног модела.

Кључне ријечи: терестричко ласерско скенирање, облак тачака, тачност, регистрација, геореференцирање, упадни угао, допустива област постављања инструмента, вишекритеријумска оптимизација.

Научна област: Геодетско инжењерство

Ужа научна област: Геодетски премер

ABSTRACT

Terrestrial laser scanning represents a procedure of detailed measurement, i.e, surveying of objects and terrain using a special instrument – a terrestrial laser scanner, which emits laser beams toward the object at high speed and records their reflections. Terrestrial laser scanning is a relatively new measurement technology that emerged in the late 1990s. This technology enables the collection of more comprehensive data about an object, significantly reducing the need for additional fieldwork and unplanned costs.

The quality of terrestrial laser scanning depends on the measurement characteristics of the scanner (range, accuracy of distance measurement, horizontal and vertical deflection of the laser beam), the characteristics of the object's surface (degree of reflectivity), environmental conditions during scanning (atmospheric pressure, humidity, air temperature, vibrations), and the scanning geometry (incidence angle of the laser beam and distance to the object). Surface characteristics of the object are a factor that cannot be directly influenced. Unfavorable meteorological conditions, such as extremely high or low temperatures, fog, rain, snow, etc., should be avoided as they can significantly affect the quality of results. The influence of scanning geometry is the most difficult to quantify, as it requires a higher level of expertise and understanding of the terrestrial laser scanning process. At the same time, it is the factor that can be most effectively controlled in practice through proper planning of terrestrial laser scanner station locations (TLS stations).

The dissertation presents the theoretical foundations of terrestrial laser scanning technology, methods of point cloud registration and georeferencing, as well as corresponding mathematical models of observation, registration, and georeferencing. A proposal for 3D optimization of the terrestrial laser scanning process is provided, including the selection of the optimal number and locations of TLS stations from which the object will be scanned, as well as the optimal number and placement of scanning targets for the registration of neighboring point clouds. The planning is carried out in a three-dimensional (3D) coordinate system, where, in addition to the arrangement of TLS stations and scanning targets in the horizontal (2D) plane, the vertical component, i.e., the height of the object, is also included. By introducing the vertical component and additional parameters, more precise and comprehensive results are obtained, albeit with increased complexity of the process.

The topic of the dissertation represents a significant and current research area in the field of terrestrial laser scanning. Although there is considerable interest from researchers worldwide, there are still methodological and practical gaps regarding the optimization of the number and distribution of TLS stations and scanning targets, especially under conditions involving three-dimensional aspects and real terrain constraints. The dissertation aims to contribute to overcoming these challenges by developing a systematic 3D optimization model that integrates principles of classical geodetic 3D network design with the constraints of terrestrial laser scanning, such as the maximum allowable incidence angle of the laser beam, complete object coverage, and minimum overlap between neighboring point clouds. The model also considers external obstacles, technical limitations, and the measurement characteristics of the scanner.

Since the area or object of interest can rarely be scanned from a single TLS station, optimizing the number and locations of stations is a necessary step in scan planning. This requires consideration of the scanner's minimum and maximum range, the limitation of the maximum allowable incidence angle of the laser beam, and the requirement for

complete object coverage, while aiming to minimize the total number of TLS stations. Additionally, when selecting station locations and their number, it is necessary to ensure sufficient overlap between neighboring point clouds to enable reliable transformation of point clouds from the scanner coordinate system into a common coordinate system (i.e. point cloud registration). This practically means that a shared part of the object must be scanned from at least two neighboring stations. The quality of point cloud registration also depends on the number and distribution of scanning targets within and around the object.

When selecting TLS station locations, spatial obstacles (such as buildings, vegetation, etc.) often arise, disturbing the network geometry and leading to unfavorable incidence angles of the laser beam on the object surface. Therefore, it is necessary to define the line of maximum scanner distance from the object for unobstructed scanning, considering nearby obstacles, as well as the line of minimum scanner distance, taking into account the constraint related to the maximum allowable incidence angle. In this way, the permissible area for placing the terrestrial laser scanner is determined, which is mathematically formalized and incorporated into the TLS station location optimization model.

For optimizing the arrangement of TLS stations and scanning targets, a multi-criteria optimization model is formulated, where technological constraints of the TLS system (maximum allowable incidence angle, minimum degree of point cloud overlap, and complete object coverage) and boundary values of 3D geodetic network quality criteria define the feasible solution space. By varying the coordinates within this space, the optimal configuration of the TLS network is determined.

The proposed optimization methodology is verified through a case study involving the planning of terrestrial laser scanning of the building of the Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, and the Faculty of Forestry at the University of Banja Luka. The obtained results indicate the possibility of reducing the number of TLS stations and the total number of scanning targets while maintaining the quality of point cloud registration, while simultaneously improving the quality of the final 3D model, thus confirming the practical applicability of the proposed model.

Keywords: terrestrial laser scanning, point cloud, accuracy, registration, georeferencing, incidence angle, allowable instrument placement area, multi-criteria optimisation.

Scientific field: Geodetic Engineering

Scientific subfield: Geodetic Survey

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

2Д	Дводимензионалан
3Д	Тродимензионалан
DTOF	Direct Time Of Flight
FOD	The First Order Design
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
ICP	Iterative Closest Point
ITOF	Indirect Time Of Flight
КС	Координатни систем
LADAR	Laser Detection And Ranging
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	Light Detection and Ranging
МНК	Метод најмањих квадрата
RGB	Red-Green-Blue
SNR	Signal to Noise Ratio
ТЛС	Терестричко ласерско скенирање/скенер
TOF	Time Of Flight
ТС	Тотална станица

СПИСАК СЛИКА

Слика 2-1 . Класификација оптичких тродимензионалних мјерних система [32]	11
Слика 2-2 . Класификација ТЛС у зависности од система за дивергенцију ласерског снопа и видног поља скенирања [39]	13
Слика 2-3 . Принцип скенирања и резултат мјерења терестричким ласерским скенером	14
Слика 2-4 . Главне осе терестричког ласерског скенера [26]	15
Слика 2-5 . Однос координатног система скенера и координатног система геодетске контролне мреже објекта [12]	16
Слика 2-6 . Трансформација координата [32]	17
Слика 2-7 . Врсте скенерских сигнала [30]	21
Слика 2-8 . Детаљно скенирање скенерског сигнала [30]	21
Слика 2-9 . Распоред тачака за геореференцирање: а) Добар, б) Неповољан (лош);	23
Слика 2-10 . Индиректно геореференцирање у два корака [30], [39]	25
Слика 2-11 . Индиректно геореференцирање у једном кораку на основу тачака контролне геодетске мреже [39]	26
Слика 3-1 . Дијаграм тока процеса оптимизације геометрије ТЛС мреже	32
Слика 4-1 . 3Д приказ зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци [49]	40
Слика 4-2 . Ситуациони план објекта. Плавом бојом је приказана линија ограничавајућег простора до које се може постављати терестрички ласерски скенер за несметано скенирање.	42
Слика 4-3 . 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при $\alpha_{\max} = 78^\circ$. Приказана је вриједност упадног угла за граничне случајеве. Жутом бојом је приказан видљиви дио објекта са станице TLS1. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера у зависности од препрека на терену. Област приказана сивом бојом означава област унутар које није дозвољено постављање скенера.	43
Слика 4-4 . 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при $\alpha_{\max} = 70^\circ$ за станицу TLS1. Жутом бојом је приказан видљиви дио објекта са станице TLS1. Станица TLS2 има неповољну локацију у погледу упадног угла. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера у зависности од препрека на терену. Област приказана сивом бојом означава област унутар које није дозвољено постављање скенера.	44
Слика 4-5 . Допустива област (нешрафирани дијелови) постављања скенера за једну страну зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета при $\alpha_{\max} = 78^\circ$. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера за несметано скенирање.	45
Слика 4-6 . Допустива област постављања скенера (нешрафирани/необојени дијелови изван објекта) при $\alpha_{\max} = 65^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15 \text{ m}$. Висина инструмента - $i \approx 1.5 \text{ m}$. Дио објекта који није могуће скенирати означен је црвеном линијом.	46
Слика 4-7 . Допустива област (нешрафирани/необојени дијелови изван објекта) постављања скенера при $\alpha_{\max} = 75^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15 \text{ m}$. Висина инструмента - $i \approx 1.5 \text{ m}$. Дио објекта који није могуће скенирати означен је црвеном линијом.	47

Слика 4-8 . Допустива област (нешрафрани/ небојени дијелови изван објекта) постављања скенера при $\alpha_{\max} = 78^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15 \text{ m}$. Висина инструмента - $i \approx 1.5 \text{ m}$	48
Слика 4-9 . 2Д приказ распореда станица ТЛС унутар допустиве области, за који је остварена потпуна покривеност објекта	50
Слика 4-10 . Оптималан распоред станица ТЛС и скенерских сигнала	53
Слика 5-1 . Вертикално и хоризонтално видно поље терестричког ласерског скенера Faro FocusM70 [48]	57
Слика 5-2 . Приказ трајања скенирања на станици и резолуције скенирања за одабрана моделе резолуције "Resolution - 1/4" и "Resolution - 1/5" и параметре "Quality - 3x" и "Quality - 2x"[48]	59
Слика 5-3 . Максимална дозвољена вриједност упадног угла ласерског зрака за препознавање равног скенерског сигнала износи 45° [48]	60
Слика 5-4 . Сферни скенерски сигнал на објекту (скенерски сигнал са ознаком ОВ3)	62
Слика 5-5 . Оптималан распоред станица ТЛС и скенерских сигнала за скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Линијом жуте боје су приказане двије стране зграде које су предмет скенирања. \otimes - станица ТЛС, \odot - сферни скенерски сигнал	66
Слика 5-6 . Станице ТЛС са ознакама \otimes TLS6 и \otimes TLS8	69
Слика 5-7 . 2Д приказ распореда и броја станица ТЛС и сферних скенерских сигнала за трећи (лијево) и четврти (десно) план скенирања	70
Слика 5-8 . Приказ распореда и броја станица ТЛС за први план скенирања. Подаци су преузети из софтвера "FARO SCENE 3D Point Cloud Software" након обраде скенирања	73
Слика 5-9 . Приказ распореда и броја станица ТЛС за други план скенирања. Подаци су преузети из софтвера "FARO SCENE 3D Point Cloud Software" након обраде скенирања	74

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2-1 . Карактеристике појединих комерцијалних терестричких ласерских скенера који се користе за снимање инжињерских објеката [32]	9
Табела 4-1 . Максимална вриједност упадног угла и косе дужине од станице ТЛС до објекта	49
Табела 4-2 . Основни подаци о ТЛС мрежи зграде факултета	51
Табела 4-3 . Приближне координате тачака ТЛС мреже зграде факултета	52
Табела 4-4 . Коефицијенти унутрашње поузданости планираних опажања	53
Табела 4-5 . Полуосе троосног елипсоида грешака	55
Табела 5-1 . Карактеристике терестричког ласерског скенера Faro FocusM70 [48]	57
Табела 5-2 . Максимална дозвољена удаљеност за препознавање сфере у зависности од пречника сфере и одабраног модела резолуције [48]	58
Табела 5-3 . Вријеме скенирања за поједине моделе резолуције и одабрани параметар "Quality" [48]	59
Табела 5-4 . Основни подаци о ТЛС мрежи за скенирање двије стране зграде факултета	62
Табела 5-5 . Приближне координате тачака ТЛС мреже	63
Табела 5-6 . Коефицијенти унутрашње поузданости планираних опажања и количник маргиналне грубе грешке и варијансе планираних опажања	63
Табела 5-7 . Полуосе троосног елипсоида грешака	64
Табела 5-8 . Карактеристике процеса скенирања за четири плана скенирања	68
Табела 5-9 . Коефицијенти унутрашње поузданости и количник маргиналне грубе грешке и варијансе планираних опажања за трећи план скенирања	70
Табела 5-10 . Полуосе троосног елипсоида грешака за трећи план скенирања	71
Табела 5-11 . Коефицијенти унутрашње поузданости и количник маргиналне грубе грешке и варијансе планираних опажања за четврти план скенирања	71
Табела 5-12 . Полуосе троосног елипсоида грешака за четврти план скенирања	72
Табела 5-13 . Показатељи квалитета регистрације облака тачака типским скенерским сигнаlima	75
Табела 5-14 . Показатељи квалитета регистрације облака тачака комбиновањем двије методе (регистрација типским скенерским сигнаlima + Cloud to Cloud метода регистрације)	75

САДРЖАЈ

1. УВОД – ОПИС ПРОБЛЕМА	1
1.1. Предмет истраживања	3
1.2. Циљеви и полазне хипотезе истраживања	4
1.3. Претходна истраживања	5
1.4. Очекивани резултати и научни допринос докторске дисертације	6
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРИКУПЉАЊА ПРОСТОРНИХ ПОДАТАКА ТЕРЕСТРИЧКИМ ЛАСЕРСКИМ СКЕНЕРИМА	8
2.1. Основне компоненте терестричких ласерских скенера	9
2.2. Основни принципи одређивања растојања помоћу терестричких ласерских скенера	11
2.3. Систем за дивергенцију ласерског снопа и одређивање вриједности праваца	12
2.4. Елементи мјерења и координатни систем ТЛС-а	13
2.5. Регистрација и геореференцирање облака тачака	15
2.5.1. Математички модел регистрације и геореференцирања	16
2.5.2. Методе регистрације облака тачака	20
2.5.2.1. Регистрација типским скенерским сигналима	20
2.5.2.2. Регистрација по морфолошким детаљима	22
2.5.2.3. Регистрација најбољим уклапањем површи	22
2.5.2.4. Регистрација правилним геометријским фигурама	23
2.5.2.5. Комбинација метода	23
2.5.3. Методе геореференцирање облака тачака	23
2.5.3.1. Метода директног геореференцирања	24
2.5.3.2. Метода индиректног геореференцирања	24
2.5.3.3. Предности и недостаци директне и индиректне методе геореференцирања	26
3. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И МЕТОДОЛОГИЈА ОПТИМИЗАЦИЈЕ У ПЛАНИРАЊУ ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ СКЕНИРАЊА	28
3.1. Математички модел вишекритеријумске оптимизације геометрије ТЛС мреже	29
3.2. Фазе оптимизације геометрије ТЛС мреже	31
3.2.1. Дефинисање допустиве области постављања скенера	32
3.2.2. Одређивање оптималног броја и локација станица ТЛС	33
3.2.3. Одређивање оптималног броја и локација скенерских сигнала	34
4. ПРИМЈЕНА МОДЕЛА ОПТИМИЗАЦИЈЕ ГЕОМЕТРИЈЕ ТЛС МРЕЖЕ НА ЗГРАДИ АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКОГ И ШУМАРСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ	40
4.1. Дефинисање допустиве области постављања ТЛС за одабрани објекат	40

4.1.1. Дефинисање линије највећег удаљења инструмента од објекта за несметано скенирање	41
4.1.2. Дефинисање линије највећег приближења инструмента објекту	42
4.1.3. Дефинисање допустиве области при различитим вриједностима упадних углова	45
4.1.4. Избор оптималне допустиве области за одабрани објекат	48
4.2. Одређивање оптималног броја и локација станица ТЛС за скенирање одабраног објекта	49
4.3. Одређивање оптималног броја и локација скенерских сигнала за скенирање одабраног објекта	50
5. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЈЕРА МЕТОДОЛОГИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ТЛС	57
5.1. Оптимална ТЛС мрежа за скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета	60
5.2. Скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета	66
5.3. Обрада и анализа добијених резултата	73
6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉЕ ИСТРАЖИВАЊЕ	77
7. ЛИТЕРАТУРА	80

1. УВОД - ОПИС ПРОБЛЕМА

Терестричко ласерско скенирање (енгл. *Terrestrial Laser Scanning* - ТЛС) је релативно нова технологија мјерења, која се појавила крајем деведесетих година двадесетог вијека. Технологија ласерског скенирања омогућава прикупљање комплетнијих података о објекту чиме је у великој мјери искључена могућност додатних теренских радова и непланираних трошкова. Поред традиционалних мјерних метода у Геодезији као што су тахиметрија, фотограметрија и ГНСС (енгл. *Global Navigation Satellite System*), терестричко ласерско скенирање се такође користи као метода одређивања положаја 3Д тачака у простору. Међутим, употреба терестричких ласерских скенера је још увијек релативно ограничена. Иако је процес снимања терестричким ласерским скенерима значајно аутоматизован, накнадна обрада података је захтјевнија, дуготрајнија и комплекснија. Затим, примјена терестричког ласерског скенирања у другим инжењерским областима није у потпуности имплементирана.

Терестричко ласерско скенирање представља поступак детаљног мјерења, односно снимања објекта и терена коришћењем посебног инструмента – терестричког ласерског скенера, који великом брзином шаље ласерске зраке према објекту и мјери њихове рефлексије од објекта. Скенирањем се добија велик број прецизно одређених просторних тачака које чине такозвани облак тачака (енгл. *point cloud*). Дигиталном обрадом облака тачака могу се добити различити производи, као што су једноставнији и сложенији прикази, векторски 3Д модели објеката, дигитални прикази фасада, тлоцрти, пресјеци, информације о површини и запремини и сл. Скенирањем у различитим временским епохама могу се одредити количине ископа и насипа терена, слијегање терена и објеката, одступања геометрије објекта од пројектоване и сл. Квалитет података скенирања има потенцијал примјене у архитектури, топографији, рударству, грађевинарству, машинству, археологији, филмској индустрији, форензици итд.

Квалитет терестричког ласерског скенирања условљен је са четири основна параметра [42]: 1) мјерним карактеристикама терестричког ласерског скенера (домет, тачност мјерења дужине, тачност хоризонталног и вертикалног отклона ласерског зрака), 2) карактеристикама површи објекта који се скенира (степен рефлективности површи), 3) условима околине током скенирања (атмосферски притисак, влажност и температура ваздуха, вибрације) и 4) геометријом скенирања (упадни угао ласерског зрака и растојање до објекта).

У оптимизацији процеса терестричког ласерског скенирања важну улогу има избор скенера одговарајућих мјерних карактеристика. Коришћење скенера чији је домет близу максималног растојања до објекта који се скенира имаће за последицу недовољно поуздане податке. Утицај мјерних карактеристика скенера на тачност позиционирања појединачне тачке у облаку тачака може се оцијенити примјеном Гаусовог закона преноса грешака на добро познате функционалне везе између мјерних величина (просторна дужина, хоризонтални правац и вертикални угао) и 3Д правоуглих координата појединачне тачке у облаку тачака, што је од значаја код избора одговарајућег скенера.

Карактеристике површине објекта представљају параметар на који се не може директно утицати. Рефлективност површине условљена је својствима материјала,

таласном дужином ласера, бојом, храпавошћу, као и температуром и влажношћу површине. Степен рефлективности утиче на тачност и поузданост мјерења растојања: слабија рефлективност смањује интензитет повратног сигнала, чиме расте несигурност резултата, док превисока рефлективност може довести до непоузданих мјерења.

Тачност терестричког ласерског скенирања условљена је метеоролошким факторима [9], [14]. На процес скенирања утичу атмосферски параметри, као што су атмосферски притисак, влажност и температура ваздуха. Већина скенера опремљена је системом за компензацију атмосферских параметара како би се смањио њихов ефекат на резултате. Неповољни метеоролошки услови, укључујући екстремно високе или ниске температуре, маглу, кишу и снијег, требају се избјегавати током скенирања.

Утицај геометрије скенирања знатно је теже квантитативно оцијенити, јер захтијева виши ниво стручног знања и дубље разумијевање процеса терестричког ласерског скенирања. Са друге стране, управо је геометрија скенирања параметар на који је могуће највише утицати у фази планирања. Основни параметри геометрије скенирања су растојање између скенера и објекта и упадни угао ласерског зрака. Повећањем растојања и упадног угла долази до смањења квалитета података скенирања.

Терестричко ласерско скенирање није замјена за постојеће мјерне геодетске технике, али је алтернатива која се може употријебити у већини геодетских радова. Скенирање се врши познатом методом мјерења растојања, хоризонталног правца и вертикалног угла до одређене тачке на објекту, а резултат је скуп тродимензионалних координата тачака који чини поменути облак тачака. Просторно растојање између сусједних скенираних тачака унутар облака зависи од близине објекта скенирања и карактеристика самог инструмента. Резултат скенирања већине данашњих скенера су веома густе облаци тачака, па је могуће добити тачке на скенираном објекту удаљене тек 1 mm. Облак тачака, уз просторне (релативне или апсолутне) координате, садржи и податак о интензитету детектованог ласерског зрака, а може да садржи и податак о боји односно RGB (енгл. *Red Green Blue*) модел који се добија унутрашњом (уграђеном) или вањском камером.

Примјена традиционалних геодетских мјерних инструмената, као што су тоталне станице и ласерски даљиномјери, захтијева више труда и времена за прикупљање неопходних података. Разлог тога је велика количина детаља које је неопходно у процесу мјерења опажати како би се могао креирати вјеродостојан модел стварног стања. Треба напоменути да традиционалне мјерне методе не нестају већ се комбинују са напредним технологијама ради обезбјеђења бољег квалитета коначног резултата. Појавом терестричког ласерског скенирања, прикупљање просторних података постало је брже и ефикасније. Коришћењем велике количине квалитетних података, више милиона или чак више милијарди појединачних мјерења, могуће је побољшати визуелни приказ и моделовање, као и моделовати тешко доступне дијелове и ефикасно креирати 3Д пројектну документацију.

Терестричко ласерско скенирање је посебно погодна мјерна метода у ситуацијама када је објекат од интереса тешко приступачан, те је немогуће остварити директан контакт са тачкама детаља чије је координате неопходно одредити. Такође, могуће је снимити подручја која због високе температуре или велике концентрације штетних

гасова нису погодна за боравак људи у њиховој непосредној близини. За снимање саобраћајница (мостова, тунела и др.) и фабричких постројења (топлана, рафинерија и др.) терестрички ласерски скенер се може користити без заустављања саобраћаја или прекида производног процеса.

Коришћење савремених прецизних геодетских мјерних уређаја за ријешавање различитих практичних задатака не ослобађа геодетског стручњака потребе да анализира, истражује и планира процес опажања. Напротив, за сваког геодетског стручњака прави је изазов да претходним прорачуном тачности утврди да ли може остварити мјерење неке величине у границама дозвољених одступања, и да на тај начин одабере мјерне уређаје и методе мјерења, дефинише услове тачности, услове при мјерењу и параметре за праћење и контролу мјерења, и наравно да потврди планирану концепцију и организацију геодетских радова.

1.1. Предмет истраживања

Терестричко ласерско скенирање представља савремену методу прикупљања просторних података, која омогућава брзо и детаљно снимање објеката и терена. Међутим, због сложене геометрије објеката, присуства препрека у простору, као и ограничења самог процеса скенирања, током снимања често долази до појаве дијелова површи који остају недоступни за директно мјерење, али и до варијација у квалитету прикупљених података.

Поред обезбјеђења потпуног скенирања објекта, неопходно је обезбиједити и довољан преклоп између сусједних облака тачака ради поуздане регистрације, као и повољне геометријске услове који директно утичу на квалитет резултата. Истовремено, тежи се смањењу укупног броја станица ТЛС и скенерских сигнала, односно рационализацији времена и трошкова извођења радова, без нарушавања квалитета резултата.

Из наведеног произилази да планирање скенирања представља кључну фазу геодетских радова, која се може формулисати као проблем математичке оптимизације, у којем се тежи проналажењу најбољег рјешења у оквиру унапријед дефинисаних услова и ограничења.

При планирању скенирања потребно је дефинисати основне параметре задатка, као што су: подручје или објекат од интереса, његове димензије и геометријске карактеристике, ниво детаљности прикупљања података, резолуција скенирања, као и захтијевана тачност облака тачака и 3Д модела. Посебан значај имају ограничења у погледу максималног дозвољеног приближења и максималне удаљености скенера од објекта, која су условљена максималном дозвољеном вриједности упадног угла ласерског зрака и присуством препрека у простору.

С обзиром на то да је објекат од интереса ријетко могуће у потпуности скенирати са једне станице, неопходно је одредити оптималан број и распоред станица ТЛС. При томе је потребно обезбиједити потпуно скенирање објекта, довољан преклоп између сусједних облака тачака како би се омогућила поузданија регистрација облака тачака, као и повољне геометријске услове скенирања. Поред распореда станица, значајан утицај на квалитет регистрације има и избор и распоред скенерских сигнала, при чему је неопходно обезбиједити њихов довољан број у зонама преклопа, неколинеарност, као и адекватан тип сигнала у зависности од карактеристика

скенера и објекта. Тип скенерских сигнала може да утиче на тачност скенирања, на примјер, за фазне скенере погодније су равне црно-бијеле маркице [8].

Станице ТЛС и скенерски сигнали постављени у зони објекта (скенерски сигнали на објекту и у непосредној близини објекта) чине контролну мрежу објекта скенирања, која мора бити пројектована тако да се узму у обзир ограничења од значаја за квалитет процеса терестричког ласерског скенирања и да обезбиједи захтијевану тачност и поузданост, као и могућност контроле квалитета података.

Иако проблем оптимизације може бити сложен, уз јасно дефинисан циљ и постављена ограничења могуће је формулисати одговарајући математички модел и примјеном оптимизационих метода одредити најповољније рјешење у оквиру дефинисаног скупа услова. Сходно наведеном, задатак планирања ТЛС снимања формулише се као вишекритеријумски оптимизациони проблем.

1.2. Циљеви и полазне хипотезе истраживања

Основни циљ дисертације је развој модела за оптимизацију геометрије мреже станица терестричког ласерског скенирања и скенерских сигнала, којим се доказује да је могуће постићи повећање тачности регистрације облака тачака уз истовремено смањење броја станица ТЛС и скенерских сигнала, обима теренске припреме и времена обраде података.

У оквиру постављеног основног циља, дефинисани су сљедећи посебни циљеви:

- Анализа постојећих приступа у пројектовању ТЛС мрежа и идентификација њихових ограничења.
- Формулисање математичког модела вишекритеријумске оптимизације геометрије ТЛС мреже са јасно дефинисаним критеријумским функцијама и ограничењима.
- Дефинисање функционалних и геометријских услова који обезбјеђују потпуно скенирање објекта, довољан преклоп облака тачака, повољан упадни угао ласерског зрака, правилан просторни распоред скенерских сигнала.
- Испитивање утицаја распореда станица ТЛС и скенерских сигнала на тачност регистрације облака тачака.
- Верификација предложеног модела кроз нумеричке симулације и експериментална мјерења.

Полазне хипотезе овог истраживања су:

- **Прва хипотеза:** Интеграција допустиве области постављања терестричког ласерског скенера (пресјек зоне повољних вриједности упадног угла ласерског зрака и зоне препрека у непосредној близини објекта) и критеријума квалитета 3Д геодетске мреже може бити примјењена у оптимизацији мреже станица ТЛС и скенерских сигнала.
- **Друга хипотеза:** Значајно побољшање квалитета регистрације облака тачака може се постићи интегрисањем ограничења 3Д ласерског скенирања - као што су максимална дозвољена вриједност упадног угла ласерског зрака, услов потпуног скенирања објекта и минималан преклоп сусједних облака тачака - са критеријумима квалитета тродимензионалних геодетских мрежа.

1.3. Претходна истраживања

Геометрија скенирања представља један од кључних фактора који утиче на квалитет прикупљених података. Основни параметри који је одређују су растојање између скенера и објекта и упадни угао ласерског зрака, при чему повећање вриједности ових параметара доводи до смањења квалитета резултата скенирања. Анализом и моделовањем утицаја наведених параметара на тачност резултата терестричког ласерског скенирања бавила се Sylvie Shoba Soudarissanane у својој докторској дисертацији под називом *The Geometry of Terrestrial Laser Scanning*, одбрањеној у јануару 2016. године [45]. У наведеном истраживању идентификовани су и квантификовани извори грешака повезани са геометријом скенирања, развијени су модели за њихово описивање и ублажавање, те је анализиран утицај појединачних параметара геометрије скенирања на тачност скенирања.

Поред наведеног рада, утицај параметара геометрије скенирања, прије свега упадног угла ласерског зрака на квалитет терестричког ласерског скенирања, анализирали су и М. Пејић [30], S. Soudarissanane и сарадници [42], С. Kaasalainen и сарадници [20], J. Roca-Pardinas и сарадници [38], као и К. Тап и сарадници [47]. Наведена истраживања недвосмислено потврђују значај геометрије скенирања као једног од кључних фактора који утичу на квалитет резултата терестричког ласерског скенирања.

Аутори већине досадашњих радова бавили су се проблемом одређивања оптималног броја и распореда станица ТЛС за потпуно скенирање објекта или његовог дијела. Већина приступа заснована је на развоју алгоритама из области рачунарске геометрије, који у различитој мјери укључују специфичности и ограничења терестричког ласерског скенирања [4], [18], [24]. Иако ова технологија подразумијева прикупљање просторних (3Д) података, планирање се у већини случајева спроводи у хоризонталној равни, односно у дводимензионалном (2Д) координатном систему. Поједини приступи не разматрају преклоп између сусједних облака тачака, не узимају у обзир техничке спецификације инструмента нити стохастички модел скенирања, док се при планирању скенирања спољашњости објекта често занемарују препреке изван објекта, што може довести до неизводивих или субоптималних рјешења.

Оптимизацијом броја и распореда станица ТЛС и скенерских сигнала за потребе регистрације облака тачака бавила се Fengman Jia у својој докторској дисертацији под називом *A Model-based, Optimal Design System for Terrestrial Laser Scanning Networks in Complex Site* одбрањеној у августу 2019. године [17]. Предмет планирања обухватао је четири објекта у оквиру Универзитета у Калгарију. Аутор је увео хијерархијски приступ избора оптималних позиција скенера, примјењујући тежински похлепни алгоритам (енгл. *weighted greedy*) са промјенљивом резолуцијом, чиме је постигнута значајна ефикасност у брзини прорачуна, посебно код комплекснијих објеката. У модел су укључена техничка ограничења терестричког ласерског скенирања, која се односе на минималан и максималан домет скенера, као и на максималну дозвољену вриједност упадног угла ласерског зрака. Међутим, простор око објекта третиран је као празан, без разматрања препрека и интеракције са околним објектима. Преклоп између сусједних станица ТЛС није анализиран, а сва рачунања изведена су у дводимензионалном координатном систему. Иако предложени приступ показује високу алгоритамску ефикасност, модел оптимизације не обухвата сва кључна

ограничења процеса терестричког ласерског скенирања. Изостанак тродимензионалне анализе простора, анализе преклопа сусједних облака тачака и уважавања препрека може утицати на поузданост регистрације и квалитет ТЛС мреже у реалним условима скенирања.

Приједлог оптимизације броја и распореда станица ТЛС дали су Y. Dehbi и сарадници, у раду *Optimal scan planning with enforced network connectivity for the acquisition of three-dimensional indoor models* [10]. Предмет истраживања представља планирање скенирања унутрашњости објекта. Планирање је спроведено у хоризонталној равни, односно у дводимензионалном (2Д) координатном систему, без разматрања висинске компоненте простора. Рад је заснован на развоју алгорита за одређивање минималног броја станица ТЛС неопходних за потпуно скенирање унутрашњости објекта (површина зидова и подова), уз уважавање препрека и техничких ограничења која се односе на минималан и максималан домет скенера, као и максимално дозвољену вриједност упадног угла ласерског зрака. Преклоп између сусједних станица ТЛС разматран је кроз успостављање мрежне повезаности примјеном теорије графова. Међутим, избор оптималног броја и распореда скенерских сигнала није био предмет анализе. Иако наведени рад представља значајан допринос у области алгоритамског планирања скенирања унутрашњих простора, ограничење на хоризонталну (2Д) анализу и изостанак разматрања оптималног распореда скенерских сигнала указују на одређена методолошка ограничења.

1.4. Очекивани резултати и научни допринос докторске дисертације

Анализа досадашњих истраживања показује да, иако постоји значајан број радова посвећених планирању снимања терестричким ласерским скенерима, већина приступа посматра појединачне аспекте проблема, без њихове интеграције у јединствен, тродимензионални модел оптимизације. Недовољна повезаност геометријских, техничких и стохастичких елемената планирања указује на потребу за свеобухватним приступом који ће омогућити истовремену оптимизацију броја и распореда станица ТЛС и скенерских сигнала у реалним условима. Управо у том правцу усмјерено је ово истраживање.

Први научни допринос дисертације представља увођење концепта допустиве области постављања терестричког ласерског скенера у процес 3Д оптимизације броја и локација станица ТЛС. Допустива област дефинисана је линијом максималног удаљења инструмента од објекта узимајући у обзир препреке у непосредној близини објекта и линијом максималног приближења инструмента објекту у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака. Уколико се станица скенера позиционира унутар допустиве области са сигурношћу се може тврдити да за сваки видљиви дио објекта упадни угао не прелази максималну дозвољену вриједност и да се скенирање може изводити несметано. Увођењем допустиве области редукује се простор претраге станица ТЛС на оне локације које задовољавају геометријска ограничења (одсуство препрека и дозвољени упадни угао), чиме се повећава ефикасност оптимизације.

Други научни допринос дисертације представља интеграција принципа класичног 3Д геодетског пројектовања мреже у процес оптимизације терестричког ласерског скенирања. Ограничења 3Д ласерског скенирања, као што су максимална дозвољена

вриједност упадног угла ласерског зрака, услов потпуног скенирања објекта и минималан преклоп сусједних облака тачака, и критеријуми квалитета тродимензионалних геодетских мрежа интегрисани су у оптимизациони поступак с циљем одређивања оптималног броја и локација станица ТЛС и скенерских сигнала, уз уважавање присуства препрека у непосредној близини објекта и техничких карактеристика скенера.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРИКУПЉАЊА ПРОСТОРНИХ ПОДАТАКА ТЕРЕСТРИЧКИМ ЛАСЕРСКИМ СКЕНЕРИМА

У посљедње три деценије, на тржишту геодетских инструмената све су више заступљени системи за ласерско скенирање, како терестрички, тако и системи за снимање из ваздуха, те се ова технологија све чешће примјењује као ефикасно средство за прикупљање просторних података. У поређењу са конвенционалним методама прикупљања података, које се заснивају на примјени геодетских инструмената као што су тоталне станице, ГНСС и фотограметријски системи, уочава се суштинска разлика у приступу. Наиме, конвенционалне методе омогућавају прикупљање просторних информација о појединачним, репрезентативним тачкама, док ласерски скенери омогућавају формирање густог тродимензионалног облака тачака, који садржи висок ниво детаљности о структури објекта снимања. Поред три просторне координате, свака тачка у облаку садржи и додатну информацију у виду интензитета повратног сигнала, што представља значајан извор података за даљу анализу и интерпретацију.

Развојем технологије током времена дошло је до значајног проширења спектра примјене метода прикупљања просторних података. У том контексту развијени су различити типови ласерских скенера, који су оптимизовани у складу са специфичним захтјевима и условима примјене. Терестрички ласерски скенери данас налазе широку примјену у бројним областима, прије свега захваљујући својим техничко-технолошким карактеристикама, међу којима се издвајају могућност бесконтактног мјерења, велики домет, висок степен тачности, као и висока ефикасност у погледу брзине прикупљања и количине података.

Међутим, почетни развој ласерског скенирања није био усмјерен ка примјени у геодезији. Први ласерски скенери нису посједовали могућност центрисања изнад тачке, нити оријентације према оријентационој тачки, што представља једно од основних ограничења за њихову геодетску примјену. Ова ограничења присутна су и код појединих савремених система. У раној фази развоја, ласерски скенери били су намијењени за мјерење кратких растојања и примарно су коришћени у индустријске сврхе. Даљим технолошким напретком развијени су скенери са знатно већим дометом, чиме је омогућена њихова примјена у сложенијим системима, посебно у петрохемијској индустрији. Примјеном ласерског скенирања омогућено је тродимензионално приказивање сложених индустријских постројења, што представља значајан напредак у односу на дотадашње дводимензионалне приказе.

У геодезији се примјењују бесконтактни ласерски скенери, који омогућавају прикупљање просторних података са одређеног растојања, без физичког контакта са објектом снимања. У односу на конвенционалне геодетске методе, процес прикупљања података је знатно бржи, имајући у виду количину и ниво детаљности прикупљених информација, док је накнадна обрада података временски захтјевнија. Различити дијелови објекта могу се скенирати у различитим резолуцијама, у зависности од захтјева пројекта.

Већина савремених система посједује интегрисану камеру, која омогућава визуелизацију поља снимања, као и добијање фотографија објекта. Примјеном *RGB* сензора обезбјеђује се приказ објекта у природним бојама, што додатно омогућава

корекцију боја током обраде облака тачака и доприноси реалистичнијем приказу резултата.

Након извршеног скенирања, спроводи се поступак регистрације, односно геореференцирања, а затим и обрада 3Д облака тачака, у складу са захтјевима и циљем конкретног задатка.

2.1. Основне компоненте терестричких ласерских скенера

Терестрички ласерски скенер представља инструмент који омогућава прикупљање просторних података у виду густог и правилно распоређеног скупа тродимензионалних тачака, познатог као облак тачака. Основне компоненте терестричког ласерског скенера су [30]:

- систем за одређивање растојања и рефлективности површи објекта,
- систем за скретање (дивергенцију) ласерског снопа и мјерење праваца.

Главне карактеристике терестричких ласерских скенера су (Табела 2-1):

- домет,
- прецизност мјерења,
- резолуција скенирања,
- видно поље и
- брзина скенирања.

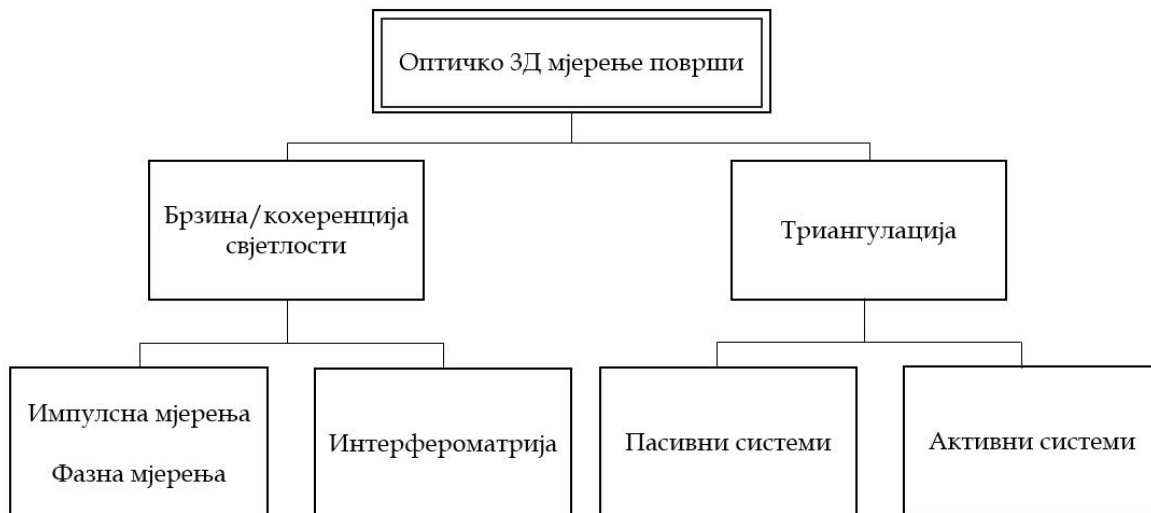
Табела 2-1. Карактеристике појединих комерцијалних терестричких ласерских скенера који се користе за снимање инжињерских објеката [32]

Модел ТЛС-а	Прецизност	Резолуција	Брзина [тач./s]	Видно поље [°]	Домет [m]
Leica Geosystems Scan Station P50	Растојање: 1.2 mm + 10 mm/km Н/В правац: 8" Модел: 2 mm Типске маркице (BW маркице): 2 mm/50 m	0.8 mm/10 m	до $1 \cdot 10^6$	360/290	>1000
Leica Geosystems Scan Station RTC360	Позиција: 1.9 mm/10 m; 5.3 mm/40 m Растојање: 1 mm + 10 mm/km Н/В правац: 18"	3,6,12 mm /10 m	до $2 \cdot 10^6$	360/360	130
Leica Geosystems Scan Station C10	Позиција: 6 mm/50 m Растојање: 4 mm/50 m Н/В правац: 12" Модел: 2 mm Типске маркице (BW маркице): 2 mm/50 m	1 mm	50 000	360/270	300
Riegl VZ-400i	Позиција: 5 mm/100 m	V: 2.5" H: 1.8"	500 000	360/100	800

Riegl VZ-400	Позиција: 5 mm/100 m	1.8"	42 000 122 000	360/200	600
Zoller+ Fröhlich IMAGER 5010	Растојање: 1.2 mm/50m 3.8 mm/100 m Н/В правац: 25" Модел: 2 mm	V: 1.4" Н: 0.7"	$1.016 \cdot 10^6$	360/320	187
Trimble CX TX8	Растојање: 2.2 mm/80 m 2 mm/50 m Н/В правац: 17"	5.7 mm/30 m	до $1 \cdot 10^6$	360/317	340
Trimble CX 3D	Позиција: 4.5 mm/30 m 7.3 mm/50 m Растојање: 1.2 mm/30 m 2 mm/50 m Н/В правац: 15"/25" Модел: 3 mm	7"	54 000	360/300	80
FARO FocusPlus	Растојање: 2 mm/10 m; 3.5 mm/25 m Н/В правац: 19"	30"	до $2 \cdot 10^6$	360/300	350
FARO Focus 3D	Растојање: 2 mm/25 m	30"	$0.976 \cdot 10^6$	360/305	120
FARO Focus ^S 350 PLUS	Растојање: ± 1 mm Н/В правац: 19"	0.009°	до $2 \cdot 10^6$	360/300	350
FARO Focus ^S 70	Растојање: ± 1 mm Н/В правац: 19"	0.009°	$0.976 \cdot 10^6$	360/305	70
Teledyne Optech Polaris	Позиција: 4 mm/100 m Растојање: 5 mm/100 m Н/В правац: 16"	2.5"	500 000	360/120	>2000
Optech ILRIS-3D	Растојање: 4 mm/100 m Н/В правац: 16.5"	4"	/	40/40	1200

2.2. Основни принципи одређивања растојања помоћу терестричких ласерских скенера

Системи за оптичко 3Д мјерење површи класификују се према методи мјерења, па се разликују: системи засновани на методи триангулације и системи засновани на методама у којима се користи брзина или кохеренција свјетлости (Слика 2-1).



Слика 2-1. Класификација оптичких тродимензионалних мјерних система [32]

Терестрички ласерски скенери користе три основне врсте ласерских даљиномјера за одређивање растојања. Опсег и тачност мјерења директно зависе од избора система за мјерење дужина. Класификација терестричких ласерских скенера се може извршити према примјењеној методи одређивања растојања. На тај начин могу се издвојити сљедеће основне методе: [30]:

- Метода импулног мјерења (енгл. *Direct Time Of Flight* - DTOF) – помоћу ове методе могуће је мјерити растојања до неколико стотина метара, а код појединих система и растојања већа од једног километра. Велики опсег мјерења, међутим, утиче на тачност, која је у овом случају реда центиметара. Скенери код којих је принцип одређивања растојања заснован на принципу мјерења времена познати су као *импулсни скенери*.
- Метода фазних мјерења (енгл. *Indirect Time Of Flight* - ITOF) – овом методом постиже се милиметарска тачност, а погодна је за мјерење растојања до око 100 метара. Скенери код којих је принцип одређивања растојања заснован на мјерењу фазне разлике познати су као *фазни скенери*.
- Активни системи триангулације – због малог домета, до 1 m, ова метода одређивања растојања се не примјењује у геодетском инжењерству.

Импулсни скенери за мјерење растојања користе ласерске импулсе умјесто континуалног ласерског зрака, због чега су добили назив импулсни скенери. Фреквенција импулса је ограничена чињеницом да предајник не може послати нови импулс прије него што претходни импулс, након рефлексије од објекта, стигне до пријемника. Прецизно електронско мјерење времена представља кључни фактор за ову методу одређивања растојања.

Типичан импулсни скенер може да измјери од 300 хиљада до 2 милиона тачака у секунди. Тачност мјерења растојања импулсним скенерима зависи од три фактора:

- способност скенера да селекује позицију истог импулса на предајнику и пријемнику да би се измјерио временски интервал, при чему је тачност овог интервала ограничена јачином сигнала, шумовима и сличним параметрима,
- тачност мјерења времена од тренутка емитовања до тренутка пријема рефлектованог сигнала унутар скенерског система,
- тачност инструмента за мјерење времена.

Висока концентрација емитоване ласерске енергије, карактеристична за импулсне скенере, омогућава да се постигне повољан однос сигнала и шума (енгл. *Signal-to-Noise Ratio - SNR*) чиме се обезбјеђује висока тачност мјерења дужина. Међутим, недостатак импулсних скенера је немогућност прецизног детектовања тренутка доласка ласерског импулса до пријемника, што је изазвано сталним промијенама оптичких и атмосферских карактеристика.

Код фазних скенера ласерски зрак модулисан у амплитуду емитује се према објекту, рефлектује се од објекта и враћа се до пријемника при чему се мјери фазна разлика између емитованог и примљеног зрака, као и вријеме између тренутка емитовања и пријема. Сигнали се модулишу коришћењем синусне криве базиране на амплитуди или базиране на фреквенцији. Тачност фазних скенера је ограничена сљедећим факторима [3]:

- фреквенција сигнала или модулација,
- тачност мјерења фазне разлике,
- промијена индекса рефракције,
- стабилност модулятора осцилација,
- турбуленције ваздуха кроз који пролазе модулисане осцилације.

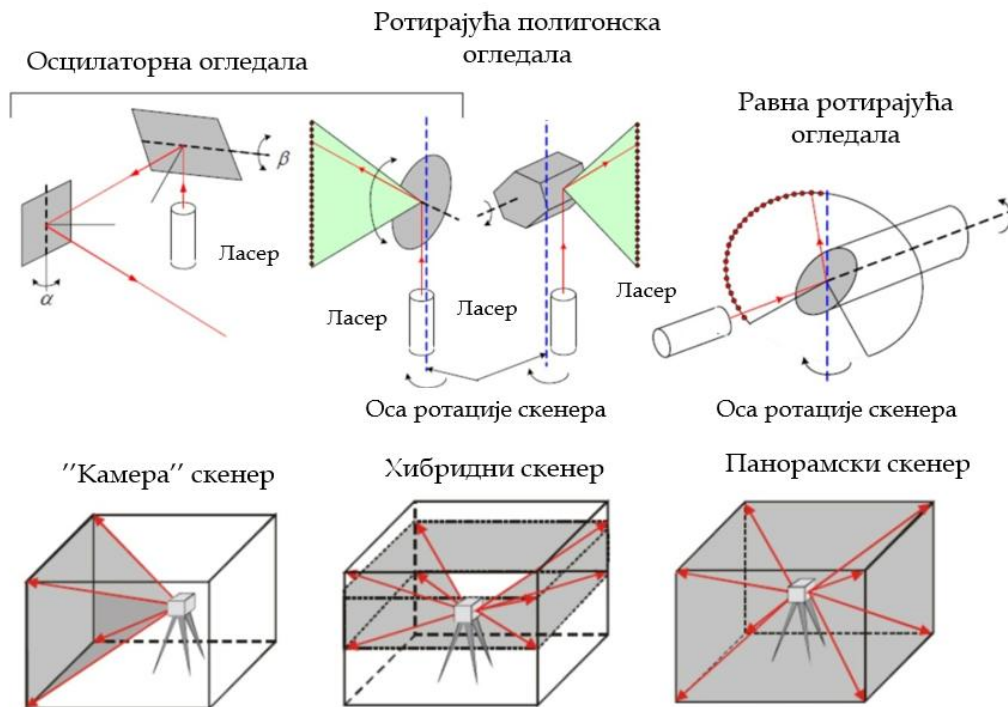
2.3. Систем за дивергенцију ласерског снопа и одређивање вриједности праваца

У технологији ТЛС се користе три врсте система за дивергенцију (скретање) ласерског снопа (енгл. *beam deflection unit*): осцилаторна (галванометријска) огледала, ротирајућа полигона огледала и равна ротирајућа огледала. Видно поље скенера зависи од врсте огледала које се користи за скретање ласерског снопа.

У зависности од система за скретање ласерског снопа разликују се сљедећи терестрички ласерски скенери (Слика 2-2):

- "Камера" скенери – видно поље скенирања је ограничено на $40^\circ \times 40^\circ$. Хоризонтално и вертикално осцилаторно огледало усмјеравају ласерски зрак. Ови скенери имају велики домет, али узак опсег скенирања.
- Панорамски скенери – видно поље скенирања износи $360^\circ \times 310^\circ$, при чему се простор испод статива не скенира. Равно ротирајуће огледало усмјерава ласерски зрак у вертикалној равни, док се инструмент ротира око вертикалне осе. Предност ових скенера је велико поље скенирања и велика брзина скенирања, али им је домет кратак.

- Хибридни скенери – опсег скенирања у хоризонталној равни износи 360° , а у вертикалној равни се креће од 60° до 80° . Користе ротирајуће или осцилирајуће огледало.



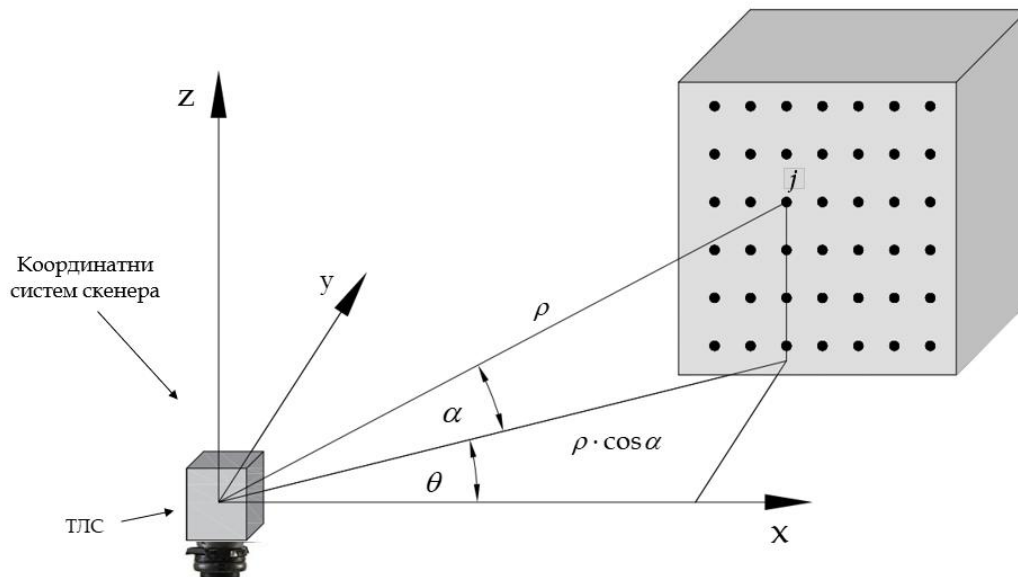
Слика 2-2. Класификација ТЛС у зависности од система за дивергенцију ласерског снопа и видног поља скенирања [39]

Вриједност хоризонталног и вертикалног угла ласерског зрака мјери се електрооптички, помоћу енкодера, на начин сличан примјени код тоталних станица.

2.4. Елементи мјерења и координатни систем ТЛС-а

Принцип рада терестричких ласерских скенера сличан је принципу рада тоталних станица. ТЛС метода снимања практично одговара тахиметријској (поларној) методи снимања детаља тоталном станицом. Главна разлика између ова два инструмента огледа се у изузетној брзини прикушљања података коју омогућавају терестрички ласерски скенери, док тоталне станице карактерише веома висока тачност појединачних мјерења на типску маркицу или призму [30].

Резултати мјерења терестричким ласерским скенером (Слика 2-3) су: коса дужина (ρ), хоризонтални правац (θ), вертикални угао (α) и интензитет регистрованог повратног сигнала (I). Свака тачка у облаку тачака је једнозначно дефинисана са три поларне координате (ρ, θ, α) које представљају изворне резултате опажања или необрађене податке (енгл. *raw data*). У практичним примјенама резултатима скенирања се сматрају правоугле координате (x, y, z) и интензитет регистрованог повратног сигнала (I) – излазни подаци (енгл. *output data*) [31].



Слика 2-3. Принцип скенирања и резултат мјерења терестричким ласерским скенером

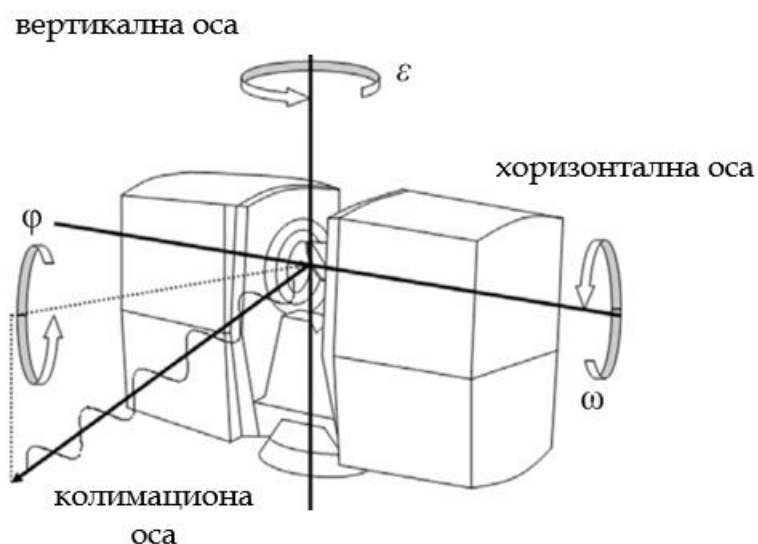
Математичка веза између поларних и правоуглих координата је дефинисана следећим једначинама [28], [32]:

$$\begin{aligned}
 x_j &= \rho_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij}, \\
 y_j &= \rho_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij}, \\
 z_j &= \rho_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij},
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

или обрнуто:

$$\begin{aligned}
 \rho_{ij} &= \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2}, \\
 \alpha_{ij} &= \arcsin \left(\frac{\Delta z_{ij}}{\sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2}} \right), \\
 \theta_{ij} &= \arctg \left(\frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_{ij}} \right),
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

при чему се индекс i односи на терестрички ласерски скенер, а индекс j на тачку на објекту.



Слика 2-4. Главне осе терестричког ласерског скенера [26]

На овај начин се добија модел објекта у форми облака тачака у координатном систему скенера, чије је геометријско исходиште смештено у електрооптичком центру скенера. Координатни систем скенера је дефинисан на следећи начин (Слика 2-4) [30]:

- z -оса се подударе са обртном осом скенера (прва главна оса ТЛС-а), која током скенирања мора бити вертикална.
- x -оса се подударе са инструменталном оптичком осом скенера (друга главна оса ТЛС-а), која одговара обртној оси дурбина код класичног тахиметра (теодолита). Током скенирања ова оса мора бити хоризонтална.
- y -оса се подударе са колимационом осом ТЛС-а, која одговара визурној оси тахиметра. Управна је на претходне двије координатне осе и образује правоугли координатни систем према правилу "десне руке".

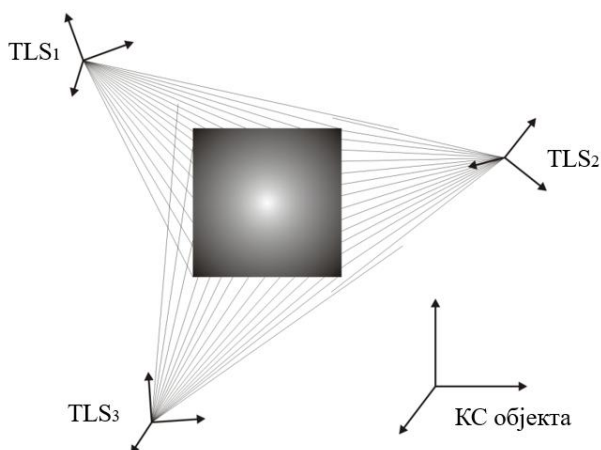
2.5. Регистрација и геореференцирање облака тачака

Регистрација и геореференцирање облака тачака представљају кључне кораке у обради података добијених терестричким ласерским скенерима.

Због препрека као што су дрвеће, околни објекти, стубови или друге физичке баријере, као и због димензија и конструкције објекта, скенирање се обично изводи са више стајних тачака ($TLS_1, TLS_2, \dots, TLS_i$). У процесу накнадне обраде, сваки појединачни облак тачака је потребно трансформисати у јединствени координатни систем (Слика 2-5).

Регистрација облака тачака представља тродимензионалну трансформацију више појединачних облака тачака у јединствени координатни систем, односно њихово спајање у јединствен (заједнички) облак тачака. За координатни систем заједничког облака тачака може се изабрати координатни систем било којег од појединачних облака тачака или координатни систем у односу на осовину објекта. Трансформација заједничког облака тачака у државни координатни систем или координатни систем локалне геодетске мреже представља геореференцирање облака тачака. Геореференцирање појединачног облака тачака могуће је извести директно,

под условом да сваки облак тачака садржи довољан број параметара неопходних за такав поступак [32].

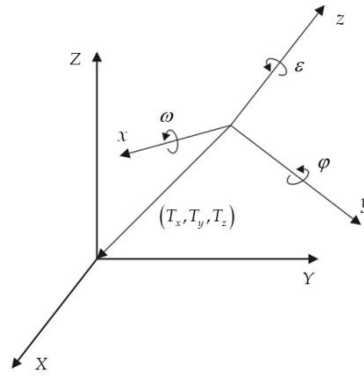


Слика 2-5. Однос координатног система скенера и координатног система геодетске контролне мреже објекта [12]

2.5.1. Математички модел регистрације и геореференцирања

За потребе трансформације облака тачака у резултујући координатни систем неопходно је одредити трансформационе параметре. У основи готово свих алгоритама најмјешених за обраду података скенирања је шестопараметарска (три translације и три ротације) или четворопараметарска (три translације и ротација око Z осе) трансформација, јер код скенирања углавном не постоји потреба за увођењем фактора размјере због релативно кратких дужина. Четворопараметарска трансформација се примјењује када скенер посједује двоосни компензатор нагиба који обезбјеђује материјализацију вертикалне осе са довољном тачношћу. Међутим, у специфичним случајевима, као што је потреба за калибрацијом размјере облака тачака помоћу тачака контролне геодетске мреже, уводи се фактор размјере као седми непознати трансформациони параметар [32]. Таква трансформација се назива Хелмертова седмопараметарска трансформација, или конформна трансформација сличности. Ове двије терминологије описују исти математички поступак: ротације, translације и размјеру која се примењује на све координате једнако, уз очување геометрије облака тачака.

Функционални модел регистрације и геореференцирања који ће се даље разматрати заснива се на седмопараметарској трансформацији (конформна трансформација сличности/Хелмертова трансформација) којом се координате тачака из једног тродимензионалног правоуглог координатног система (x, y, z) трансформишу у други тродимензионални правоугли координатни систем (X, Y, Z) (Слика 2-6).



Слика 2-6. Трансформација координата [32]

Матрични облик вектора ротације (ω) око осе x [30]:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{X}', \quad (2.3)$$

или [30]

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Матрични облик вектора ротације (φ) око осе y [30]:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{X}_1, \quad (2.5)$$

или [30]

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Матрични облик вектора ротације (ε) око осе z [30]:

$$\mathbf{X}_3 = \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{X}_2, \quad (2.7)$$

или [30]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon & 0 \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Јединствени запис вектора ротације око све три координатне осе гласи [30]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{X}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}', \quad (2.9)$$

при чему матрица ротације \mathbf{R} има следећи облик [30]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon & \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varepsilon + \cos \omega \cdot \sin \varepsilon & -\cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varepsilon + \sin \omega \cdot \sin \varepsilon \\ -\cos \varphi \cdot \sin \varepsilon & -\sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon + \cos \omega \cdot \cos \varepsilon & \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon + \sin \omega \cdot \cos \varepsilon \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Матрица ротације \mathbf{R} је ортогонална матрица. Свака ортогонална матрица је регуларна матрица, па је њена инверзија једнака њеној транспонованој матрици ($\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$). У том случају систем једначина (2.9) се може записати на сљедећи начин [30]:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{X}. \quad (2.11)$$

Множењем (2.11) са фактором размјере (S) и додавањем параметара транслације (T_x, T_y, T_z) добија се математички модел трансформације [30]:

$$\begin{aligned} X &= S(m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z) + T_x, \\ Y &= S(m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z) + T_y, \\ Z &= S(m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z) + T_z, \end{aligned} \quad (2.12)$$

при чему су m_{ij} елементи матрице ротације. Систем једначина (2.12) садржи седам непознатих ($S, \omega, \varphi, \varepsilon, T_x, T_y, T_z$). Матрични запис математичког модела трансформације [30]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{T}. \quad (2.13)$$

Математички посматрано, за добијање јединственог рјешења потребно је образовати седам једначина, за шта би на примјер било потребно шест координата двију познатих тачака ($X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$) и висина треће тачке (Z_3) или двије познате тачке по положају и три познате тачке по висини. Међутим, са аспекта тачности и поузданости математичког модела трансформације, овај број тачака обично није довољан. Да би се побољшала поузданост и прецизност одређивања трансформационих параметара, препоручује се коришћење већег броја познатих тачака од минимално потребног, чиме се формира више независних једначина него што је математички неопходно. У оваквим случајевима могуће је примјенити метод најмањих квадрата (МНК). Оптималан број идентичних тачака за ову методу је четири, уз услов да су равномерно и правилно распоређене. За оптималан број идентичних тачака средњи коефицијент унутрашње поузданости износи $\bar{R} = (n - u) / n = (12 - 7) / 12 = 0.42$ што је веће од оптималне вриједности коју су геодети усвојили за средњи коефицијент поузданости ($\bar{R} = 0.40$) [35].

Нелинеаран систем једначина (2.12) се мора линеаризовати. За потребе линеаризације морају се одредити приближне вриједности непознатих параметара модела, што није једноставан задатак. Методе које се најчешће користе за одређивање приближних вриједности непознатих параметара су засноване на векторској алгебри [11], кватерниону [46] или ортогоналној анализи [6].

Линеаризовани изрази за сваку идентичну тачку имају следећи облик [30]:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \omega}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\partial Y}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \omega}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 0 & 1 & 0 \\ \left(\frac{\partial Z}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial S}\omega\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dS \\ d\omega \\ d\varphi \\ d\varepsilon \\ dT_x \\ dT_y \\ dT_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Током примјене МНК треба водити рачуна и о стохастичком моделу. Додатни параметри помоћу којих се може унаприједити квалитет трансформације су стандардна одступања идентичних тачака позната у оба координатна система. У том случају се говори о *уопштеном* (генерализованом, комбинованом) *МНК моделу*.

Уколико се два облака тачака региструју примјеном уопштеног МНК, опажањима се сматрају координате идентичних тачака у оба координатна система са одговарајућим дисперзијама. За сваку идентичну тачку формирају се три једначине [30]:

$$\begin{aligned} f_1 &= S(m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z) + T_x - X, \\ f_2 &= S(m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z) + T_y - Y, \\ f_3 &= S(m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z) + T_z - Z. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Уопштени МНК модел има следећи облик [30]:

$$f(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{x}}) = 0, \quad (2.16)$$

при чему су: $\hat{\mathbf{l}}$ - вектор изравнатих опажања; $\hat{\mathbf{x}}$ - вектор изравнатих трансформационих параметара. Математички модел се генерализује увођењем коваријационе матрице [23]:

$$\mathbf{C}_{ll} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_X^2 \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

при чему су: σ_x^2 - дисперзије (варијансе) опажања; σ_X^2 - дисперзије координата идентичних тачака. У том случају матрица тежина има следећи облик [30]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_x^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_X^{-1} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

На примјер, уколико је у поступку геореференцирања тачност координата тачака контролне мреже објекта већа од тачности координата тачака у облаку тачака, тачке контролне мреже треба третирати као да су без грешке. У супротном, ако је та тачност истог реда или мања онда тачност тачака контролне мреже треба узети у обзир преко дисперзија слободних чланова једначина поправака.

Уколико се дисперзије координата датих тачака могу занемарити у односу на тачност тачака у облаку тачака, примјењује се параметарски МНК модел [30]:

$$\hat{\mathbf{I}} = f(\hat{\mathbf{x}}), \quad (2.19)$$

са коваријационом матрицом која укључује само опажања из облака тачака [23]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \cdot \mathbf{Q}_x^{-1}. \quad (2.20)$$

2.5.2. Методе регистрације облака тачака

За регистрацију облака тачака неопходно је да је један заједнички дио објекта скениран у оквиру двије станице или да постоји довољан број познатих тачака у два координатна система појединачних станица.

Параметри 3Д трансформације координата на основу података скенирања се могу одредити на један од следећих начина [39]:





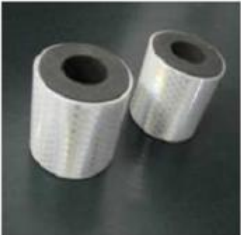
- специјалним алгоритмима за препознавање идентичних типских скенерских сигнала (енгл. *target recognition*) карактеристичних за сваки тип скенера,
- идентификацијом морфолошких детаља за обе станице,
- алгоритмима за уклапање површи (енгл. *surface matching*),
- помоћу правилних геометријских облика (сфера, раван, цилиндар и сл.).
- комбинацијом претходно наведених метода.

2.5.2.1. Регистрација типским скенерским сигналимa

Ова метода представља најпоузданији начин регистрације облака тачака. Прије почетка скенирања, објекат се сигналише скенерским сигналимa, који се распоређују како на самом објекту, тако и у његовој непосредној близини, чиме се омогућава поуздана регистрација сусједних облака тачака. На *Слици 2-7* приказане су различите врсте скенерских сигнала.

Скенерски сигнали могу се класификовати на следеће врсте [30]:

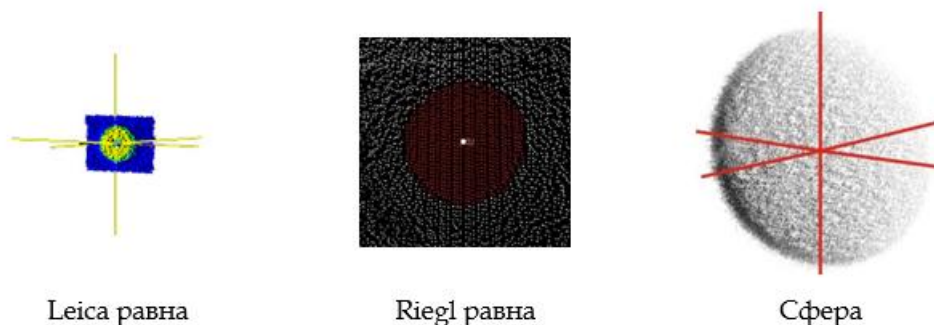
- Равни скенерски сигнали (маркице) нису погодни за примјену у случајевима већих удаљености од скенера, као ни при великим упадним угловима ласерског зрака у односу на нормалу површи скенирања.
- Тродимензионални скенерски сигнали (сфере различитих пречника) погодни су за препознавање из различитих смјерова скенирања, за разлику од равних сигнала.
- Комбиновани скенерски сигнали представљају спој равних и тродимензионалних сигнала. У пракси се најчешће користе полусфере или сигнали који су видљиви из два супротна смјера (под углом од 180°), чиме се омогућава њихова ефикасна примјена у различитим условима скенирања.

Равни сигнали			
			
Leica, <u>Zoller+Fronlich</u>	Leica	Trimble	Riegl
Тродимензионални сигнали			
			
Leica, Trimble, итд.		Riegl	

Слика 2-7. Врсте скенерских сигнала [30]

У поступку препознавања и одређивања позиције скенерског сигнала, одређивање његовог центра са задовољавајућом прецизношћу има кључну улогу. Водећи произвођачи терестричких ласерских скенера, у оквиру пратећих софтвера за обраду података, развили су алгоритме за аутоматско препознавање сигнала и одређивање њиховог центра. Област скенерског сигнала се софтверски препознаје и издваја, након чега се над њом врши прецизнија обрада у тзв. фином моду високе резолуције.

Центар сигнала одређује се на основу високе редувантности података, при чему је прецизност директно зависна од густине тачака на сигналу. На примјер, за терестричке ласерске скенере произвођача *Leica Geosystems*, прецизност одређивања центра сигнала износи приближно 2 mm на удаљености од око 50 m. Прецизност одређивања центра сигнала опада са порастом удаљености од скенера, што је последица смањења густине тачака на сигналу, као и утицаја атмосферских услова и карактеристика инструмента. Добијене координате центра сигнала користе се као познате величине у поступку регистрације облака тачака.



Слика 2-8. Детаљно скенирање скенерског сигнала [30]

2.5.2.2. Регистрација по морфолошким детаљима

Регистрација по морфолошким детаљима примјењује се када објекти нису приступачни за обиљежавање скенерским сигнаlima, као што су нестабилне косине, високе зграде и слично. У тим случајевима, морфолошке тачке детаља идентификују се мануелно у два сусједна облака тачака. Јавља се проблем немогућности поуздане идентификације истих тачака у два независна скупа података, што смањује прецизност регистрације. Прецизност се може побољшати скенирањем карактеристичних детаља објекта са већим нивоом детаљности [30].

Тачке за регистрацију, било да се регистрација изводи помоћу скенерских сигнала или морфолошких тачака детаља, морају бити равномјерно распоређене у простору и по дубини објекта [32].

2.5.2.3. Регистрација најбољим уклапањем површи

Регистрација најбољим уклапањем површи (енгл. *surface matching*) је новија метода, која има велику перспективу. Имплементирана је у софтвере појединих произвођача терестричких ласерских скенера, као што је софтвер Riegl RISCAN PRO (модул "*Multi Station Adjustment*") или Leica Cyclone (модул "*Cloud Registration*").

Регистрација уклапањем површи је базирана на ICP методи (енгл. *Iterative Closest Point*), којом се облак тачака или његов модел површи трансформише на основу поређења са референтним облаком тачака или референтном моделованом површи.

Параметар размјере се не укључује [1], што значи да је у питању шестопараметарска трансформација. Трансформација се спроводи итеративно, уз претходно извођење грубе регистрације ради одређивања приближних вриједности трансформационих параметара.

ICP метода подразумијева принцип тражења рјешења са минималном сумом квадрата Еуклидског растојања између два скупа тачака (облак тачака који се уклапа и референтни облак тачака). Сумирање се изводи у пресеку два скупа тачака, односно у преклопу два сусједна облака тачака. Приједлог оцијене трансформационих параметара дао је Berthold K.P. Horn. Он координате скупа тачака изражава у односу на тежиште скупа па се на тај начин обезбјеђује независна оцијена параметара ротације и translације. Међутим, МНК рјешење је без стохастичког модела. Основни ICP алгоритам је детаљно представљен код [32].

Једно од побољшања оригиналног ICP алгоритма је МНК 3Д уклапање [2], развијено за потребе регистрације података скенирања. Побољшано рјешење је засновано на параметарском МНК моделу који подразумијева увођење тежина и откривање грубих грешака. Претходно је потребно извршити грубу регистрацију за одређивање приближних вриједности трансформационих параметара. У поређењу са оригиналним моделом, рјешење брже конвергира, обично након пет до осам итерација [1], [2].

Предност методе уклапања површи се огледа у томе што се објекат прије скенирања не мора сигнализирати, па је изузетно погодна за регистрацију података скенирања код неприступачних објеката. Међутим, уколико се скенирају платои, саобраћајнице, тунели равних унутрашњих оплата ова метода регистрације не даје добре резултате [32].

2.5.2.4. Регистрација правилним геометријским фигурама

За ову методу регистрације неопходне су идентичне фигуре правилних геометријских облика (равни, сфере, цилиндри и сл.) у оба координатна система. Регистрација се врши најбољим уклапањем одабраних фигура, које требају бити правилно оријентисане у три ортогонална правца. Типичан примјер повољне регистрације је угао просторије где се срећу три равни зида или индустријска постројења са велики бројем фигура правилног геометријског облика [32].

2.5.2.5. Комбинација метода

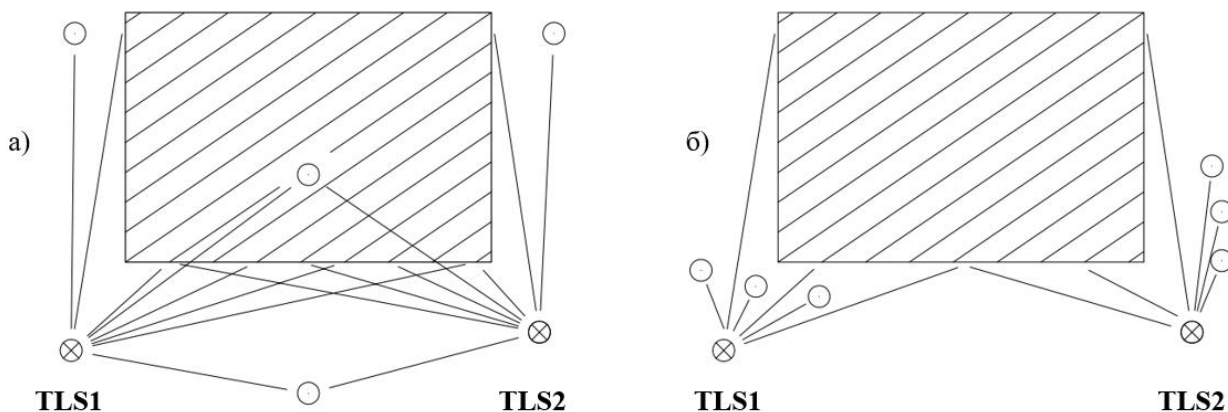
У поступку регистрације могу се истовремено примјењивати различити типови скенерских сигнала, мануелна идентификација и уклапање површи. Комбиновање метода се примјењује када је потребно побољшати тачност или убрзати поступак регистрације [32].

2.5.3. Методе геореференцирање облака тачака

Након регистрације облака тачака слиједи поступак трансформације заједничког облака тачака у државни координатни систем или координатни систем контролне мреже објекта, што представља поступак *геореференцирања облака тачака* [30]. Могуће је геореференцирати и појединачни облак тачака, уз услов да појединачни облак тачака садржи довољан број датих тачака (датих параметара) за поступак трансформације.

Тачност и поузданост геореференцирања зависи од тачности датих тачака и од њиховог распореда. На *Слици 2-9* приказан је добар и неповољан (лош) распоред датих тачака за геореференцирање.

Геореференцирање се може изводити директном или индиректном методом. Избор методе зависи од претходно дефинисане методологије мјерења, карактеристика радилишта, захтјеване тачности скенирања, као и техничких, економских и оперативних услова рада.



Слика 2-9. Распоред тачака за геореференцирање: а) Добар, б) Неповољан (лош);

⊗ - Станица скенера (TLS), ⊙ - Тачка контролне геодетске мреже. Тачке за геореференцирање могу бити и на објекту [37]

2.5.3.1. Метода директног геореференцирања

Метода директног геореференцирања је заснована на тахиметријској методи геодетског премјера. Терестрички ласерски скенер се центрише над познатом тачком, тачком која има познате све три координате, мјери се висина скенера над познатом тачком и узима оријентација на другу познату тачку. На тај начин су обезбјеђени сви елементи неопходни за директну методу геореференцирања. Ови подаци се прије почетка скенирања уносе у софтвер скенера, те је у том случају скенирани облак тачака у координатном систему контролне геодетске мреже. Примјена ове методе геореференцирања је могућа уколико терестрички ласерски скенер посједује висак (оптички или дигитални), либелу (центричну, цјевасту или дигиталну), компензатор, могућност мјерења висине инструмента и пратећи софтвер. Непосједовање двоосног компензатора доводи до значајне денивелације облака тачака и до грешке центрисања и до неколико милиметара уколико је ТЛС постављен на стуб. Тек од скоро терестрички ласерски скенери посједују ове уређаје, што до прије неколико година није био случај [32].

Позиција и оријентација терестричког ласерског скенера се може одредити помоћу ГНСС пријемника или тоталне станице. Поједини терестрички ласерски скенери посједују дурбин па је могуће извршити визирање на оријентациону тачку (скенери произвођача Callidus). Међутим, већина скенера користи типске скенерске сигнале и алгоритме за аутоматско препознавање и одређивање центра скенерског сигнала [30].

У директном геореференцирању може се користити метода геодетског премјера позната као "пресјецање назад" [32].

Математички модел трансформације координатног система скенера у координатни систем контролне геодетске мреже има сљедећи облик [32]:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{R}_s(\varepsilon)\mathbf{X}_s + \mathbf{T}_{sk} \quad (2.21)$$

при чему се индекс k односи на координатни систем контролне геодетске мреже, а индекс s на координатни систем скенера. Матрица ротације $\mathbf{R}_s(\varepsilon)$ је у функцији само параметра ротација око z -осе, јер су због посједовања компензатора нагиба параметри φ и θ готово једнаки нули. Параметар ротације око z -осе (ε) се одређује оријентацијом ТЛС на другу тачку контролне геодетске мреже.

Метода директног геореференцирања у геодетском инжењерству је погодна за скенирање линијских објеката (путеви, тунели, жељезничке пруге и сл.), и то ако је довољна центиметарска тачност прикупљених података [30].

2.5.3.2. Метода индиректног геореференцирања

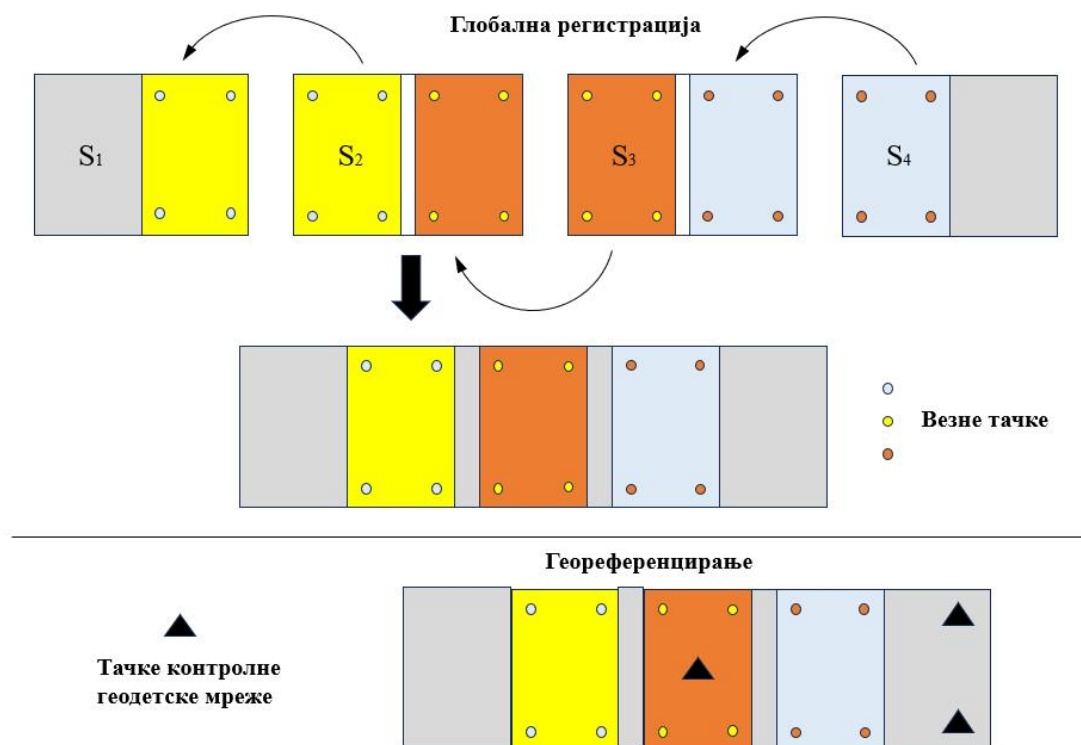
Метода индиректног геореференцирања захтијева постојање два скупа координата идентичних тачака, и то координате идентичних тачака у координатном систему скенера и у координатном систему контролне геодетске мреже.

Прије скенирања објекат је потребно сигнализати, затим са контролне геодетске мреже одредити координате скенерских сигнала у координатном систему инжењерског објекта. Пројектовање контролне геодетске мреже је обавезно код

радова високе тачности. Контролна мрежа мора бити одређена прецизно и поуздано, при чему су геодете за поуздану геодетску мрежу усвојили ону за коју се коефицијенти унутрашње поузданости $\min R_{ii} \geq 0.20$ и средњи коефицијент $\bar{R} \geq 0.40$ [33], [35].

Процес индиректног геореференцирања се изводи у једном или два корака. Индиректно геореференцирање облака тачака у два корака подразумијева следеће радње [32]:

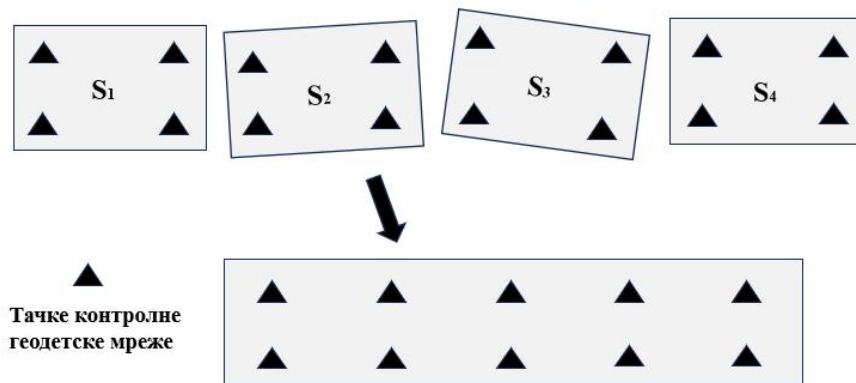
- **Корак 1.** Регистрација облака тачака насталих са различитих станица ТЛС. У појединим софтверима користи се термин глобална регистрација, а односи се на регистрацију више облака тачака. У примјеру на *Слици 2-10* регистрација се изводи помоћу везних тачака чије су координате познате у координатном систему сусједних станица. Резултат регистрације је јединствен облак тачака у координатном систему станице S_1 .
- **Корак 2.** Геореференцирање или трансформација глобално регистрованог облака тачака из координатног система изабране станице S_1 у координатни систем инжињерског објекта (*Слика 2-10*). Умјесто везних тачака у поступку трансформације се користе сигнализоване тачке на објекту које припадају контролној геодетској мрежи. Метод трансформације координата је исти као код регистрације и заснован је на шестопараметарском или четворопараметарском моделу. Геореференцирање је могуће изводити и на основу идентификације тачака морфолошких детаља и методом уклапања површи.



Слика 2-10. Индиректно геореференцирање у два корака [30], [39]

Индиректно геореференцирање облака тачака у једном кораку подразумијева истовремено извођење регистрације и геореференцирања (*Слика 2-11*). За сваку станицу ТЛС сигналишу се најмање три тачке контролне геодетске мреже, чиме није потребан

преклоп између сусједних облака тачака. Овај приступ захтијева већи број тачака мреже и више мјерења, што доводи до увећања трошкова експеримента.



Слика 2-11. Индиректно геореференцирање у једном кораку на основу тачака контролне геодетске мреже [39]

2.5.3.3. Предности и недостаци директне и индиректне методе геореференцирања

Предности директне методе геореференцирања [32]:

- Једноставније планирање и развијање геодетске основе за геореференцирање. Могуће је ослонити се на постојећу геодетску основу и/или ГНСС технологијом позиционирати станицу и оријентацију, под условом да постигнута тачност задовољава критеријуме тачности експеримента.
- Није неопходан преклоп између сусједних облака тачака.
- Није неопходна додатна обрада података након извршених теренских радова јер су још на терену подаци скенирања геореференцирани.
- Подударност са тахиметријском методом снимања детаља омогућава лакшу имплементацију у традиционалну геодетску праксу.

Недостаци директне методе геореференцирања [32]:

- Мања тачност геореференцирања у поређењу са индиректном методом, те је због тога мање заступљена у инжењерству.
- Скенер је потребно центрисати, хоризонтирати и оријентисати, те мјерити висину над тачком геодетске основе. Све ово усложњава и продужава припремне теренске радове прије самог почетка скенирања.
- Немогућност коришћења ГНСС позиционирања станице ТЛС и оријентације у затвореном простору и у присуству јаког електромагнетног зрачења. На примјер скенирање тунела, магистралних цјевовода, подземних ископа и специфичних индустријских постројења.
- Примјенљивост методе је условљена коришћењем скенера који посједује двоосни компензатор и поуздано хоризонтирање инструмента. То сужава могућности примјене методе уколико се располаже појединим типовима скенера, нарочито скенерима старије производње.

- Мала поузданост геореференцирања. Немогућност накнадног утицања на резултате скенирања. На примјер, може се десити да евентуална груба грешка у поступку оријентисања скенера не буде примјећена на терену. У том случају је неизбјежан поновни излазак на терен.

Без обзира на усавршавање хардвера и развијање различитих корекционих алгоритама, метода директног геореференцирања је и даље нижег ранга тачности у односу на индиректну методу. Мјерење висине скенера има негативне посљедице као на примјер мјерење висине тоталне станице у тригонометријском нивелману. При скенирању задржава се утицај хоризонталне и вертикалне колимације. Центрисање и хоризонтирање скенера додатно оптерећују резултате скенирања. Међутим, примјеном индиректне методе геореференцирања ове грешке практично не постоје или дјелимично долазе до изражаја у мјерењима као на примјер хоризонтална колимација при стрмим визурама [32].

Поред остварене тачности, важан аспект диференцијације ове двије методе геореференцирања је концепцијске природе. У пројектовањима у инжењерској геодезији се мора обезбиједити поузданост резултата, спровођење контроле и доказивање адекватности резултата и модела [32].

Предности индиректне методе геореференцирања [32]:

- Висока тачност геореференцирања, реда величине неколико милиметара.
- Стајна тачака не мора бити претходно позиционирана у простору, што омогућава слободу у избору станица за скенирање.
- Нема потребе за центрисањем и мјерењем висине скенера. Скенер се може хоризонтирати помоћу центричне либеле уграђене у постоље скенера или се уопште не мора хоризонтирати.
- Увођењем додатних познатих тачака повећава се поузданост и тачност трансформационог модела и обезбјеђује пуна контрола над резултатима геореференцирања.

Недостаци индиректне методе геореференцирања [32]:

- Планирање просторне конфигурације скенерских сигнала и пројектовање контролне геодетске мреже за геореференцирање. Потребни су прецизнији инструменти и додатне теренске екипе, осим када се геореференцирање изводи уклапањем површи.
- Отежано сигнаписање инжењерских објекта као што су бране, високи објекти, нестабилне косине и сл. Нерјетко се у истој мјерној епохи објекат сигналише два пута, једаном за потребе мјерења тоталном станицом а други пут за потребе скенирања, осим у случају геореференцирања уклапањем површи.
- Неопходно је обезбиједити преклоп између сусједних облака тачака.
- Потешкоће код скенирања линијских објеката (тунели, путеви, жељезничке пруге и сл.). Јавља се ефекат мултипликације грешака регистрације облака тачака идући даље од иницијалне станице.
- Потреба за додатном обрадом података у канцеларији, односно потреба за геореференцирањем прикушљених података скенирања након извршених теренских радова.

3. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И МЕТОДОЛОГИЈА ОПТИМИЗАЦИЈЕ У ПЛАНИРАЊУ ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ СКЕНИРАЊА

У складу са дефинисаним предметом, циљевима и полазним хипотезама истраживања, у раду је примјењен скуп научних метода, међу којима су најзначајније: експериментална метода, метода математичког моделирања, статистичка метода, метода вишекритеријумске оптимизације и метода анализе и синтезе.

Оптимизација геометрије ТЛС мреже, обухватајући станице ТЛС и скенерске сигнале, формулисана је као проблем вишекритеријумске оптимизације са ограничењима, при чему вектор одлуке садржи координате свих станица и сигнала. Итеративним варирањем параметара у простору одлука, уз истовремено разматрање више показатеља квалитета 3Д геодетске мреже и поштовање технолошких ограничења скенирања, одређује се оптимална конфигурација мреже.

Оптимизација по више критеријума, којима се обухватају све или барем главне компоненте и посљедице посматраног система, назива се вишекритеријумском оптимизацијом. У оптимизацији геодетских мрежа критеријуми се односе на захтјеве у погледу прецизности и поузданости мрежа и захтјеве економичности. Осим критеријума постоје и ограничења која представљају излазне и управљачке промјенљиве у оптимизационим задацима. Компромис између жеља (критеријума) и могућности (ограничења) представља оптимално рјешење система. Теорија усвајања рјешења праћена је потешкоћама, као што је: постојање великог броја критеријума који најчешће нису међусобно сагласни и висок степен неодређености који је условљен недовољним информацијама за усвајање рјешења.

Проблем вишекритеријумске оптимизације, за нединамичке системе који ће се користити у предложеној методологији оптимизације, дефинише се у сљедећем облику [27]:

$$\max F(w), \quad w \in W, \quad (3.1)$$

при чему су: $F(w)$ - векторска критеријумска функција, чије су компоненте поједине критеријумске функције $f_k(w)$, $k = 1, 2, \dots, K$; w - векторска промјенљива (вектор одлучивања); K - укупан број критеријума; W - допустиви скуп (простор, област) одлучивања:

$$W = \{w : w \geq 0\}, \quad (3.2)$$

са ограничењима на допустивом скупу:

$$\{g_l(w) : g_l(w) \geq 0, l = 1, 2, \dots, L\}. \quad (3.3)$$

при чему L представља укупан број ограничења. У изразу (3.1), \max значи да рјешење треба да максимизира све критеријумске функције. Умјесто \max може да стоји \min за све или за поједине критеријумске функције. У изразу (3.3), за ограничења умјесто знака \geq може да стоји знак \leq .

3.1. Математички модел вишекритеријумске оптимизације геометрије ТЛС мреже

Поступак оптимизације геометрије мреже станица ТЛС и скенерских сигнала формулисан је као проблем вишекритеријумске оптимизације, уз уважавање ограничења на допустивом скупу и простору критеријумских функција.

Математички модел оптимизације броја и распореда станица ТЛС и скенерских сигнала заснован је на функционалној зависности између поларних и правоуглих координата (2.2), при чему изворне вриједности опажаних дужина, хоризонталних праваца и вертикалних углова нису непосредно доступне. Предложени оптимизациони приступ заснива се на математичком (линеарни функционални и стогастички) моделу посредног изравњања [36]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{линеарни функционални: } \mathbf{v} = \mathbf{Ax} + \mathbf{f}, \quad \mathbf{M}[\mathbf{f}] = -\mathbf{Ax}, \quad \text{са условом } \mathbf{R}^T \mathbf{x} = 0 \\ \text{стохастички: } \mathbf{M}[\mathbf{v}] = 0, \quad \mathbf{M}[\mathbf{vv}^T] = \mathbf{K} = \sigma^2 \cdot \mathbf{P}^{-1} \end{array} \right\}, \quad (3.4)$$

при чему су: \mathbf{x} - вектор координата тачака ТЛС мреже; \mathbf{A} - матрица дизајна (геометрије) мреже; \mathbf{R} - матрица унутрашње поузданости планираних опажања (дужине, хоризонтални правци и вертикални углови); \mathbf{f} - вектор слободних чланова једначина поправака; \mathbf{v} - вектор поправака; σ^2 - дисперзија (варијанса); \mathbf{P} - матрица тежина планираних опажања.

У оквиру оптимизационог модела, критеријумске функције дефинисане су на основу показатеља квалитета 3Д геодетске мреже, док су технолошка ограничења ТЛС система (гранична вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта), као и прописане граничне вриједности показатеља квалитета, уведени као ограничења у простору одлука и простору критеријумских функција.

Допустиви скуп дефинишу слjedeћа ограничења:

$$\begin{array}{l} 1^\circ \quad \alpha_{\max} - \alpha_i \geq 0, \\ 2^\circ \quad N_{\text{all}} - N_{\text{obs}} = 0, \\ 3^\circ \quad \frac{P}{\pi \cdot d_{\max}^2} \cdot 100 \geq \eta_{\min} \end{array} \quad (3.5)$$

при чему су: α_i - упадни угао ласерског зрака на површ објекта; α_{\max} - максимална дозвољена вриједност упадног угла; N_{all} - укупан број одсјечака на које је објекат дискретизован; N_{obs} - број видљивих одсјечака, P - површина преклопа облака тачака у хоризонталној (2Д) равни; d_{\max} - максималан домет терестричког ласерског скенера; $\pi \cdot d_{\max}^2$ - максимална површина обухвата скенера у хоризонталној равни; под претпоставком пуног кружног скенирања без препрека; η_{\min} - минималан дозвољени степен преклопа између сусједних облака тачака.

У циљу оцјене квалитета геометрије мреже, разматрани су поједини локални и глобални критеријуми тачности и поузданости 3Д геодетских мрежа. Анализа тачности и поузданости у 3Д геодетској мрежи заснива се на истим принципима као и анализа у 2Д геодетској мрежи [21]. Као мјере тачности анализиране су полуосе

елипсоида грешака, док су у оквиру анализе поузданости разматрани коефицијенти унутрашње поузданости, средњи коефицијент унутрашње поузданости и маргинална груба грешка. На основу наведених критеријума дефинисане су одговарајуће критеријумске функције које се користе у поступку оптимизације.

Формира се векторска критеријумска функција $F(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})\}$ са сљедећим компонентама (критеријумске функције):

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) &= \bar{R} = \frac{n-r(\mathbf{A})}{n}, \\ f_2(\mathbf{x}) &= \frac{A_j}{C_j}, \\ f_3(\mathbf{x}) &= \frac{G_i^*}{\sigma_i}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

за које се тражи $\max f_1(\mathbf{x})$, $\min f_2(\mathbf{x})$ и $\min f_3(\mathbf{x})$, са ограничењима у простору критеријумских функција:

$$\begin{aligned} 1^\circ \quad \bar{R} - R_{opt} &\geq 0, \quad \text{и} \quad R_{ii} - R_{min} \geq 0 \\ 2^\circ \quad 2 - \frac{A_j}{C_j} &\geq 0 \\ 3^\circ \quad 7.65 - \frac{G_i^*}{\sigma_i} &\geq 0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

при чему су: \bar{R} - средњи коефицијент унутрашње поузданости; n - укупан број планираних опажања (дужина, хоризонтални правац и вертикални угао); $r(\mathbf{A})$ - ранг дизајн матрице \mathbf{A} ; R_{opt} - оптимална вриједност коефицијента унутрашње поузданости ($R_{opt} = 0.40$); R_{ii} - коефицијенти унутрашње поузданости планираних опажања; $R_{min} = 0.2$ - најмања дозвољена вриједност коефицијента унутрашње поузданости; A_j, B_j, C_j - полуосе елипсоида грешака; σ_i - стандардна девијација планираних опажања (дужина, хоризонтални правац и вертикални угао); G_i^* - маргинална груба грешка која се у опажању *Data Snooping* тестом може поуздано открити.

Маргинална груба грешка може се израчунати према сљедећем изразу [5]:

$$G_i^* = \frac{\sigma_i \sqrt{\lambda_0}}{\sqrt{R_{ii}}} = \frac{\sigma_i \cdot (t_{1-\beta_0} + t_{1-\alpha_0/2})}{\sqrt{R_{ii}}}, \quad (3.8)$$

гдје су: $t_{1-\beta_0}$ и $t_{1-\alpha_0/2}$ - квантили нормалног распореда за вјероватноће $1-\beta_0$ и $1-\alpha_0/2$; λ_0 - параметар нецентралности нормалног нецентралног распореда при локалном тесту грубих грешака. У пројектовању геодетских мрежа сматра се да је 0.8 висока моћ критеријума па се усваја да је $1-\beta_0 = 0.8$ [29]. За границу нивоа

значајности α_0 не постоји општа сагласност. Вриједност нивоа значајности од 0.05 је строжија од 0.001. Препорука је да се у прорачунима користи $\alpha_0 = 0.01$. Максимална дозвољена вриједност количника маргиналне грубе грешке и стандардне девијације, при $1 - \beta_0 = 0.8$ и $\alpha_0 = 0.01$, износи $7.65 \left(\frac{G_i^*}{\sigma_i} \leq \frac{\sqrt{\lambda_0}}{\sqrt{R_{\min}}} = 7.65 \right)$ [36].

У циљу оцјене тачности геометрије мреже, анализиран је однос полуоса елипсоида грешака, при чему је усвојен критеријум $\frac{A_i}{C_j} < 2$, гдје је A_j највећа, а C_j најмања полуоса елипсоида. Овим условом се обезбјеђује приближно изотропна тачност положаја тачака и избјегава појава издужених елипсоида, који указују на неповољну геометрију скенирања. Однос највеће и најмање полуосе даје најстрожију оцјену анизотропије тачности, па је као такав довољан за оцјену квалитета геометрије мреже.

Претходно дефинисане критеријумске функције и ограничења интегрисани су у јединствен математички модел вишекритеријумске оптимизације геометрије мреже станица ТЛС и скенерских сигнала, који омогућава одређивање оптималне конфигурације мреже варирањем координата унутар дефинисаног допустивог скупа.

3.2. Фазе оптимизације геометрије ТЛС мреже

Процес оптимизације мреже станица ТЛС и скенерских сигнала организован је у три међусобно повезане фазе:

1. дефинисање допустиве области постављања терестричког ласерског скенера,
2. одређивање оптималног броја и оптималних локација станица ТЛС и
3. одређивање оптималног броја и оптималних локација скенерских сигнала.

На *Слици 3-1* је приказан дијаграм тока овог процеса, у којем су јасно истакнуте све три фазе предложеног приступа.



Слика 3-1. Дијаграм тока процеса оптимизације геометрије ТЛС мреже

3.2.1. Дефинисање допустиве области постављања скенера

При избору локација станица ТЛС, често постоје сметње од других објеката, дрвећа и сл., што слаби геометрију мреже и доводи до појаве неповољних упадних углова ласерског зрака на површ објекта који се скенира. Утицај упадног угла представља доминантно ограничење при пројектовању локација станица ТЛС. Допустива област постављања скенера одређује се узимајући у обзир препреке изван објекта и поштујући ограничење (3.6-1), односно дефинише се:

- линијом највећег удаљења терестричког ласерског скенера од објекта – одређује се у зависности од препрека у непосредној близини објекта и представља граничну линију зоне несметаног скенирања и
- линијом највећег приближења терестричког ласерског скенера објекту - одређује се у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака и представља граничну линију зоне повољних вриједности упадног угла ласерског зрака.

Гранична линија зоне несметаног скенирања може се конструисати, на примјер, у софтверу *AutoCAD*, примјеном опције *Spline*, на основу координата теренских препрека. Подаци о препрекама, односно њихове позиције, могу се одредити мјерењем тоталном станицом или другим доступним методама (нпр. ГНСС методом).

Линија највећег приближења терестричког ласерског скенера објекту одређује се на основу геометрије објекта, односно његове 2D основе, и може се графички конструисати у одговарајућем софтверском окружењу (нпр. *AutoCAD*). Детаљи поступка исцртавања и утврђивања минималне удаљености скенера у зависности од граничне вриједности упадног угла наведени су у поглављу 4.1.2 (Дефинисање линије највећег приближења инструмента објекту).

Иако су упадни угао и растојање међусобно повезани, максимална дозвољена вриједност упадног угла и максимални домет скенера разматрани су одвојено по фазама оптимизације, ради поједностављења поступка дефинисања допустиве области.

Повећањем упадног угла и растојања скенера од објекта слаби интензитет повратног сигнала чиме се нарушава квалитет скенирања [20], [21], [40-44]. Да би моделовали утицај геометрије скенирања на квалитет скенирања, Soudarissanane и сарадници [42] представили су приступ који се првенствено фокусира на упадни угао и растојање, као главне параметре који утичу на прецизност мјерења. Показали су да већи упадни углови ($\alpha > 70^\circ$) и већа растојања доводе до мање прецизних мјерења.

Lichti [25] препоручује ограничење максималног упадног угла на 65° како би се елиминисала непоуздана мјерења.

Пејић, као критеријум оптимизације вриједности упадног угла користи принцип занемарљивости компоненти варијанси резултата мјерења растојања терестричким ласерским скенером. Примјеном принципа занемарљивости доприноса упадног угла ласерског зрака укупној несигурности мјерења растојања, при коефицијенту занемарљивости $\alpha = 0.05$, долази до закључка да максимални упадни угао износи 78° [32].

У оквиру прве фазе, приликом дефинисања допустиве области постављања скенера, извршено је тестирање више граничних вриједности упадног угла (65° , 75° и 78°) на конкретном објекту (поглавље 4.1.3). Циљ анализе био је да се утврди да ли је могуће обезбиједити потпуно скенирање објекта за све испитане вриједности. Резултати тестирања коришћени су као основа за избор граничне вриједности упадног угла у поступку дефинисања допустиве области, чиме је обезбијеђена емпиријска провјера његовог утицаја на могућност потпуног скенирања објекта.

3.2.2. Одређивање оптималног броја и локација станица ТЛС

Унутар допустиве области постављања скенера врши се избор броја и локација станица ТЛС тако да се минимизује број станица, обезбиједи довољан преклоп између сусједних облака тачака (ограничење (3.6-3)) и омогући потпуно скенирање објекта или његових дијелова (ограничење (3.6-2)). Локације станица ТЛС се прилагођавају све док ограничења (3.6-2) и (3.6-3) не буду задовољена, при чему се води рачуна да све станице остају унутар допустиве области. Током планирања

распореда станица ТЛС неопходно је узети у обзир и минималан и максималан домет скенера.

Ради одређивања степена покривености објекта, неопходно је извршити дискретизацију објекта на одсјечке одређене дужине посматрајући објекат у хоризонталној (2Д) равни. За сваку станицу ТЛС формира се табела видљивости [15], [19], на основу које се одређује степен покривености објекта. Формула за рачунање степена покривености објекта има следећи облик [15-18]:

$$E[\%] = \left(\frac{N_{obs}}{N_{all}} \right) \cdot 100, \quad (3.9)$$

при чему су: N_{all} - укупан број одсјечака на које је објекат дискретизован; N_{obs} - број видљивих одсјечака.

У литератури се, према препорукама Ahn и Wohn [3] и Dehbi [10], за минималну вриједност преклопа између сусједних облака тачака наводи вриједност од 20%.

Приближна вриједност преклопа између сусједних облака тачака се може израчунати посматрањем положаја станица скенера у хоризонталној (2Д) равни. На примјер, да би се обезбиједио преклоп између сусједних облака тачака од најмање 20% за скенер чији је максималан домет 80 m површина заједничког скенираног дијела за двије станице ТЛС мора бити већа од 4000 m² [10].

3.2.3. Одређивање оптималног броја и локација скенерских сигнала

Скенеракни сигнали могу бити распоређени на објекту и на терену у непосредној близини објекта, на различитим висинама и удаљеностима у односу на станицу ТЛС. При томе, на преклопу између сусједних облака тачака скенеракни сигнали не смију бити колинеарни [13]. Оптималан број скенеракни сигнала на преклопу сусједних облака тачака је три, у случају комбиноване примјене регистрације типским скенеракним сигналима и *cloud to cloud* метода регистрације. При томе се *cloud to cloud* метода користи за поравнање сусједних облака на основу њихове геометрије, што омогућава смањење броја потребних скенеракни сигнала уз одржавање високе прецизности.

Избор броја и врсте опажања није релевантан, јер током скенирања није могуће вршити визирање. Изворна мјерења у ТЛС мрежи су растојање, хоризонтални правац и вертикални угао. Сваки скенеракни сигнал мора бити видљив са најмање двије станице ТЛС. На тај начин, за n скенеракни сигнала формира се систем од најмање $6n$ једначина поправака ($2n$ за растојања, $2n$ за хоризонталне правце и $2n$ за вертикалне углове) са $3n$ непознатих параметара, који представљају прираштаје координата скенеракни сигнала (dx, dy, dz) . У систем једначина поправака планираних опажања укључују се и прираштаји координата станица ТЛС као непознати параметри.

Тежине мјерених величина се рачунају према принципу да су стандардна одступања хоризонталних правца и вертикалних углова (са њиховим линеарним еквивалентом) једнака стандардним одступањима дужина [36]:

$$P_\rho = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_\rho^2} \quad - \text{тежина за дужине,} \quad (3.10)$$

$$P_\theta = \frac{\sigma_0^2}{\left(\frac{\sigma_\rho \cdot \rho''}{\rho_H}\right)^2} \quad - \text{тежина за хоризонталне правце,} \quad (3.11)$$

$$P_\alpha = \frac{\sigma_0^2}{\left(\frac{\sigma_\rho \cdot \rho''}{\rho}\right)^2} \quad - \text{тежина за вертикалне углове,} \quad (3.12)$$

при чему су: σ_0 - стандардна девијација јединице тежине; σ_ρ - стандардна девијација мјерења дужине; σ_ρ - стандардна девијација мјерења хорзонталног правца; σ_α - стандардна девијација мјерења вертикалног угла; ρ - просторна дужина; ρ_H - хоризонтална дужина; $1\text{rad} = \frac{360 \cdot 3600''}{2\pi} = 206264.806''$ - вриједност радијана у лучним секундама.

Матрица тежина, \mathbf{P} , је квадратна матрица чије димензије зависе од броја планираних међусобно независних опажања. Дијагонални елементи матрице тежина рачунају се према изразима (3.11), (3.12) и (3.13), а вандијагонални елементи су једнаки нули. Матрица тежина има блок-дијагоналну структуру и може се записати у облику:

$$\mathbf{P}_{[(n_\rho+n_\theta+n_\alpha) \times (n_\rho+n_\theta+n_\alpha)]} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{P}_\alpha \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

при чему су: $\mathbf{P}_\rho, \mathbf{P}_\theta, \mathbf{P}_\alpha$ - подматрице тежина које одговарају планираним дужинама, хоризонталним правцима и вертикалним угловима; n_ρ - укупан број планираних дужина; n_θ - укупан број планираних хоризонталних праваца; n_α - укупан број планираних вертикалних углова.

Након образовања матрице тежина, рачуна се матрица поузданости опажања \mathbf{R} [7], [34]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^+ \mathbf{A}^T \mathbf{P}, \quad (3.14)$$

при чему су: \mathbf{A} - матрица дизајна, \mathbf{E} - јединична матрица. Дијагонални елементи матрице \mathbf{R} представљају коефицијенте унутрашње поузданости опажања (R_{ii}).

Математички изрази за рачунање елемената матрице **A** имају следећи облик:

$$\begin{aligned}
 a_{ij} &= \left(\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial x_i} \right)^0 = \frac{\sin \theta_{ij}^0}{\rho_{Hij}^0} \cdot \rho'', \\
 b_{ij} &= \left(\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial y_i} \right)^0 = -\frac{\cos \theta_{ij}^0}{\rho_{Hij}^0} \cdot \rho'', & \text{- коефицијенти за хоризонталне правце,} \\
 c_{ij} &= \left(\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial z_i} \right)^0 = 0,
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ij} &= \left(\frac{\partial \rho_{ij}}{\partial x_i} \right)^0 = -\cos \theta_{ij}^0 \cdot \cos \alpha_{ij}^0, \\
 B_{ij} &= \left(\frac{\partial \rho_{ij}}{\partial y_i} \right)^0 = -\sin \theta_{ij}^0 \cdot \cos \alpha_{ij}^0, & \text{- коефицијенти за дужине,} \\
 C_{ij} &= \left(\frac{\partial \rho_{ij}}{\partial z_i} \right)^0 = -\sin \alpha_{ij}^0,
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
 e_{ij} &= \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial x_i} \right)^0 = \frac{\cos \theta_{ij}^0 \cdot \sin \alpha_{ij}^0}{\rho_{ij}^0} \cdot \rho'', \\
 f_{ij} &= \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial y_i} \right)^0 = \frac{\sin \theta_{ij}^0 \cdot \sin \alpha_{ij}^0}{\rho_{ij}^0} \cdot \rho'', & \text{- коефицијенти за вертикалне углове.} \\
 g_{ij} &= \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial z_i} \right)^0 = -\frac{\cos \alpha_{ij}^0}{\rho_{ij}^0} \cdot \rho''.
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Вриједности полуоса троосног елипсоида грешака [22]:

$$A = \sigma_0 \sqrt{2 \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) - \frac{a}{3}}, \quad (3.19)$$

$$B = \sigma_0 \sqrt{2 \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\varphi + 2\pi}{3}\right) - \frac{a}{3}}, \quad (3.20)$$

$$C = \sigma_0 \sqrt{2 \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\varphi + 4\pi}{3}\right) - \frac{a}{3}}, \quad (3.21)$$

гдје су: $p = b - \frac{a^2}{3}$; $q = c - \frac{a \cdot b}{3} + \frac{2a^3}{27}$; $\varphi = \arccos\left(\frac{-q}{2\sqrt{\left(-p/3\right)^3}}\right)$;

$b = Q_{xx} \cdot Q_{zz} + Q_{yy} \cdot Q_{zz} + Q_{xx} \cdot Q_{yy} - Q_{xy}^2 - Q_{xz}^2 - Q_{yz}^2$ $\mathbf{Q}_x = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^+$ - кофакторска матрица непознатих параметара (непознати параметри су прираштаји координата тачака dx, dy, dz); $a = -(Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz})$;

$$c = Q_{xx} \cdot Q_{yz}^2 + Q_{yy} \cdot Q_{xz}^2 + Q_{zz} \cdot Q_{xy}^2 - Q_{xx} \cdot Q_{yy} \cdot Q_{zz} - 2Q_{xy} \cdot Q_{xz} \cdot Q_{yz}.$$

Дирекциони углови правца максималних грешака, односно углови које полуосе елипсоида грешака (A_j, B_j, C_j) образују са осама координатног система x, y, z [22]:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{E_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2 + G_i^2}}\right), \quad (3.22)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{F_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2 + G_i^2}}\right), \quad i = A, B, C \quad (3.23)$$

$$\gamma_i = \arccos\left(\frac{G_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2 + G_i^2}}\right), \quad (3.24)$$

при чему су: $E_i = Q_{xz} \cdot (Q_{yy} - \lambda_i) - Q_{xy} \cdot Q_{yz}$;

$$F_i = Q_{yz} \cdot (Q_{xx} - \lambda_i) - Q_{xy} \cdot Q_{xz}, \quad G_i = Q_{xy}^2 - (Q_{xx} - \lambda_i) \cdot (Q_{yy} - \lambda_i).$$

Са изабраним локацијама станица ТЛС и скенерских сигнала морају бити задовољена ограничења (3.8-1), (3.8-2) и (3.8-3). Уколико било које од ових ограничења није задовољено, варирају се координате станица ТЛС и скенерских сигнала све док сва ограничења не буду задовољена. Током овог процеса потребно је провјерити да ли су станице унутар допустиве области постављања скенера, да ли је

омогућено потпуно скенирање објекта или његових дијелова и довољан преклоп сусједних облака тачака.

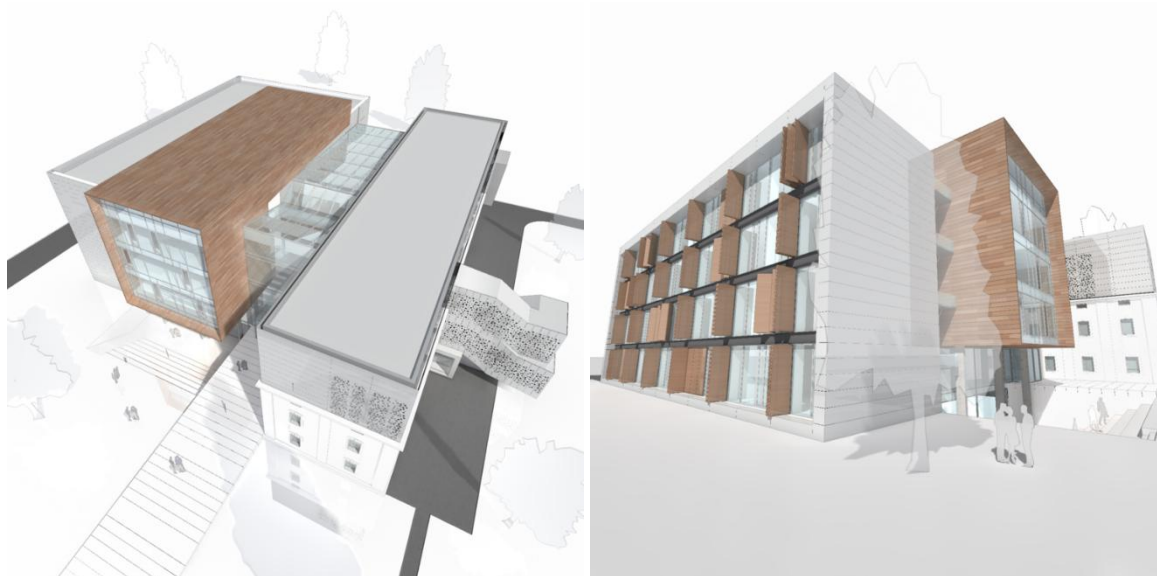
Кроз описане три фазе пројектовања мреже станица ТЛС и скенерских сигнала задовољена су ограничења допустивом скупу (3.6-1), (3.6-2), (3.6-3), као и ограничења (3.8-1), (3.8-2) и (3.8-3) у простору критеријумских функција чиме је оптимизација завршена.

Примјеном предложене методологије добијена је оптимална конфигурација мреже у оквиру анализираног допустивог скупа рјешења, која истовремено задовољава сва дефинисана ограничења ТЛС (максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта) и разматране критеријуме квалитета 3Д геодетске мреже.

На тај начин је потврђена примјенивост и ефикасност развијеног модела у поступку оптималног пројектовања геометрије мреже станица ТЛС и скенерских сигнала.

4. ПРИМЈЕНА МОДЕЛА ОПТИМИЗАЦИЈЕ ГЕОМЕТРИЈЕ ТЛС МРЕЖЕ НА ЗГРАДИ АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКОГ И ШУМАРСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ

Објекат за који је неопходно извршити планирање скенирања је зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци. Локација зграде факултета је смјештена у комплексу некадашње касарне Врбас, у склопу Универзитетског града у Бањој Луци. Простор којим газдује Универзитет у Бањој Луци представља простор богат парковским структурама, травнатим површинама и заштићеним дендро фондом, који у урбанистичком смислу представља хетерогену групацију објеката потпуно различите намјене, времена изградње и архитектонског обликовања и материјализације. Зграда факултета је настала надоградњом и доградњом постојећег објекта "Тереза" који је изграђен 1889. године и служио је за војне потребе. Зграда факултета је спратности П+3 на постојећем дијелу, те По+П+3 на дограђеном дијелу објекта (Слика 4-1).



Слика 4-1. 3Д приказ зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци [49]

4.1. Дефинисање допустиве области постављања ТЛС за одабрани објекат

При избору локација станица ТЛС, често постоје сметње од других објеката, дрвећа и сл., што слаби геометрију мреже и доводи до појаве неповољних упадних углова ласерског зрака на површ објекта који се скенира. Утицај упадног угла представља доминантно ограничење при пројектовању локација станица ТЛС.

Да би се смањио простор претраге потенцијалних локација станица ТЛС, потребно је дефинисати:

- линију највећег удаљења терестричког ласерског скенера од објекта – одређује се у зависности од препрека у непосредној близини објекта и представља граничну линију зоне несметаног скенирања и

- линију највећег приближења терестричког ласерског скенера објекту - одређује се у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака и представља граничну линију зоне повољних вриједности упадног угла ласерског зрака.

Ове двије граничне линије заједно описују допустиву област постављања скенера. Допустива област одређује се узимајући у обзир препреке изван објекта и поштујући ограничење (3.6-1).

Упадни угао ласерског зрака представља угао који образују ласерски зрак и нормала на површ објекта. Вриједност упадног угла ласерског зрака се може израчунати на сљедећи начин [40]:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{P}_i| \cdot |\mathbf{N}|}\right), \quad (4.1)$$

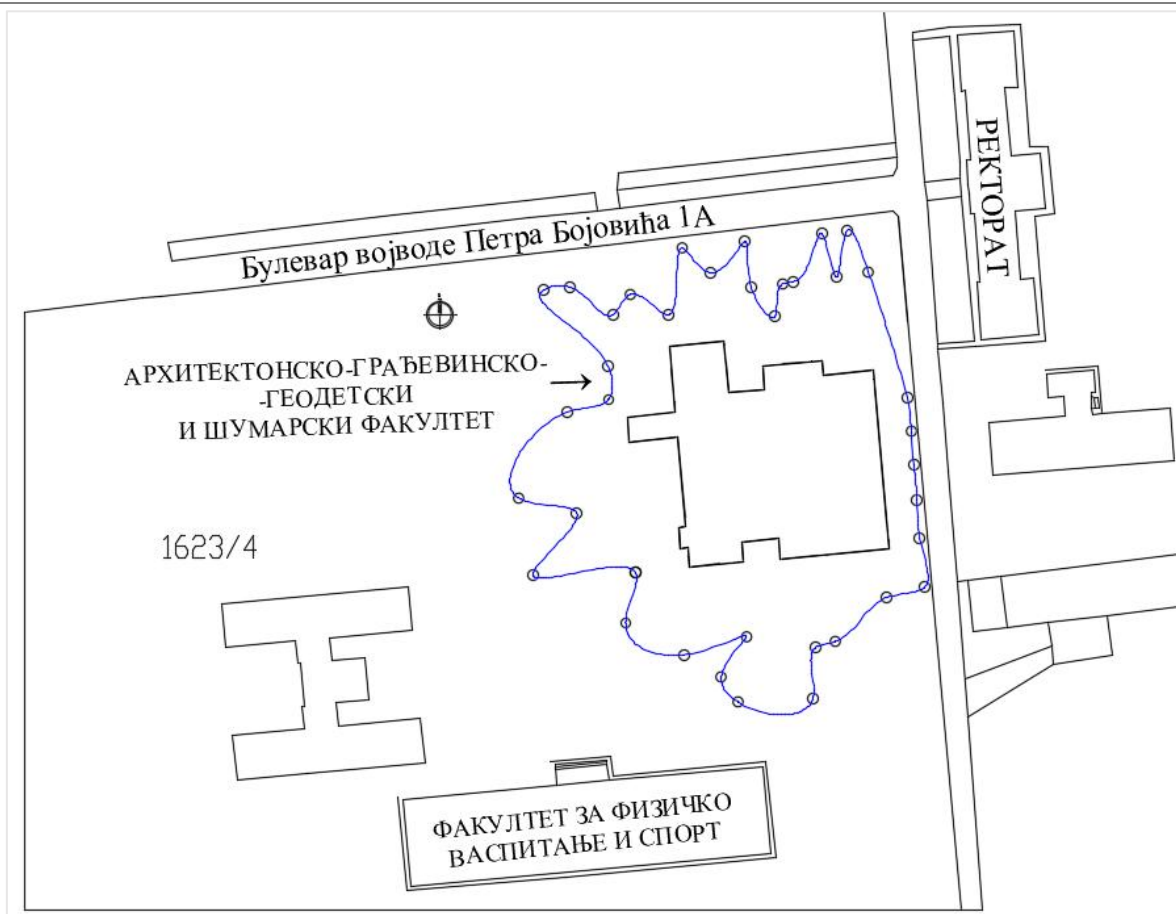
гдје су: $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ - вектор од ТЛС до тачке i на површи објекта коју погађа емитовани ласерски зрак; \mathbf{N} - вектор управан на тангенту површи објекта у тачки i . Упадни угао може имати вриједности од 0° до 360° . Уколико ласерски зрак погађа површ објекта под правим углом, отисак ласерског зрака ће имати облик кружнице. У супротном, при произвољној вриједности упадног угла отисак ласерског зрака поприма облик елипсе што за последицу има слабљење интензитета повратног сигнала и смањење SNR односа (енгл. *Signal to Noise Ratio*) или другим ријечима повећање несигурности мјерења растојања. Квалитет скенирања опада повећањем вриједности упадног угла ласерског зрака на објекат и вриједности растојања до објекта, односно услијед лоше геометрије скенирања [32].

Иако су упадни угао и растојање међусобно повезани, максимална дозвољена вриједност упадног угла и максимални домет скенера разматрани су одвојено по фазама оптимизације, ради поједностављења поступка дефинисања допустиве области.

Ограничење максималног домета ТЛС није укључено у фазу дефинисања допустиве области, већ се узима у обзир у наредној фази избора оптималних локација станица ТЛС.

4.1.1. Дефинисање линије највећег удаљења инструмента од објекта за несметано скенирање

У близини зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета налази се велики број стабала, што отежава скенирање. Ради лакшег планирања процеса снимања терестричким ласерским скенером прикупљени су подаци о препрекама на терену, при чему су позиције (координате) стабала одређене снимањем тоталном станицом. У софтверу *AutoCAD*, примјеном опције *Spline*, на основу добијених координата стабала конструисана је гранична линија зоне несметаног скенирања. На скици објекта (*Слика 4-2*) приказана је зона несметаног скенирања, ограничена плавом линијом која означава границу до које се може постављати терестрички ласерски скенер за несметано скенирање.



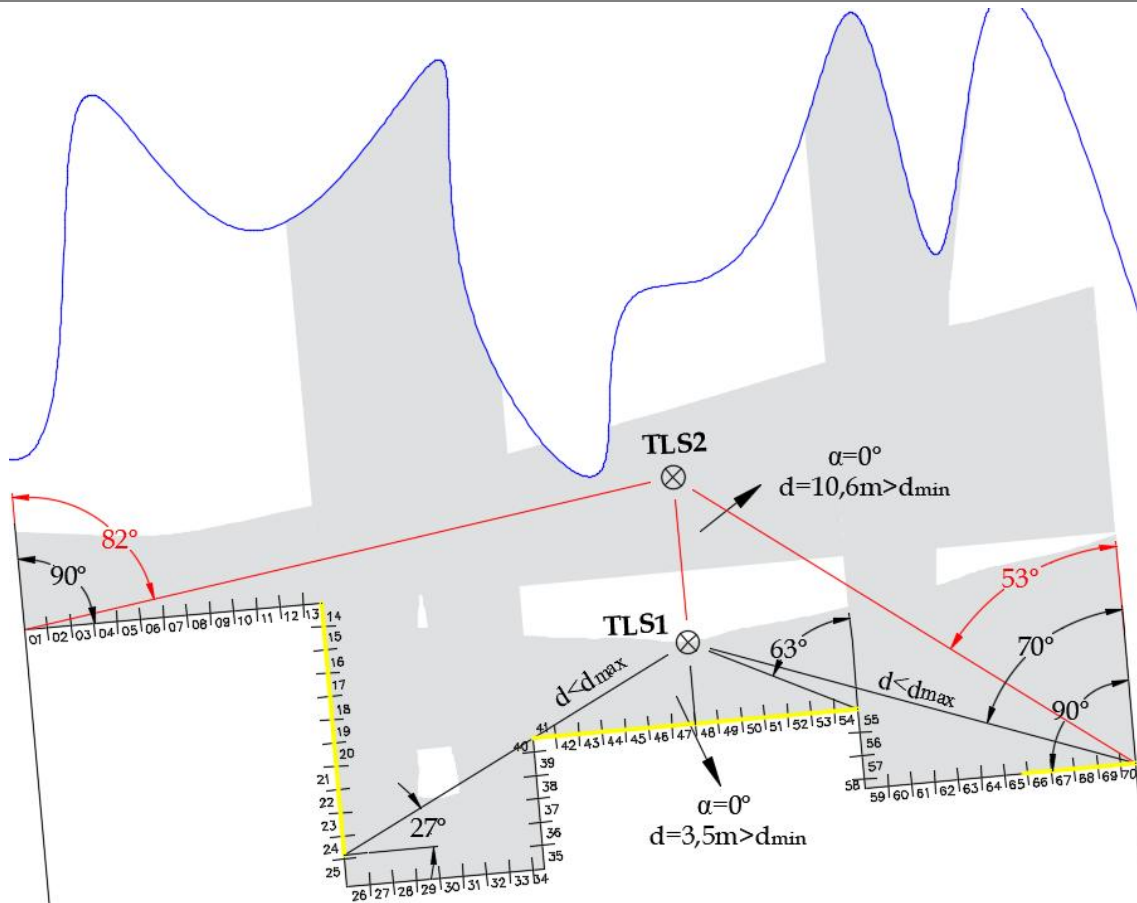
Слика 4-2. Ситуациони план објекта. Плавом бојом је приказана линија ограничавајућег простора до које се може постављати терестрички ласерски скенер за несметано скенирање.

4.1.2. Дефинисање линије највећег приближења инструмента објекту

За сваку страну зграде факултета одређено је највеће дозвољено приближење терестричког ласерског скенера у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла, на начин приказан на Слици 4-5. У зависности од конструкције, фасада објекта може бити равна или имати истурене дијелове као што су степенице, терасе, балкони или еркери. Зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета спада у комплексније конструкције. У наставку је описан поступак одређивања границе највећег приближења скенера објекту.

На Слици 4-3 дат је 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при граничној вриједности упадног угла ласерског зрака у износу од 78° ($\alpha_{\max} = 78^\circ$). Циљ је одабрати локацију скенера тако да за сваки видљиви дио објекта упадни угао не прелази задату граничну вриједност, а да дужина ласерског зрака буде унутар максималног и минималног домета скенера.

Упадни угао израчунат је за најудаљенију тачку фасаде објекта према изразу (4.1), узимајући у обзир висину зграде ($\approx 15 \text{ m}$) и висину инструмента ($\approx 1.5 \text{ m}$). Максимална вриједност упадног угла износи $\approx 78^\circ$ односно 63° у хоризонталној равни. За одабрану локацију станице скенера (станица TLS1) највеће дозвољено приближење објекту износи 3.5 m, при чему ласерски зрак погађа површ објекта под правим углом ($\alpha = 0^\circ$). Жутом бојом је означен видљиви дио објекта са станице TLS1.



Слика 4-3. 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при $\alpha_{\max} = 78^\circ$.

Приказана је вриједност упадног угла за граничне случајеве. Жутом бојом је приказан видљиви дио објекта са станице TLS1. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера у зависности од препрека на терену. Област приказана сивом бојом означава област унутар које није дозвољено постављање скенера.

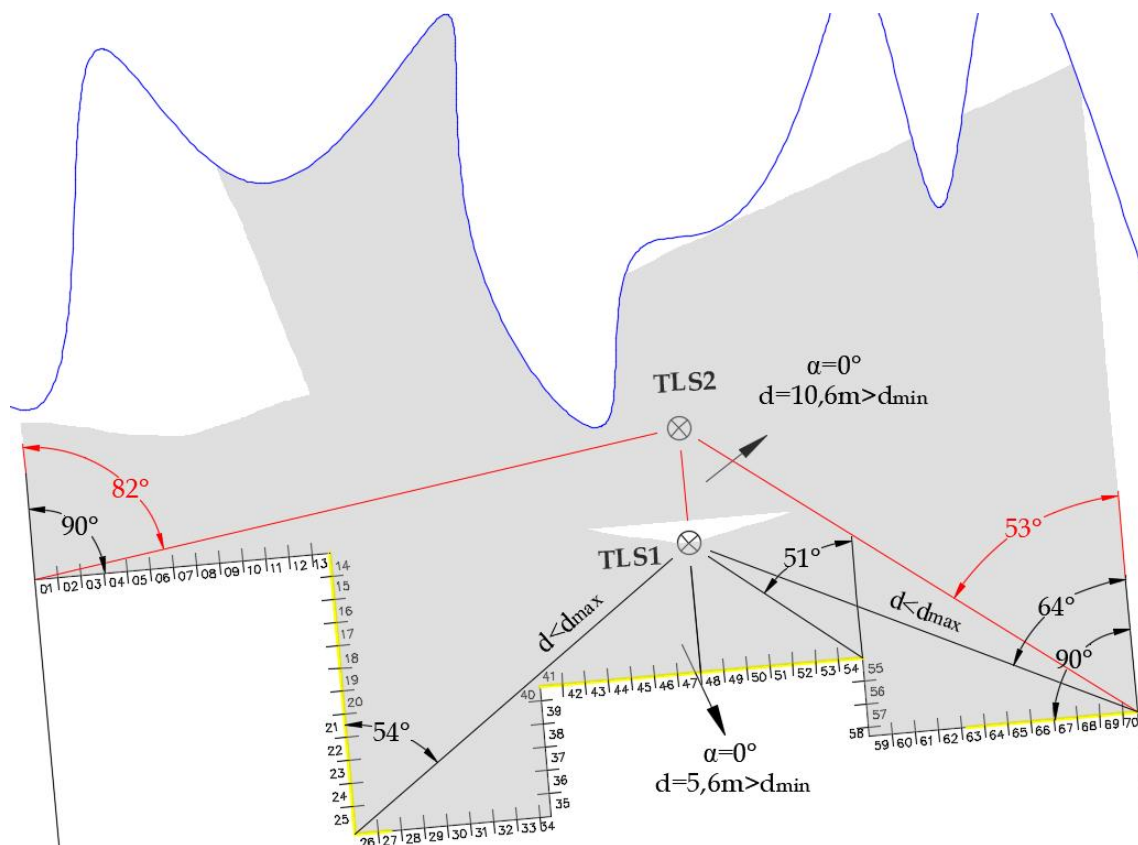
Фасада приказане стране је дискретизована на 70 одсјечака ($N_{\text{all}} = 70$) дужине 1 m. Са станице TLS1 је видљиво 30 одсјечака ($N_{\text{obs}} = 30$), па степен покривености приказане стране објекта, израчунат према изразу (3.10), износи 43%.

На Слици 4-3 дат је и 2Д приказ неповољне локације станице скенера (станица TLS2). За поједине одсјечке видљиве са станице TLS2 упадни угао прелази максималну дозвољену вриједност ($\alpha > \alpha_{\max} = 78^\circ$). Поред тога, станица TLS2 није унутар допустиве области постављања скенера при задатом ограничењу ($\alpha_{\max} = 78^\circ$).

На Слици 4-4 дат је 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при граничној вриједности упадног угла у износу од 70° . Циљ је одабрати локацију скенера тако да за сваки видљиви дио објекта упадни угао не прелази задату граничну вриједност, а да дужина ласерског зрака буде унутар максималног и минималног домета скенера.

Упадни угао израчунат је за најудаљенију тачку фасаде објекта према изразу (4.1), узимајући у обзир висину зграде ($\approx 15 \text{ m}$) и висину инструмента ($\approx 1.5 \text{ m}$). Максимална вриједност упадног угла износи $\approx 70^\circ$ односно 51° у хоризонталној равни. За одабрану локацију станице скенера (станица TLS1) највеће дозвољено

приближење објекту износи 5.6 m, при чему ласерски зрак погађа површ објекта под правим углом ($\alpha = 0^\circ$). Жутом бојом је означен видљиви дио објекта станице TLS1.



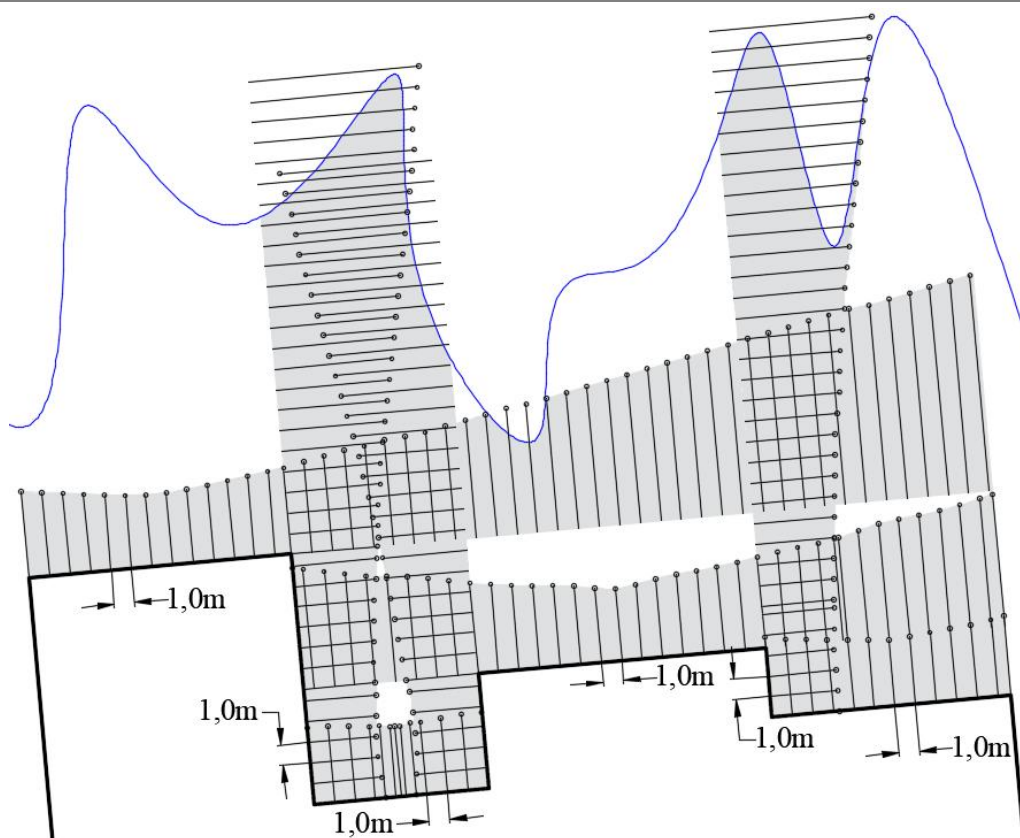
Слика 4-4. 2Д приказ максималног дозвољеног приближења скенера објекту при $\alpha_{\max} = 70^\circ$ за станицу TLS1. Жутом бојом је приказан видљиви дио објекта са станице TLS1. Станица TLS2 има неповољну локацију у погледу упадног угла. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера у зависности од препрека на терену. Област приказана сивом бојом означава област унутар које није дозвољено постављање скенера.

Фасада приказане стране је дискретизована на 70 одсјечака ($N_{\text{all}} = 70$) дужине 1 m. Са станице TLS1 је видљиво 35 одсјечака ($N_{\text{obs}} = 35$), па степен покривености приказане стране објекта, израчунат према изразу (3.10), износи 50%.

На Слици 4-4 дат је и 2Д приказ неповољне локације станице скенера (станица TLS2). За поједине одсјечке видљиве са станице TLS2 упадни угао прелази максималну дозвољену вриједност ($\alpha > \alpha_{\max} = 70^\circ$). Поред тога, станица TLS2 није унутар допустиве области постављања скенера при задатом ограничењу ($\alpha_{\max} = 70^\circ$).

Избор максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака утиче на максимално дозвољено приближење инструмента објекту и степен покривености објекта који се скенира. Индиректно, овај параметар утиче и на укупан број станица ТЛС потребних за потпуно скенирање објекта, а тиме и на укупан број скенерских сигнала неопходних за поуздану регистрацију свих облака тачака.

На Сликама 4-3 и 4-4 приказано је да различите вриједности упадног угла, од 70° и 78° , за исту локацију станице ТЛС, доводе до видљивих разлика у степену покривености фасаде и у максималном дозвољеном приближењу инструмента.



Слика 4-5. Допустива област (нешрафирани дијелови) постављања скенера за једну страну зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета при $\alpha_{\max} = 78^\circ$. Плава линија представља линију максималног дозвољеног удаљења скенера за несметано скенирање.

Посматрана страна зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета није равна, већ се састоји од истурених и увучених сегмената (Слика 4-5). На сваких метар дуж фасаде објекта, за сваки сегмент посматране стране објекта посебно, исцртава се линија максималног дозвољеног приближења инструмента објекту тако да упадни угао не прелази задату граничну вриједност (Слика 4-5). На тај начин се за сваки сегмент одређује ограничавајућа област унутар које није дозвољено постављање скенера. Пресеком ограничавајућих области свих сегмената добија се коначна ограничавајућа област за посматрану страну зграде факултета, која задовољава ограничење (3.6-1).

Линија највећег приближења терестричког ласерског скенера објекту исцртана је у *AutoCAD*-у, на основу 2D основе објекта.

4.1.3. Дефинисање допустиве области при различитим вриједностима упадних углова

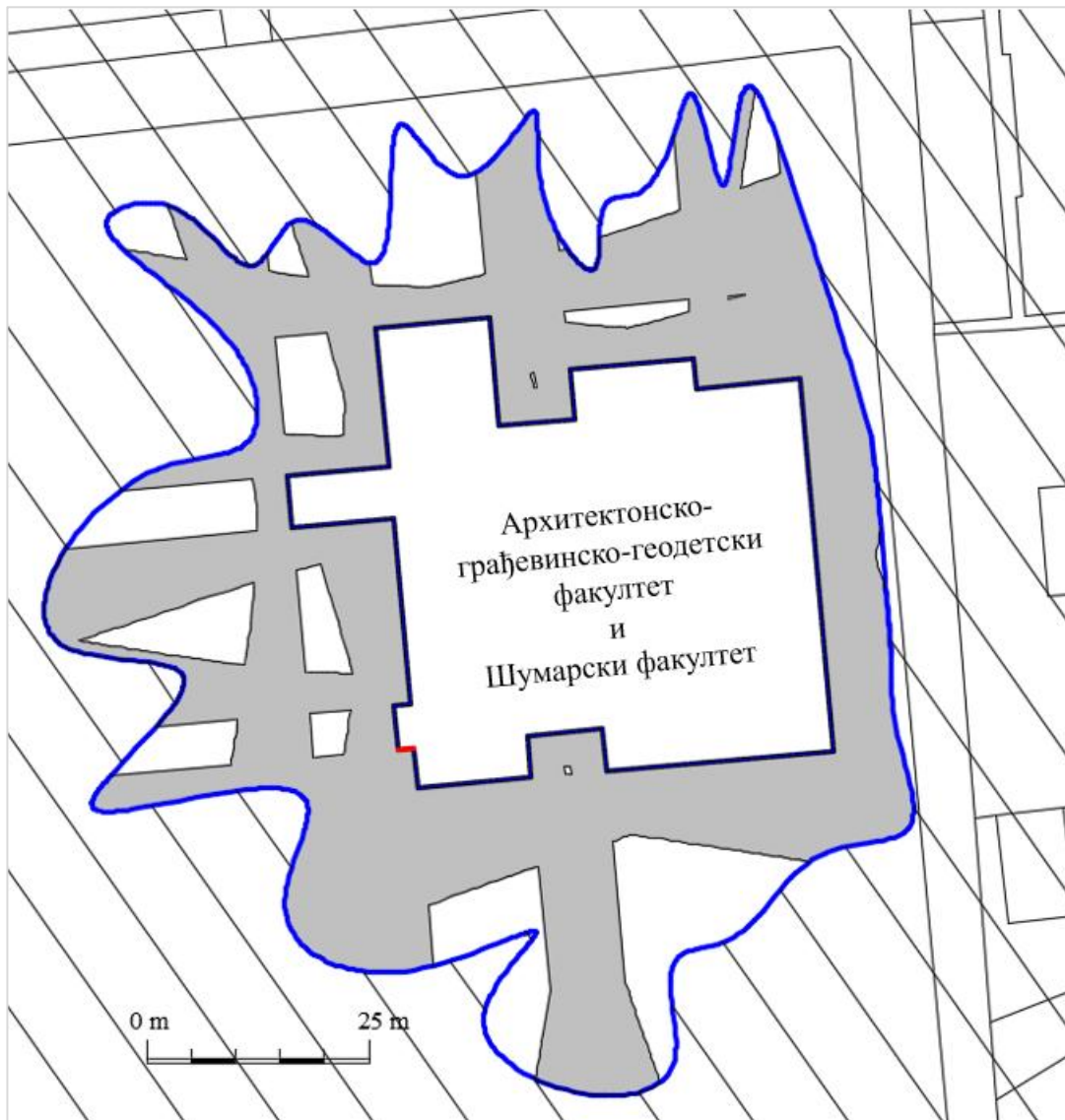
Поступак описан у претходним поднасловима (поднаслов 4.1.1 и 4.1.2) примјењен је на све четири стране зграде факултета при чему су за горњу граничну вриједност упадног угла задате вриједности од 65° , 75° и 78° . На Сликама 4-6, 4-7 и 4-8, необојени дијелови изван објекта представљају област дозвољеног постављања инструмента у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла (ограничење (3.6-1)) и препрека на терену тј. допустиву област постављања скенера. Мања гранична вриједност упадног угла резултира мањом површином допустиве области, односно сужава простор доступан за постављање станица скенера.

Уколико се станица скенера позиционира унутар допустиве области постављања инструмента са сигурношћу се може тврдити да за сваки видљиви дио објекта упадни угао не прелази задату максималну дозвољену вриједност и да се скенирање може изводити несметано.



Слика 4-6. Допустива област постављања скенера (неишрафирани/необојени дијелови изван објекта) при $\alpha_{\max} = 65^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15$ m. Висина инструмента - $i \approx 1.5$ m. Дио објекта који није могуће скенирати означен је црвеном линијом.

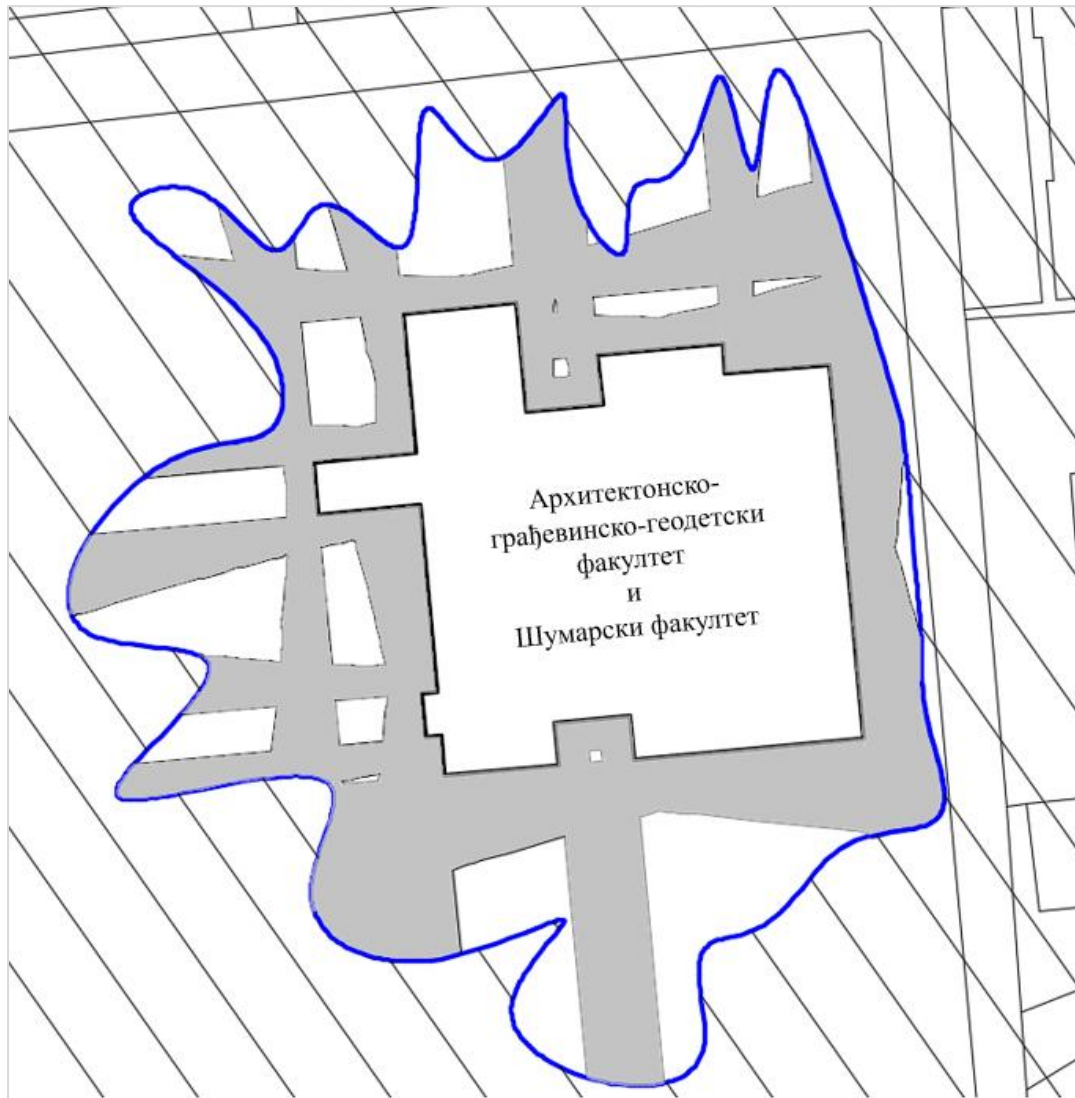
На Слици 4-6 првеном линијом означен је дио објекта који није могуће скенирати при граничној вриједности упадног угла од 65° , при чему је видљиво 180 од укупно 258 одсјечака, што одговара степену покривености од 70% (према изразу (3.10)), који је у датим условима могуће остварити.



Слика 4-7. Допустива област (нешрафирани/необојени дијелови изван објекта) постављања скенера при $\alpha_{\max} = 75^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15$ m. Висина инструмента - $i \approx 1.5$ m. Дио објекта који није могуће скенирати означен је црвеном линијом.

Повећањем граничне вриједности упадног угла број видљивих одсјечака се повећава, па на Слици 4-7 износи 256 од 258, што омогућава остваривање степена покривености од 99% (према изразу (3.10)).

При граничном упадном углу од 78° (Слика 4-8) видљиви су сви одсјечци, те је могуће остварити потпуну покривеност објекта.



Слика 4- 8. Допустива област (нешрафирани/ необојени дијелови изван објекта) постављања скенера при $\alpha_{\max} = 78^\circ$ за зграду Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Висина објекта - $H \approx 15 \text{ m}$. Висина инструмента - $i \approx 1.5 \text{ m}$.

4.1.4. Избор оптималне допустиве области за одабрани објекат

Сprovedеном анализом допустиве области постављања терестричког ласерског скенера утврђено је да при препорученим граничним упадним угловима од 65° , 70° и 75° није могуће обезбиједити потпуно скенирање објекта односно распоредити станице ТЛС тако да буде скенирана цијела зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Иако се у релевантној литератури препоручује примјена мањих упадних углова ради постизања веће тачности мјерења, резултати овог истраживања указују да је у реалним условима скенирања, усљед сложеније геометрије објекта и просторних ограничења, њихова примјена често неизводива. Потпуно скенирање објекта остварено је тек при граничној вриједности упадног угла од 78° .

За граничну вриједност упадног угла ласерског зрака на површ објекта усвојена је вриједност од 78° (Слика 4- 8).

4.2. Одређивање оптималног броја и локација станица ТЛС за скенирање одабраног објекта

Унутар допустиве области постављања скенера распоређују се станице ТЛС, тако да се минимизира број станица, да се обезбиједи степен преклапања сусједних облака тачака од најмање 20% (ограничење (3.6-3)), да не буду нарушена ограничења која се односе на минималан и максималан домет скенера ($d_{\min} < d < d_{\max}$) и да објекат буде скениран у потпуности (ограничење (3.6-2)).

Приједлог оптималног броја и локација станица ТЛС приказан је на *Слици 4-8*. За скенирање зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета планирано је укупно девет станица ТЛС.

Максимални хоризонтални габарити анализираног објекта износе 48m x 53m. Објекат је дискретизован на 258 ($N_{\text{all}} = 258$) одсјечака дужине 1 m. Са девет станица ТЛС видљиво је свих 258 одсјечака ($N_{\text{obs}} = 258$), па степен покривености објекта, према изразу (3.10), износи 100%. То значи да ће за распоред станица приказан на *Слици 4-9* објекат бити скениран у потпуности, чиме је задовољено ограничење (3.6-2).

Преклоп између сусједних облака тачака условљен је техничким карактеристикама инструмента, односно максималним дометом скенера којим се изводи скенирање. С обзиром да ово поглавље описује општу примјену методологије оптимизације без везивања за конкретан скенер, за потребе планирања одабрана је најмања вриједност максималног домета међу приказаним комерцијално доступним скенерима у *Табели 2-1*. При избору локација станица као максимални домет узета је вриједност од 70 m. Рјешења добијена за скенер максималног домета од 70 m остају важећа и за скенере већег домета.

У *Табели 4-1* приказане су вриједности максималног упадног угла у хоризонталној равни и 3Д простору и косе дужине од инструмента до објекта за сваку планирану станицу ТЛС са *Слике 4-9*, узимајући у обзир висину објекта ($i \approx 15$ m) и висину инструмента ($i \approx 1.5$ m). Вриједности максималног упадног угла у 3Д налазе се у распону од 55,8° до 77,3° (све вриједности су унутар дозвољених граница, мање од граничне вриједности од 78°), док вриједности максималне косе дужине варирају од 19,4 m до 45,5 m и не прелазе максимални домет скенера који је одабран за планирање, односно 70 m.

Табела 4-1. Максимална вриједност упадног угла и косе дужине од станице ТЛС до објекта

Станица ТЛС	Максимална вриједност упадног угла у 2Д	Максимална вриједност упадног угла у 3Д	Максимална вриједност дужине [m]
TLS1	66.3°	67.4°	45.5
TLS2	71.6°	73.1°	34.3
TLS3	75.7°	77.3°	37.6
TLS4	73.3°	75.5°	27.4
TLS5	71.7°	72.6°	43.5

TLS6	67.4°	70.8°	39.9
TLS7	75.8°	77.0°	34.0
TLS8	53.4°	55.8°	40.6
TLS9	58.2°	69.0°	19.4



Слика 4-9. 2Д приказ распореда станица ТЛС унутар допустиве области, за који је остварена потпуна покривеност објекта

⊗ - станица ТЛС.

4.3. Одређивање оптималног броја и локација скенерских сигнала за скенирање одабраног објекта

Примјењена је методологија избора оптималних локација станица ТЛС и оптималног броја и распореда скенерских сигнала описана у поглављу Теоријске основе и методологија оптимизације у планирању ТЛС.

Скелерске сигнале на објекту је потребно равномерно распоредити по цијелој површини објекта, као и на терену у непосредној близини објекта. При томе је неопходно обезбиједити да су видљиви са најмање двије станице ТЛС и да не буду колинеарно распоређени. Оптималан број скенерских сигнала за поуздану

регистрацију износи три, у случају комбиновања регистрације типским скенерским сигналимa и *cloud-to-cloud* методе регистрације.

За потребе регистрације сусједних облака тачака, у зони објекта дефинисано је укупно 14 скенерских сигнала, од којих су три постављена на површи објекта, а 11 изван објекта ради обезбјеђења регистрације на прелазима између појединих страна објекта. Предложени распоред скенерских сигнала задовољава услов неколинеарности. Са сусједних станица ТЛС видљива су најмање три заједничка скенерска сигнала. Основни подаци о ТЛС мрежи, приказаној на *Слици 4-10*, дати су у *Табели 4-2*.

На позицијама скенерских сигнала у непосредној близини објекта предлаже се примјена сферних скенерских сигнала. Иако се уобичајено на објекту постављају равни скенерски сигнали, у овом случају се на позицијама *OB1*, *OB2* и *OB3* предлаже постављање сферних сигнала, јер упадни угао ласерског зрака према овим тачкама прелази максималну дозвољену вриједност од 45° .

Са станице *TLS1* упадни угао према сигналимa *OB1* и *OB2* износи 52.7° и 62.7° , са станице *TLS2* износи 53.3° и 69.7° , док са станице *TLS3* износи 73.2° и 65.2° . Такође, са станице *TLS7* упадни угао према сигналу на позицији *OB3* износи 70.4° .

Сходно наведеном, изабрани су сферни скенерски сигнали, који не зависе од оријентације у простору и омогућавају поуздану детекцију при већим упадним угловима.

Табела 4-2. Основни подаци о ТЛС мрежи зграде факултета

Дате тачке:	0
Број станица ТЛС: <i>TLS1</i> , <i>TLS2</i> , <i>TLS3</i> , <i>TLS4</i> , <i>TLS5</i> , <i>TLS6</i> , <i>TLS7</i> , <i>TLS8</i> , <i>TLS9</i>	$m = 9$
Број скенерских сигнала: <i>OB1</i> , <i>OB2</i> , <i>OB3</i> , 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	$n = 14$
Непознате тачке:	$m + n = 23$
Број косих дужина:	$n_\rho = 61$
Број хоризонталних праваца:	$n_\alpha = 61$
Број вертикалних углова:	$n_\theta = 61$
Укупан број опажања:	$n_\rho + n_\alpha + n_\theta = 198$
Број непознатих координата:	$u_{xyz} = 3 \cdot 23 = 69$
Број непознатих оријентација на станицама:	$u_Z = 0$
Укупан број непознатих:	$u = u_{xyz} + u_Z = 69$
Дефект мреже:	$d = 6$
Ранг мреже:	$r = u_{xyz} + u_Z - d = 63$
Број степени слободе:	$f = n - (u_{xyz} + u_Z - d) = 120$
A priori стандардна девијација јединице тежине:	$\sigma_0^2 = 1$

Према изразима (3.11), (3.12) и (3.13) одређују се дијагонални елементи матрице тежина \mathbf{P} . За стандардну девијацију мјерења дужине узета је вриједност ± 1 mm. Ова вриједност је преузета из Табеле 2-1, без везивања за конкретан инструмент. Одлучено је да се користи најмања вриједност стандардне девијације приказана у табели, јер ако планирање мреже задовољава критеријуме за ову најстрожију тачност, онда ће бити испуњени критеријуми и за инструменте са мање прецизним мјерењима дужине.

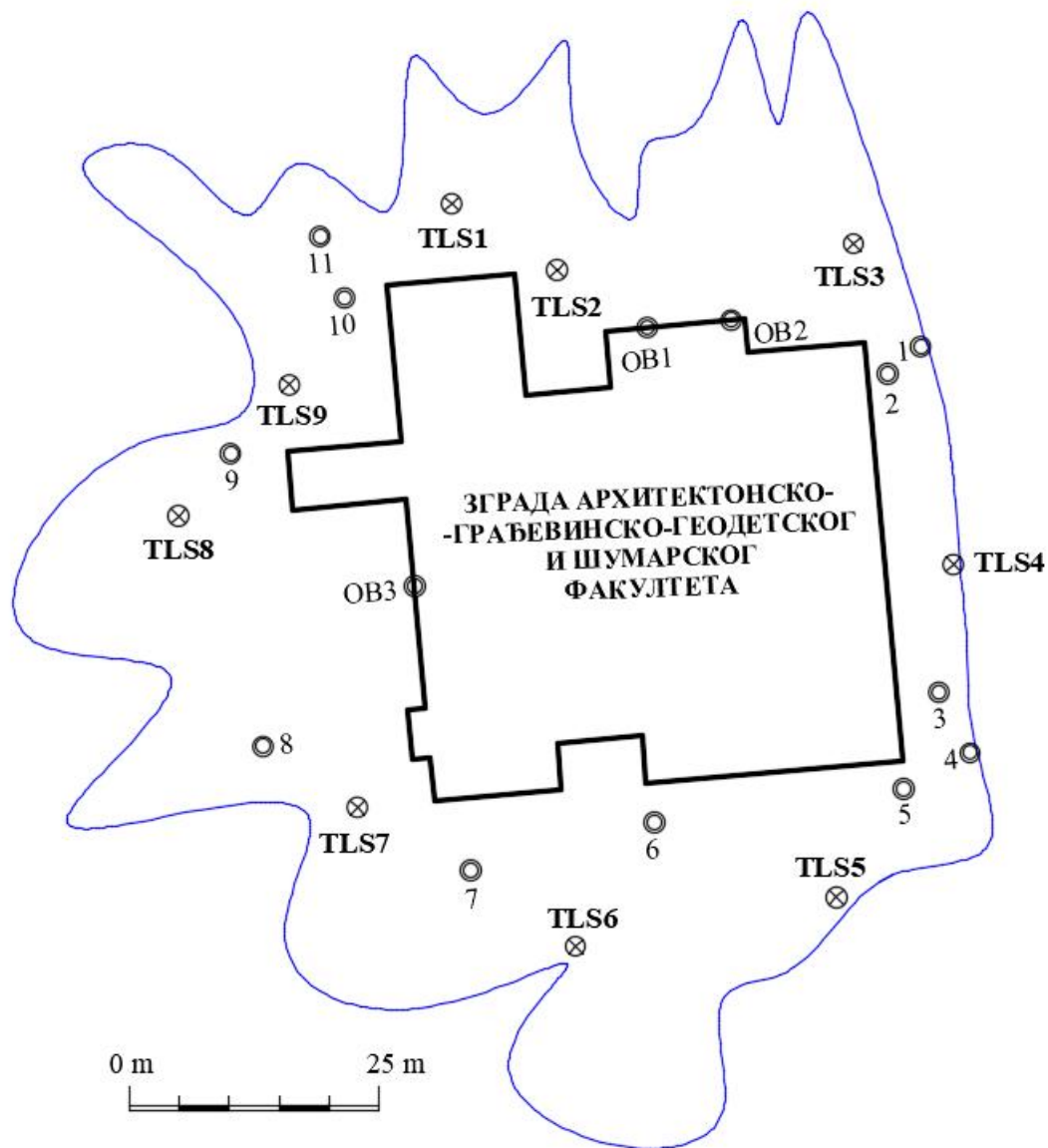
Након тога врши се рачунање матрице поузданости опажања \mathbf{R} према изразу (3.15), односно одређивање вриједности коефицијената унутрашње поузданости, маргиналне грубе грешке и полуосе троосног елипсоида грешака.

Табела 4-3. Приближне координате тачака ТЛС мреже зграде факултета

Тачка	X_0 [m]	Y_0 [m]	H_0 [m]
TLS1	7985.13	234.69	1.50
TLS2	7995.66	228.07	1.50
TLS3	8025.25	230.69	1.50
TLS4	8035.22	198.67	1.50
TLS5	8023.52	165.41	1.50
TLS6	7997.48	160.47	1.50
TLS7	7975.70	174.35	1.50
TLS8	7957.84	203.47	1.50
TLS9	7968.86	216.62	1.50
OB1	8004.63	222.32	4.00
OB2	8012.99	223.07	7.00
OB3	7981.39	196.51	1.00
1	8031.95	220.39	0.00
2	8028.67	217.68	0.00
3	8033.78	185.87	0.00
4	8036.88	179.84	0.00
5	8030.24	176.25	0.00
6	8005.36	172.87	0.00
7	7987.01	168.07	0.00
8	7966.27	180.47	0.00
9	7963.01	209.76	0.00
10	7974.44	225.27	0.00
11	7971.96	231.39	0.00

У наставку су приказане приближне координате тачака оптималне ТЛС мреже (Табела 4-3) за скенирање зграде факултета, као и разматрани критеријуми тачности и поузданости (Табеле 4-4, 4-5 и 4-6). Нису приказани сви међукораци и варијације

координата током спровођења треће фазе оптимизације, већ је представљен коначан резултат, јер би детаљан приказ свих итерација био обиман и не би допринио јаснијем разумијевању добијеног рјешења.



Слика 4-10. Оптималан распоред станица ТЛС и скенерских сигнала
 ⊗ - станица ТЛС, ⊙ - сферни скенерски сигнал.

Табела 4-4. Коefицијенти унутрашње поузданости планираних опажања

Од	До	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$
TLS1	OB1	Дужина	0.53	4.69	Хоризонтални правац	0.42	5.30	Вертикални угао	0.47	5.00
	OB2	Дужина	0.53	4.69	Хоризонтални правац	0.42	5.24	Вертикални угао	0.46	5.03
	9	Дужина	0.55	4.61	Хоризонтални правац	0.46	5.02	Вертикални угао	0.50	4.82
	10	Дужина	0.50	4.84	Хоризонтални правац	0.43	5.19	Вертикални угао	0.46	5.05
	11	Дужина	0.60	4.42	Хоризонтални правац	0.45	5.11	Вертикални угао	0.51	4.78

TLS2	OB1	Дужина	0.55	4.61	Хоризонтални правац	0.44	5.13	Вертикални угао	0.49	4.91
	OB2	Дужина	0.55	4.61	Хоризонтални правац	0.46	5.06	Вертикални угао	0.48	4.96
	1	Дужина	0.50	4.82	Хоризонтални правац	0.35	5.74	Вертикални угао	0.43	5.24
	11	Дужина	0.48	4.92	Хоризонтални правац	0.38	5.57	Вертикални угао	0.43	5.21
TLS3	OB1	Дужина	0.56	4.57	Хоризонтални правац	0.38	5.57	Вертикални угао	0.46	5.05
	OB2	Дужина	0.58	4.50	Хоризонтални правац	0.38	5.58	Вертикални угао	0.45	5.12
	1	Дужина	0.59	4.45	Хоризонтални правац	0.45	5.07	Вертикални угао	0.51	4.81
	2	Дужина	0.39	5.50	Хоризонтални правац	0.35	5.74	Вертикални угао	0.36	5.67
	3	Дужина	0.49	4.88	Хоризонтални правац	0.41	5.35	Вертикални угао	0.45	5.11
TLS4	1	Дужина	0.49	4.87	Хоризонтални правац	0.39	5.45	Вертикални угао	0.44	5.17
	2	Дужина	0.39	5.49	Хоризонтални правац	0.35	5.74	Вертикални угао	0.36	5.67
	3	Дужина	0.54	4.64	Хоризонтални правац	0.49	4.89	Вертикални угао	0.51	4.79
	4	Дужина	0.52	4.75	Хоризонтални правац	0.37	5.64	Вертикални угао	0.44	5.15
	5	Дужина	0.40	5.43	Хоризонтални правац	0.34	5.85	Вертикални угао	0.36	5.66
TLS5	7	Дужина	0.52	4.75	Хоризонтални правац	0.41	5.33	Вертикални угао	0.47	5.01
	6	Дужина	0.56	4.57	Хоризонтални правац	0.39	5.49	Вертикални угао	0.46	5.01
	3	Дужина	0.50	4.85	Хоризонтални правац	0.40	5.40	Вертикални угао	0.45	5.12
	4	Дужина	0.59	4.47	Хоризонтални правац	0.45	5.10	Вертикални угао	0.51	4.78
	5	Дужина	0.40	5.39	Хоризонтални правац	0.34	5.88	Вертикални угао	0.36	5.66
TLS6	5	Дужина	0.51	4.77	Хоризонтални правац	0.36	5.73	Вертикални угао	0.43	5.18
	6	Дужина	0.63	4.32	Хоризонтални правац	0.36	5.68	Вертикални угао	0.49	4.87
	7	Дужина	0.56	4.58	Хоризонтални правац	0.43	5.19	Вертикални угао	0.49	4.88
	8	Дужина	0.52	4.73	Хоризонтални правац	0.40	5.42	Вертикални угао	0.46	5.07
TLS7	OB3	Дужина	0.49	4.91	Хоризонтални правац	0.25	6.85	Вертикални угао	0.36	5.68
	6	Дужина	0.53	4.68	Хоризонтални правац	0.40	5.40	Вертикални угао	0.46	5.01
	7	Дужина	0.51	4.80	Хоризонтални правац	0.44	5.17	Вертикални угао	0.46	5.03
	8	Дужина	0.63	4.32	Хоризонтални правац	0.50	4.84	Вертикални угао	0.56	4.56
	9	Дужина	0.59	4.45	Хоризонтални правац	0.41	5.35	Вертикални угао	0.51	4.78
TLS8	OB3	Дужина	0.50	4.85	Хоризонтални правац	0.24	6.93	Вертикални угао	0.36	5.68
	9	Дужина	0.61	4.39	Хоризонтални правац	0.48	4.95	Вертикални угао	0.52	4.72

	10	Дужина	0.49	4.90	Хоризонтални правац	0.42	5.24	Вертикални угао	0.45	5.09
	8	Дужина	0.60	4.43	Хоризонтални правац	0.43	5.21	Вертикални угао	0.51	4.78
TLS9	8	Дужина	0.55	4.62	Хоризонтални правац	0.42	5.27	Вертикални угао	0.49	4.89
	9	Дужина	0.59	4.44	Хоризонтални правац	0.50	4.84	Вертикални угао	0.54	4.67
	10	Дужина	0.52	4.73	Хоризонтални правац	0.47	5.01	Вертикални угао	0.48	4.91
	11	Дужина	0.52	4.73	Хоризонтални правац	0.34	5.85	Вертикални угао	0.43	5.23

Табела 4-5. Полуосе троосног елипсоида грешака

Тачка	A_0 [mm]	B_0 [mm]	C_0 [mm]	A_0/C_0
TLS1	0.48	0.39	0.45	1.24
TLS2	0.57	0.44	0.50	1.28
TLS3	0.49	0.41	0.47	1.21
TLS4	0.53	0.41	0.46	1.29
TLS5	0.49	0.40	0.47	1.21
TLS6	0.52	0.43	0.50	1.21
TLS7	0.49	0.39	0.45	1.26
TLS8	0.55	0.45	0.52	1.23
TLS9	0.55	0.43	0.49	1.28
OB1	0.60	0.48	0.54	1.26
OB2	0.59	0.48	0.54	1.23
OB3	0.70	0.58	0.68	1.20
1	0.60	0.48	0.53	1.26
2	0.77	0.57	0.61	1.34
3	0.61	0.47	0.52	1.30
4	0.59	0.47	0.53	1.25
5	0.76	0.57	0.62	1.33
6	0.58	0.47	0.54	1.24
7	0.62	0.47	0.52	1.31
8	0.53	0.42	0.47	1.26
9	0.52	0.41	0.48	1.25
10	0.63	0.48	0.53	1.31
11	0.58	0.47	0.54	1.23

Најмања вриједност коефицијента унутрашње поузданости износи 0.24 (Табела 4-4), што је више од дозвољене вриједности ($\min(R_{ii}) = 0.30 \geq 0.20$), чиме је задовољено ограничење (3.6-2). Средњи коефицијент унутрашње поузданости износи 0.46. Вриједност средњег коефицијента поузданости опажања налази се у оквиру дозвољених граница ($\bar{R} = 0.66 > 0.40$), па је задовољено и ограничење (3.9-1).

Највећа вриједност количника $\frac{G_i^*}{\sigma_i}$ (однос маргиналне грубе грешке и стандардног одступања планираног опажања) износи 6.93 (Табела 4-4), што је унутар дозвољених граница $\left(\max\left(\frac{G^*}{\sigma}\right) = 7.65 \right)$, чиме је задовољено ограничење (3.6-3).

Вриједности полуоса троосног елипсоида грешака су израчунате према изразима (3.20), (3.21) и (3.22). Највећа вриједност количника полуоса A_0/C_0 износи 1.34 (Табела 4-5), што указује да ова вриједност не прелази дозвољену вриједност дефинисану ограничењем (3.8-2).

На Слици 4-10 приказана је оптимална геометрија ТЛС мреже зграде факултета, односно оптималан број и локације станица ТЛС и скенерских сигнала.

За приказану конфигурацију мреже станица ТЛС и скенерских сигнала задовољена су сва дефинисана ограничења, (3.6-1), (3.6-2), (3.6-3), (3.8-1), (3.8-2) и (3.8-3).

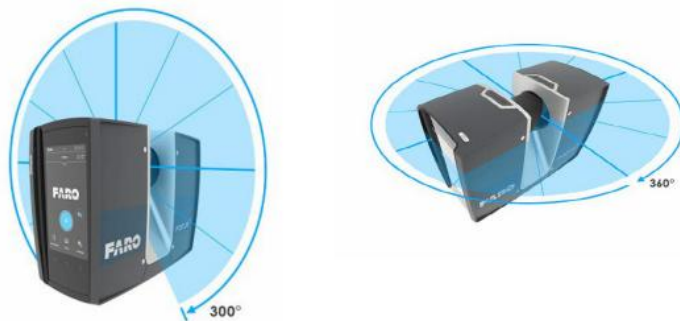
Добијено рјешење представља оптималну конфигурацију у оквиру анализираних допустивог скупа, при чему су истовремено задовољена сва дефинисана ограничења терестричког ласерског скенирања (максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта) и разматрани критеријуми квалитета 3Д геодетске мреже.

5. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЈЕРА МЕТОДОЛОГИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ТЛС

Верификација методе извршена је за двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета, што је омогућило брзу и ефективну провјеру примјенљивости предложене методологије и ефикасности оптимизације броја и локација станица ТЛС и скенерских сигнала, при чему одабране стране садрже типичне геометријске и конструктивне елементе објекта. Потпуно скенирање објекта би довело до истих закључака, уз знатно већи обим теренског рада, без суштинског утицаја на валидацију методологије.

Скенирање је изведено терестричким ласерским скенером Faro Focus^{M70}, чије су спецификације наведене у Табели 5-1.

Faro Focus^{M70} припада групи фазних скенера код којих је принцип мјерења дужине базиран на методи фазних мјерења. Домет скенера се креће од 0.6 m до 70 m. Декларисана тачност мјерења дужине износи $\pm 3\text{mm}$. Током скенирања простор испод инструмента се не скенира, тј. скенер у хоризонталној равни на описује пун круг па хоризонтално видно поље не износи 360° већ 300° (Слика 5-1). Видно поље скенера у вертикалној равни износи 360° . Узимајући у обзир карактеристике видног поља, Faro Focus^{M70} припада групи панорамских скенера.



Слика 5-1. Вертикално и хоризонтално видно поље терестричког ласерског скенера Faro Focus^{M70} [48]

Табела 5-1. Карактеристике терестричког ласерског скенера Faro Focus^{M70} [48]

Домет	0.6-70m
Брзина скенирања (тачака/секунди)	122,000; 244,000; 488,000; 976 000
Грешка мјерења дужине	$\pm 3\text{mm}$
Двоосни компензатора нагиба оса	Тачност хоризонтирања износи 19"
Резолуција камере	до 165 мегапиксела у боји
Видно поље (вертикално/хоризонтално)	$300^\circ / 360^\circ$
GNSS	интегрисани GPS и GLONASS
Радни вијек батерије	4.5 сата
Препоручена температура за извођење скенирања	$5^\circ - 40^\circ$
Складиштење података	SD, SDHC TM , SDXC TM ; 32GB картица

Планирано је да трансформација појединачних облака тачака у јединствен облак буде изведена комбинацијом регистрације типским скенерским сигнаlima и *cloud to cloud* методом регистрације. Приликом планирања процеса скенирања узета су у обзир техничка ограничења која су везана за расположиви терестрички ласерски скенер и пратећу опрему. Укупан број доступних сферних скенерских сигнала износио је пет, те је планирање било неопходно прилагодити том ограничењу односно број видљивих сферних скенерских сигнала са једне станице ТЛС није могао бити већи од пет.

Једно од ограничења скенера Faro Focus^{M70} односи се на дозвољено растојање сферног скенерског сигнала од скенера, које зависи од изабране резолуције скенирања и пречника сфере (Табела 5-2). Пречник расположивих сфера износи 0.1390 m. Са повећањем пречника сфере повећава се и максимално дозвољено растојање њеног постављања у односу на скенер. Тако на примјер, за моделе *Resolution - 1/4* и *Resolution - 1/2* максимално дозвољено растојање за препознавање сфере је 19 m и 39 m респективно (Табела 5-2). У зависности од одабраног модела резолуције и параметра поузданости скенирања *Quality* зависи вријеме скенирања на станици. У Табели 5-3 приказано је вријеме скенирања и резолуција скенирања за растојање 10 m од објекта за поједине моделе резолуције. С обзиром да процес оптимизације обухвата и захтјев за временском ефикасношћу, скенерски сигнали су позиционирани тако да се минимизује вријеме скенирања.

Ово ограничење није узето као ограничавајући фактор у поглављима 3 и 4, јер је у тим поглављима развијена и примијењена методологија оптимизације, независна од техничких ограничења конкретног скенера.

Наведено ограничење се односи на техничке карактеристике скенера Faro Focus^{M70} које првенствено утичу на вријеме скенирања на станици и укупно трајање скенирања, а не на геометрију распореда станица ТЛС и скенерских сигнала.

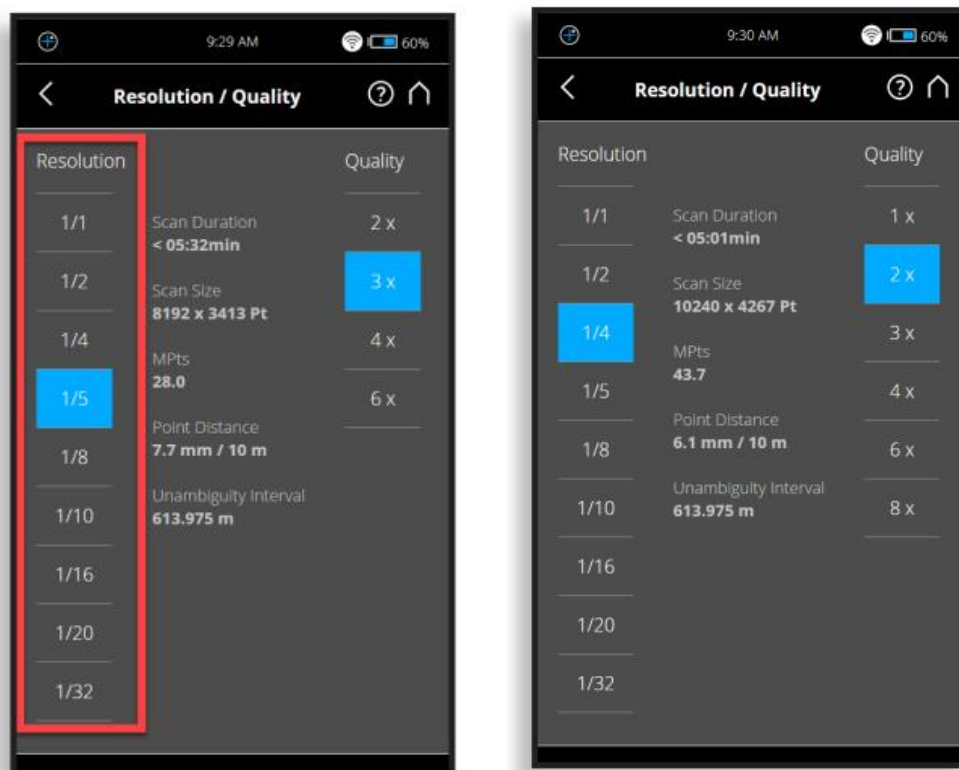
У практичној примјени, оптимизација се прилагођава конкретном инструменту кроз уважавање његових техничких ограничења, што представља завршни корак у имплементацији методологије. У супротном би методологија била везана за један тип скенера и изгубила би општост.

Табела 5-2. Максимална дозвољена удаљеност за препознавање сфере у зависности од пречника сфере и одабраног модела резолуције [48]

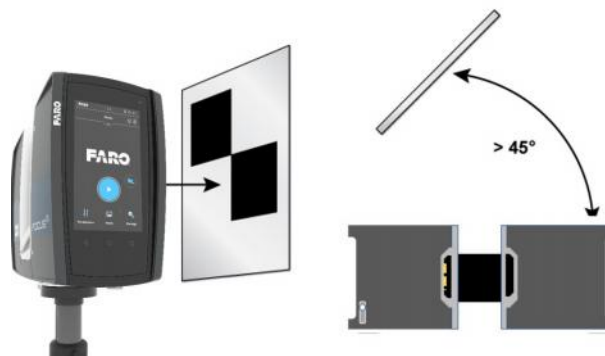
	Пречник сфере		
	70 mm	140 mm	200 mm
	Максимално дозвољено растојање сфере од скенера		
Модел резолуције	[m]	[m]	[m]
1/1	35	71	101
1/2	20	39	56
1/4	10	19	27
1/5	7	14	20
1/8	5	10	14
1/10	4	8	11
1/32	2	5	6

Табела 5-3. Вријеме скенирања за поједине моделе резолуције и одабрани параметар "Quality" [48]

Модел резолуције	Параметар "Quality"	Скенирање у боји	Вријеме скенирања [минуте]	Резолуција на растојању од 10 m
1/1	4x	Не	115:09	1,5 mm
1/1	4x	Да	117:46	1,5 mm
1/2	4x	Да	31:52	3,1 mm
1/4	4x	Не	7:46	6,1 mm
1/4	4x	Да	10:24	6,1 mm
1/4	8x	Не	115:09	6,1 mm
1/4	8x	Да	117:46	6,1 mm
1/8	4x	Не	2:24	12,3 mm
1/8	4x	Да	5:01	12,3 mm
1/8	2x	Не	1:03	12,3 mm
1/8	2x	Да	3:41	12,3 mm



Слика 5-2. Приказ трајања скенирања на станици и резолуције скенирања за одабрана моделе резолуције "Resolution - 1/4" и "Resolution - 1/5" и параметре "Quality - 3x" и "Quality - 2x" [48]



Слика 5-3. Максимална дозвољена вриједност упадног угла ласерског зрака за препознавање равнoг скенерског сигнала износи 45° [48]

5.1. Оптимална ТЛС мрежа за скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета

Оптимални број и распоред станица ТЛС и скенерских сигнала (Слика 4-10) дефинисан у поглављу 4 представља резултат вишекритеријумске оптимизације и референтно рјешење за посматрани објекат. У експерименталном дијелу рада потребно је извршити практичну примјену оптималног плана скенирања на дијелу објекта (двije стране зграде факултета), прилагодити техничким ограничењима скенера Faro FocusM70 и расположивој пратећој опреми (сфере пречника 14 cm), што представља завршни корак у имплементацији методологије.

Планирање скенирања двије стране зграде факултета реализовано је у три међусобно повезане фазе, у складу са описаним принципима у поглављу "Теоријске основе и методологија оптимизације у планирању ТЛС".

У првој фази дефинисана је допустива област постављања скенера, узимајући у обзир препреке изван објекта и максималну дозвољену вриједност упадног угла ласерског зрака од 78° (Слика 4-8).

Друга фаза обухватила је одређивање броја и локација станица ТЛС тако да се у потпуности скенира зграда факултета са минималног броја станица, уз обезбијеђен довољан преклоп између сусједних облака тачака за поуздану регистрацију (минимални преклоп 20%). При планирању локације узет је у обзир и максимални ($d_{\max} = 70 \text{ m}$) домет скенера што одговара домету расположивог скенера Faro FocusM70 којим ће се реализовати скенирање.

Трећа фаза односила се на дефинисање броја и врсте скенерских сигнала потребних за регистрацију облака тачака. Оптималан број скенерских сигнала на преклопу између сусједних облака тачака износи три, у случају комбиновања регистрације типским скенерским сигнаlima са *cloud to cloud* методом регистрације. Скенерски сигнали су распоређени на објекту и у непосредној близини објекта, на различитим висинама и удаљеностима у односу на станицу ТЛС, при чему сигнали на преклопу не смију бити колинеарни.

Оптималан број станица ТЛС за скенирање двије стране зграде факултета износи (TLS5, TLS6, TLS7, TLS8 и TLS9), док оптималан број скенерских сигнала за регистрацију облака тачака износи осам (скенерски сигнали са ознакама 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и OB3).

На позицијама скенерских сигнала у непосредној близини објекта предлаже се примјена сферних сигнала. Иако се на објекту уобичајено примјењују равни скенерски сигнали, на позицији скенерског сигнала са ознаком *OB3* постављена је сфера (Слика 5-4). Анализом упадног угла утврђено је да упадни угао са станице *TLS7* према сигналу на позицији *OB3* износи 70.4° , што превазилази максималну дозвољену вриједност за поуздану детекцију равних сигнала ($\approx 45^\circ$). Сходно томе, одабран је сферни скенерски сигнал, који није зависан од оријентације у простору и омогућава поуздано препознавање и при већим упадним угловима.

Двије стране објекта дискретизоване су на 146 одсјечака ($N_{all} = 146$) дужине 1 m. Будући да је број видљивих одсјечака са пет станица ТЛС такође 146 ($N_{obs} = 146$), степен покривености објекта, према изразу (3.10), износи 100%, односно за распоред станица ТЛС приказан на Слици 5-6 двије стране објекта ће бити скениране у потпуности.

За поједине позиције скенерских сигнала растојања од станица ТЛС су била већа (нпр. око 39 m и 44 m), што би у случају коришћења сфера пречника 14 cm захтијевало значајно дуже вријеме скенирања (до 115 минута) или не би омогућило поуздану детекцију сигнала. У случају употребе сфера већег пречника (нпр. 20 cm), не би било потребе за корекцијама, јер би било могуће задржати првобитни распоред уз прихватљиво вријеме скенирања на станици (око 31 минут). Према томе, предложени распоред станица ТЛС и скенерских сигнала дефинисан у поглављу 4 је примјенљив, само би у том случају скенирање било доста спорије.

С обзиром на то да су скениране двије стране објекта, није било потребе за преклапањем појединих станица (*TLS5-TLS4* и *TLS9-TLS1*), нити за постављањем скенерских сигнала у тим зонама.

Наведено указује на потребу за мањим корекцијама у распореду станица ТЛС и скенерских сигнала. Анализом је утврђено да је потребно измјестити једну станицу (*TLS5*) и три скенерска сигнала (5, 9 и 11). Корекције нису извршене произвољно, већ су резултат понављања треће фазе оптимизације (поглавље 3.2.3). На тај начин добијено је рјешење које представља прилагођавање оптималног плана реалним условима, уз испуњење свих критеријума оптималности.

Понављање треће фазе подразумијева варирање координата три скенерска сигнала (5, 9 и 11) и станице ТЛС (*TLS5*), све док разматрани критеријуми тачности и позданости не буду задовољени. Током овог процеса потребно је провјерити да ли је станица *TLS5* унутар допустиве области постављања скенера, да ли је омогућено потпуно скенирање двије стране објекта и довољан преклоп сусједних облака тачака.

Тежине мјерених величина се рачунају према изразима (3.11), (3.12) и (3.13). За стандардну девијацију мјерења дужине узета је вриједност ± 3 mm, која је везана за скенер Faro Focus^{M70} којим ће се реализовати скенирање. Након образовања матрице тежина \mathbf{P} , рачуна се матрица поузданости опажања $\mathbf{R} = \mathbf{E} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^+ \mathbf{A}^T \mathbf{P}$ (према изразу (3.15)), при чему дијагонални елементи представљају коефицијенте унутрашње поузданости опажања (Табела 5-6). Затим слиједи рачунање маргиналне грубе грешке (Табела 5-7) и полуоса троосног елипсоида грешака (Табела 5-8).



Слика 5-4. Сферни скенерски сигнал на објекту (скенерски сигнал са ознаком ОВ3)

Табела 5-4. Основни подаци о ТЛС мрежи за скенирање двије стране зграде факултета

Дате тачке	$m_{\xi} = 0$
Непознате тачке: <i>TLS5, TLS6, TLS7, TLS8, TLS9, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, ОВ3</i>	$m = 13$
Број косих дужина:	$n_{\rho} = 32$
Број хоризонталних праваца:	$n_{\alpha} = 32$
Број вертикалних углова:	$n_{\theta} = 32$
Укупан број опажања:	$n = n_{\rho} + n_{\alpha} + n_{\theta} = 96$
Број мјерних станица:	$m_{\xi} = 5$
Број непознатих координата:	$u_{xyz} = 39$
Број непознатих оријентација на станицама:	$u_Z = 0$
Укупан број непознатих:	$u = u_{xyz} + u_Z = 39$
Дефект мреже:	$d = 6$
Ранг мреже:	$r = u_{xyz} + u_Z - d = 33$
Број степени слободe:	$f = n - (u_{xyz} + u_Z - d) = 63$
А priori грешка:	$\sigma_0^2 = 1$

У наставку су приказане приближне координате тачака оптималне ТЛС мреже (Табела 5-5) за скенирање двије стране зграде факултета, као и разматрани критеријуми тачности и поузданости (Табеле 5-6, 5-7 и 5-8). Нису приказани сви међукораци и варијације координата током спровођења треће фазе оптимизације, већ је представљен коначан резултат, јер би детаљан приказ свих итерација био обиман и не би допринио јаснијем разумијевању добијеног рјешења.

Табела 5-5. Приближне координате тачака ТЛС мреже

Тачка	X_0 [m]	Y_0 [m]	H_0 [m]
TLS5	8017.21	161.60	1.50
TLS6	7994.52	160.46	1.50
TLS7	7975.70	174.35	1.50
TLS8	7957.84	203.47	1.50
TLS9	7968.60	214.66	1.50
ОВЗ	7981.39	196.51	1.00
5	8005.84	157.20	0.00
6	8005.36	172.87	0.00
7	7987.01	168.07	0.00
8	7966.27	180.47	0.00
9	7962.61	190.57	0.00
10	7963.01	209.76	0.00
11	7977.14	215.64	0.00

Табела 5-6. Коefицијенти унутрашње поузданости планираних опажања и количник маргинале грубе грешке и варијансе планираних опажања

Од	До	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$
TLS5	7	Дужина	0.46	5.06	Хоризонтални правац	0.38	5.54	Вертикални угао	0.42	5.29
	6	Дужина	0.50	4.81	Хоризонтални правац	0.34	5.86	Вертикални угао	0.42	5.29
	5	Дужина	0.42	5.24	Хоризонтални правац	0.28	6.50	Вертикални угао	0.34	5.87
TLS6	5	Дужина	0.40	5.42	Хоризонтални правац	0.29	6.33	Вертикални угао	0.34	5.88
	6	Дужина	0.62	4.34	Хоризонтални правац	0.35	5.79	Вертикални угао	0.48	4.92
	7	Дужина	0.54	4.63	Хоризонтални правац	0.43	5.22	Вертикални угао	0.48	4.94
	8	Дужина	0.43	5.22	Хоризонтални правац	0.35	5.74	Вертикални угао	0.39	5.50
TLS7	ОВЗ	Дужина	0.48	4.94	Хоризонтални правац	0.24	7.02	Вертикални угао	0.35	5.76
	10	Дужина	0.44	5.16	Хоризонтални правац	0.34	5.88	Вертикални угао	0.39	5.50
	6	Дужина	0.49	4.88	Хоризонтални правац	0.37	5.63	Вертикални угао	0.43	5.22
	7	Дужина	0.46	5.03	Хоризонтални правац	0.41	5.34	Вертикални угао	0.43	5.24
	8	Дужина	0.56	4.57	Хоризонтални	0.47	4.99	Вертикални	0.51	4.80

					правац			угао		
TLS8	OB3	Дужина	0.47	4.98	Хоризонтални правац	0.24	6.97	Вертикални угао	0.35	5.76
	11	Дужина	0.39	5.50	Хоризонтални правац	0.30	6.27	Вертикални угао	0.34	5.86
	10	Дужина	0.58	4.50	Хоризонтални правац	0.44	5.15	Вертикални угао	0.50	4.82
	9	Дужина	0.39	5.48	Хоризонтални правац	0.32	6.08	Вертикални угао	0.33	5.95
	8	Дужина	0.44	5.13	Хоризонтални правац	0.33	5.93	Вертикални угао	0.39	5.49
TLS9	10	Дужина	0.44	5.13	Хоризонтални правац	0.30	6.23	Вертикални угао	0.37	5.60
	9	Дужина	0.39	5.46	Хоризонтални правац	0.32	6.08	Вертикални угао	0.33	5.95
	11	Дужина	0.41	5.32	Хоризонтални правац	0.28	6.42	Вертикални угао	0.34	5.86

За предложени оптимални план скенирања најмања вриједност коефицијента унутрашње поузданости износи 0.24, док је највећа вриједност 0.62, чиме је задовољено ограничење (3.8-1), $R_{ii} - 0.20 \geq 0$ (Табела 5-6). Средњи коефицијент поузданости опажања износи 0.41, што је унутар дозвољених граница, па је тиме задовољено ограничење (3.8-1), $\bar{R} \geq 0.40$.

Највећа вриједност количника маргиналне грубе грешке и варијансе планираног опажања износи 7.02 (Табела 5-6), што је унутар дозвољених граница $\left(\max \left(\frac{G_i^*}{\sigma_i} \right) < 7.65 \right)$ чиме је задовољено ограничење (3.8-3).

Вриједности полуоса троосног елипсоида грешака су израчунате према изразима (3.20), (3.21) и (3.22). Највећа вриједност количника полуоса A_0/C_0 износи 1.34, што указује да ова вриједност не прелази дозвољену вриједност дефинисану ограничењем (3.8-2) (Табела 5-7).

Табела 5-7. Полуосе троосног елипсоида грешака

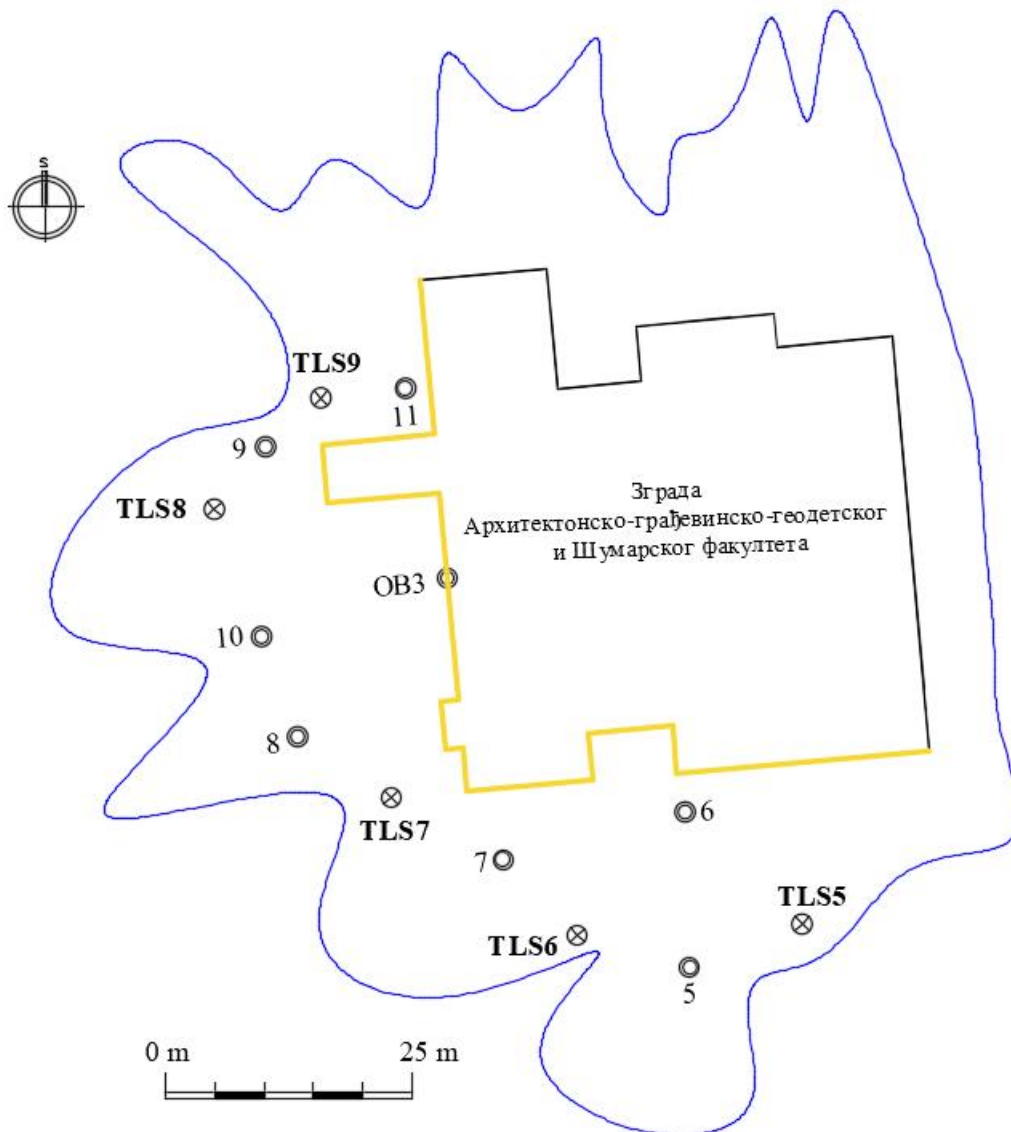
Тачка	A_0 [mm]	B_0 [mm]	C_0 [mm]	A_0/C_0
TLS5	2.08	1.57	1.69	1.33
TLS6	1.66	1.30	1.43	1.28
TLS7	1.29	1.00	1.11	1.29
TLS8	1.46	1.14	1.27	1.29
TLS9	1.96	1.60	1.85	1.22
OB3	1.85	1.54	1.82	1.19
5	2.39	1.81	1.95	1.32
6	1.77	1.41	1.59	1.26
7	1.89	1.41	1.49	1.34
8	1.65	1.24	1.31	1.34
9	1.77	1.34	1.42	1.33
10	2.29	1.78	1.97	1.29
11	2.30	1.77	1.99	1.30

С обзиром на то да ће се скенирање изводити скенером чији је максималан домет 70 m, површина заједничког скенираног подручја за двије станице ТЛС мора износити више од 3 080 m² како би се обезбиједио минималан преклоп између сусједних облака тачака од 20%. У конкретном случају процјењена вриједност преклопа износи више од 40%, чиме је обезбијеђен довољан степен преклапања.

На *Слици 5-5* приказана је оптимална геометрија ТЛС мреже за скенирање двије стране зграде факултета, односно оптималан број и оптималне локације станица ТЛС и скенерских сигнала. На основу извршене анализе може се закључити да су за приказани распоред станица ТЛС и скенерских сигнала испуњена сва дефинисана ограничења: (3.6-1), (3.6-2), (3.6-3), (3.8-1), (3.8-2) и (3.8-3).

Прије почетка скенирања за скенер Faro Focus^{M70} бира се одговарајући модел резолуције у зависности од максималне удаљености сферног скенерског сигнала од станице ТЛС, као и параметар поузданости скенирања *Quality*. За предложени оптимални план скенирања (*Слика 5-5*) највећа удаљеност скенерског сигнала од станице ТЛС износи 34.6 m, а најкраћа износи 7.6 m. Ако су сферни скенерски сигнали на растојању од станице ТЛС до 19 m, да би скенер могао да препозна исте, бира се модел резолуције *Resolution - 1/4*, па вријеме скенирања на тој станици са параметром *Quality - 4x* износи 10 минута (*Табела 5-3*). За скенерске сигнале на растојању до 39 m, бира се модел *Resolution - 1/2*, а вријеме скенирања са истим параметром *Quality - 4x* износи 31 минут (*Табела 5-3*).

Добијено рјешење представља оптималну конфигурацију у оквиру анализираниог допустивог скупа, при чему су истовремено задовољена сва дефинисана ограничења терестричког ласерског скенирања (максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта) и разматрани критеријуми квалитета 3Д геодетске мреже.



Слика 5-5. Оптималан распоред станица ТЛС и скенерских сигнала за скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Линијом жуте боје су приказане двије стране зграде које су предмет скенирања.
 ⊗ - станица ТЛС, ⊙ - сферни скенерски сигнал

5.2. Скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета

Скенирање двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета изведено је према четири плана скенирања с циљем верификације предложене методологије оптимизације и анализе утицаја различитих приступа планирању на тачност регистрације облака тачака.

Први план представља резултат теренског искуства без формалног планирања и служи као референтни случај. Други план је добијен примјеном предложене вишекритеријумске оптимизације (план скенирања дефинисан у поглављу 5.1) и представља оптимално рјешење, при чему су задовољена сва постављена ограничења: максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални преклоп сусједних облака тачака, потпуно скенирање објекта, као и разматрани критеријуми квалитета 3Д геодетских мрежа.

Трећи и четврти план представљају експерименталне варијанте настале редукијом броја скенерских сигнала у односу на други план, при чему се на преклопу сусједних облака тачака користе два умјесто минимално потребна (оптимална) три сигнала. Циљ је испитивање утицаја смањења минималног броја сигнала на тачност регистрације, уз услов да је током скенирања укључен компензатор нагиба.

Двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета су скениране према четири плана скенирања, који су у наставку детаљно представљени:

1. **Први план скенирања** - конфигурација ТЛС мреже дефинисана на основу искуства (Слика 5-8). Скенирање је изведено на основу теренског искуства аутора, уз поштовање ограничења скенирања која се односе на минималан дозвољен преклоп између сусједних облака тачака, максималан домет скенера, потпуно скенирање двије стране објекта и минималан број станица ТЛС. Двије стране објекта су скениране са пет станица ТЛС. За регистрацију свих облака тачака, на објекту и у непосредној близини објекта постављено је осам сферних и 13 равних скенерских сигнала, укупно 21. Вријеме трајања скенирања износило је 155 минута (5x31 минут). Током скенирања био је укључен двоосни компензатор нагиба оса.
2. **Други план скенирања** - конфигурације ТЛС мреже заснована на примјени методологије оптимизације, дефинисане у поглављу 5.1. (Слика 5-5). На преклопу између сусједних облака тачака распоређена су по три сферна скенерска сигнала, уз поштовање ограничења мјера квалитета 3Д геодетских мрежа (Табела 5-5, Табела 5-6, Табела 5-7). Објекат је скениран са пет станица ТЛС (ТЛС5, ТЛС6, ТЛС7, ТЛС8 и ТЛС9). За регистрацију свих пет облака тачака коришћено је укупно осам сферних скенерских сигнала (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и ОВ3). За све планиране станице ТЛС максимална удаљеност сфере није прелазила 35 m, а минимална је била 19 m, па је вријеме трајања скенирања по станици износило 31 минут (за одабрани модел *Resolution* - 1/2). Укупно скенирање двије стране објекта трајало је 155 минута (5x31 минут). Током скенирања био је укључен двоосни компензатор нагиба оса.
3. **Трећи план скенирања** - конфигурација ТЛС мреже настала редукијом броја скенерских сигнала у односу на други план, тако да на преклопу сусједних облака тачака буду два сигнала уместо три (Слика 5-7). Циљ овог плана је испитивање утицаја смањења минималног броја скенерских сигнала на преклопу сусједних облака тачака на тачност регистрације облака тачака. Овај план задовољава све разматране критеријуме оптималности. Распоред и број станица ТЛС исти су као у другом плану. За регистрацију свих облака тачака коришћено је укупно пет сферних сигнала (6, 7, 9, 10 и ОВ3). Локације заједничких скенерских сигнала између другог и трећег плана су идентичне. Двије стране објекта скениране су са пет станица ТЛС, а укупно трајање скенирања износило је 155 минута (5x31 минут). Током скенирања био је укључен двоосни компензатор нагиба оса.
4. **Четврти план скенирања** - конфигурација ТЛС мреже настала редукијом броја скенерских сигнала као у трећем плану, уз комбиновану резолуцију скенирања, с циљем анализе утицаја различите резолуције и смањења минималног броја скенерских сигнала на преклопу сусједних облака на

тачност регистрације (Слика 5-7). Овај план задовољава све разматране критеријуме оптималности. Распоред и број станица ТЛС исти су као у другом плану. Локације заједничких скенерских сигнала између другог и четвртог плана су идентичне. За регистрацију свих облака тачака коришћено је укупно седам сфера (5, 6, 7, 9, 10, 11 и *OB3*). С обзиром да за три станице ТЛС (*TLS5*, *TLS6* и *TLS9*) максимална удаљеност скенерских сигнала од инструмента није прелазила 19 m, скенирање је трајало по 10 минута (за одабрани модел *Resolution - 1/4*). За преостале двије станице ТЛС (*TLS7* и *TLS8*) максимална удаљеност сфере од инструмента била је између 19 и 39 m, па је вријеме трајања скенирања износило по 31 минут (за одабрани модел *Resolution - 1/2*). Укупно трајање скенирања двије стране објекта износило је 92 минуте (2x31 минут + 3x10 минута). Током скенирања био је укључен двоосни компензатор нагиба оса.

У циљу верификације предложене методологије у реалним условима и доношења закључака о њеној ефективности, праћене су вриједности показатеља тачности регистрације. Као додатни параметри за поређење разматрани су број станица ТЛС, број скенерских сигнала, вријеме теренске припреме, вријеме скенирања, као и могућност аутоматске регистрације облака тачака у софтверу.

Табела 5-8. Карактеристике процеса скенирања за четири плана скенирања

	I план (без оптимизације)	II план (3Д оптимизација, 3 тачке у преклопу + компензатор нагиба)	III план (3Д оптимизација, 2 тачке у преклопу + компензатор нагиба)	IV план (3Д оптимизација, 2 тачке у преклопу + компензатор нагиба)
Број станица ТЛС	5	5	5	5
Број сферних скенерских сигнала	8	8	5	7
Број равних сигнала	13	0	0	0
Теренска припрема	60 минута	25 минута	15 минута	20 минута
Вријеме скенирања	155 минута	155 минута	155 минута	92 минуте
Аутоматска регистрација у софтверу	Не	Да	Да	Да

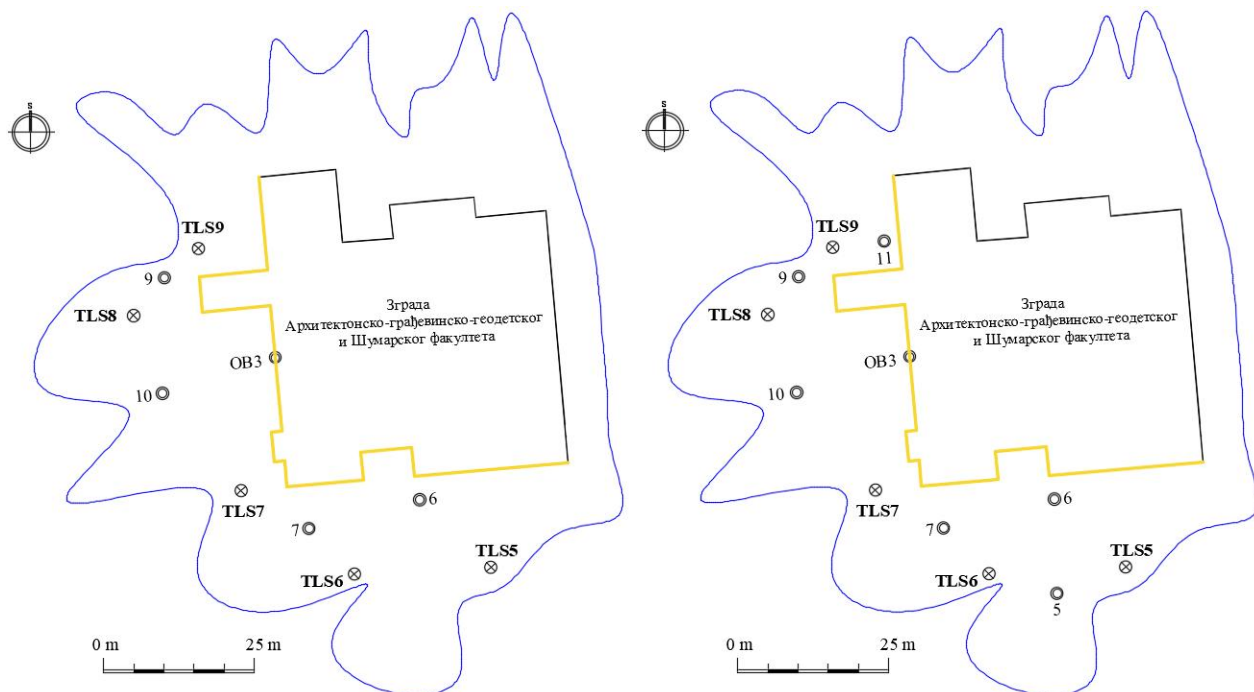
Прије почетка скенирања извршена је теренска припрема, која је укључивала, између осталог, постављање скенерских сигнала потребних за регистрацију облака тачака. С обзиром на то да се укупан број скенерских сигнала разликује за поједине планове скенирања, трајање овог корака теренске припреме није било исто за све планове. Стога је вријеме теренске припреме узето у обзир као један од параметара за поређење планова скенирања (Табела 5-8).

Први план скенирања обухватио је постављање укупно 21 скенерског сигнала, међутим, нису сви сигнали коришћени у процесу регистрације. Дио сигнала постављен је као резерва (посебно равни сигнали на објекту), с обзиром на могуће неповољне упадне углове и услове видљивости, тако да одређени број сигнала није препознат у софтверу, те није укључен у обраду. Овакав приступ је примјењен јер први план није био резултат детаљног планирања, за разлику од другог плана, већ су сигнали постављани са одређеним вишком ради обезбјеђења поуздане регистрације.

Према четвртном плану, скенирање двије стране објекта изведено је за 92 минуте, што је за 63 минуте краће у односу на преостала три плана. Стога је вријеме скенирања узето у обзир као један од параметара за поређење ефикасности планова (Табела 5-8).



Слика 5-6. Станице ТЛС са ознакама ⊗ TLS6 и ⊗ TLS8



Слика 5-7. 2Д приказ распореда и броја станица ТЛС и сферних скенерских сигнала за трећи (лијево) и четврти (десно) план скенирања.

У трећем и четвртном плану скенирања положај станица ТЛС није мијењан у односу на други план, па су задовољена ограничења која се односе на минималан преклоп, максималан упадни угао и потпуно скенирање двије стране зграде факултета. У Табелама 5-9 до 5-12 приказане су вриједности разматраних критеријума квалитета 3Д геодетске мреже за ове планове. Насупрот томе, први план представља резултат теренског искуства без формалног планирања, при чему за њега нису прорачуната ограничења у погледу минималног преклопа, максималног упадног угла, потпуне покривености објекта нити разматрани критеријуми квалитета 3Д геодетске мреже.

Табела 5-9. Коefицијенти унутрашње поузданости и количник маргиналне грубе грешке и варијансе планираних опажања за трећи план скенирања

Од	До	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$
TLS5	7	Дужина	0.38	5.57	Хоризонтални правац	0.29	6.37	Вертикални угао	0.33	5.93
	6	Дужина	0.38	5.51	Хоризонтални правац	0.28	6.42	Вертикални угао	0.33	5.93
TLS6	6	Дужина	0.48	4.93	Хоризонтални правац	0.21	7.47	Вертикални угао	0.33	5.94
	7	Дужина	0.42	5.27	Хоризонтални правац	0.24	6.98	Вертикални угао	0.33	5.94
TLS7	OB3	Дужина	0.37	5.66	Хоризонтални правац	0.18	7.98	Вертикални угао	0.27	6.63
	10	Дужина	0.32	6.02	Хоризонтални правац	0.21	7.54	Вертикални угао	0.27	6.64
	6	Дужина	0.38	5.56	Хоризонтални правац	0.29	6.37	Вертикални угао	0.33	5.94
	7	Дужина	0.37	5.61	Хоризонтални правац	0.29	6.32	Вертикални угао	0.33	5.95
TLS8	OB3	Дужина	0.36	5.67	Хоризонтални правац	0.18	7.96	Вертикални угао	0.27	6.63

	10	Дужина	0.49	4.91	Хоризонтални правац	0.32	6.06	Вертикални угао	0.40	5.43
	9	Дужина	0.31	6.11	Хоризонтални правац	0.22	7.21	Вертикални угао	0.26	6.75
TLS9	10	Дужина	0.30	6.20	Хоризонтални правац	0.22	7.22	Вертикални угао	0.26	6.69
	9	Дужина	0.32	6.01	Хоризонтални правац	0.22	7.32	Вертикални угао	0.26	6.72

Табела 5-10. Полуосе троосног елипсоида грешака за трећи план скенирања

Тачка	A_0 [mm]	B_0 [mm]	C_0 [mm]	A_0/C_0
TLS5	2.48	1.85	1.98	1.34
TLS6	2.27	1.85	2.11	1.23
TLS7	1.38	1.08	1.22	1.28
TLS8	1.92	1.52	1.72	1.26
TLS9	2.38	1.89	2.16	1.26
OB3	1.91	1.57	1.84	1.21
6	1.97	1.54	1.73	1.28
7	2.04	1.54	1.66	1.33
9	1.86	1.39	1.49	1.33
10	2.44	1.93	2.20	1.27

За трећи план скенирања, најмања вриједност коефицијента унутрашње поузданости износи 0.19 и односи се на планирана опажања хоризонталних праваца са TLS7 и TLS8 према сигналу OB3 (Табела 5-9). За преостала планирана опажања, ова вриједност се креће у интервалу од 0.21 до 0.56, чиме је за та опажања задовољено ограничење (3.8-1).

Највећа вриједност количника маргиналне грубе грешке и варијансе планираног опажања износи 7.92 за опажања хоризонталних праваца са TLS7 и TLS8 према скенерском сигналу OB3 (Табела 5-9). За преостала опажања, максимална вриједност износи 7.48, што је унутар дозвољених граница, те је задовољено ограничење (3.8-3).

Највећа вриједност количника полуоса троосног елипсоида грешака A_0/C_0 износи 1.35 (Табела 5-10), што указује да ова вриједност не прелазие дозвољену вриједност дефинисану ограничењем (3.8-2).

Табела 5-11. Коефицијенти унутрашње поузданости и количник маргиналне грубе грешке и варијансе планираних опажања за четврти план скенирања

Од	До	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$	Мјерна величина	R_{ii}	$\frac{G_i^*}{\sigma_i}$
TLS5	7	Дужина	0.45	5.08	Хоризонтални правац	0.38	5.56	Вертикални угао	0.41	5.31
	6	Дужина	0.50	4.82	Хоризонтални правац	0.34	5.90	Вертикални угао	0.41	5.31
	5	Дужина	0.41	5.33	Хоризонтални правац	0.27	6.62	Вертикални угао	0.33	5.97
TLS6	5	Дужина	0.39	5.47	Хоризонтални правац	0.28	6.48	Вертикални угао	0.33	5.98

	6	Дужина	0.56	4.58	Хоризонтални правац	0.29	6.38	Вертикални угао	0.41	5.31
	7	Дужина	0.50	4.82	Хоризонтални правац	0.33	5.97	Вертикални угао	0.41	5.32
TLS7	OB3	Дужина	0.37	5.59	Хоризонтални правац	0.19	7.92	Вертикални угао	0.27	6.56
	10	Дужина	0.33	5.95	Хоризонтални правац	0.21	7.48	Вертикални угао	0.27	6.56
	6	Дужина	0.38	5.54	Хоризонтални правац	0.29	6.35	Вертикални угао	0.33	5.94
	7	Дужина	0.37	5.59	Хоризонтални правац	0.29	6.30	Вертикални угао	0.33	5.95
TLS8	OB3	Дужина	0.37	5.62	Хоризонтални правац	0.19	7.87	Вертикални угао	0.27	6.56
	11	Дужина	0.38	5.53	Хоризонтални правац	0.29	6.30	Вертикални угао	0.34	5.89
	10	Дужина	0.54	4.66	Хоризонтални правац	0.37	5.64	Вертикални угао	0.45	5.09
	9	Дужина	0.39	5.50	Хоризонтални правац	0.31	6.11	Вертикални угао	0.33	5.97
TLS9	10	Дужина	0.43	5.23	Хоризонтални правац	0.29	6.33	Вертикални угао	0.36	5.70
	9	Дужина	0.39	5.48	Хоризонтални правац	0.31	6.11	Вертикални угао	0.33	5.98
	11	Дужина	0.41	5.34	Хоризонтални правац	0.28	6.45	Вертикални угао	0.34	5.88

Табела 5-12. Полуосе троосног елипсоида грешака за четврти план скенирања

Тачка	A_0 [mm]	B_0 [mm]	C_0 [mm]	A_0/C_0
TLS5	1.23	0.93	1.02	1.32
TLS6	1.09	0.84	0.92	1.29
TLS7	0.90	0.70	0.78	1.29
TLS8	0.98	0.75	0.82	1.31
TLS9	1.38	1.10	1.27	1.26
OB3	1.71	1.45	1.69	1.17
5	2.05	1.56	1.66	1.31
6	1.56	1.27	1.43	1.23
7	1.71	1.27	1.33	1.35
9	1.61	1.22	1.30	1.32
10	2.08	1.58	1.68	1.32
11	2.09	1.57	1.69	1.33

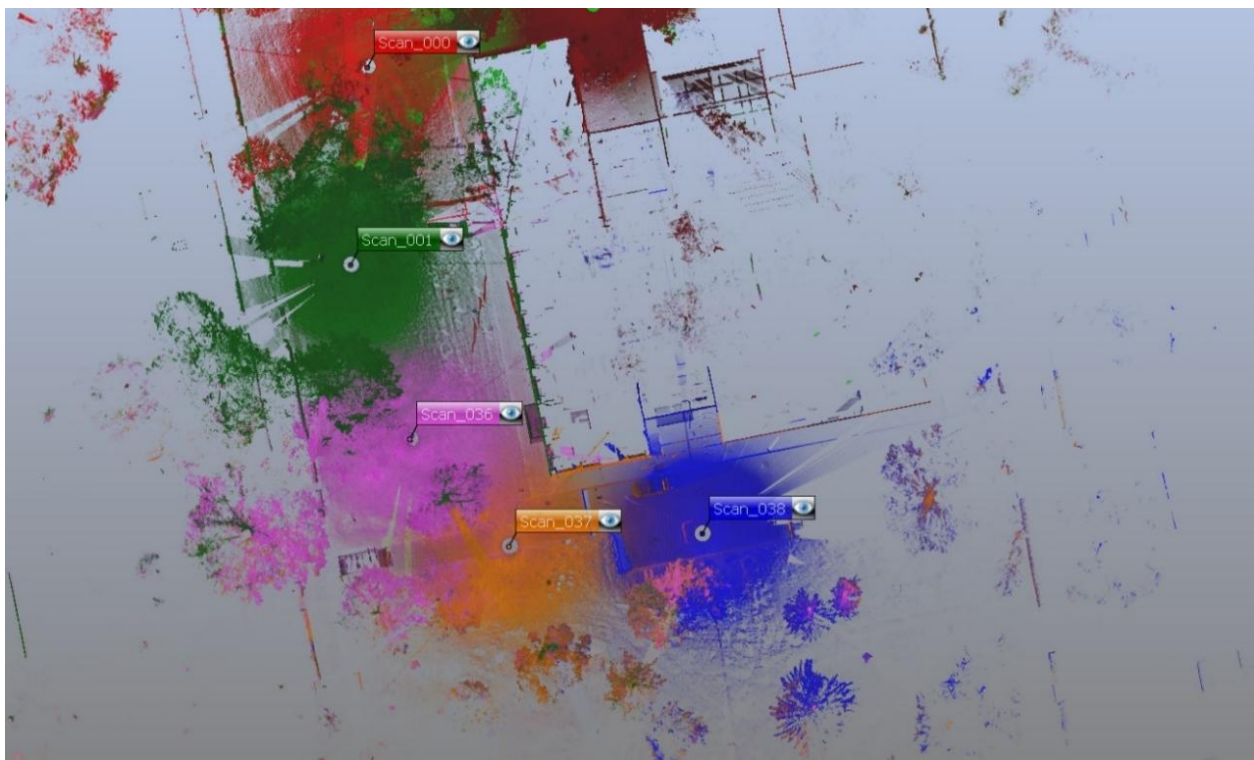
За четврти план скенирања, најмања вриједност коефицијента унутрашње поузданости износи 0.18 и односи се на планирана опажања хоризонталних праваца са TLS7 и TLS8 према сигналу OB3 (Табела 5-11). За преостала планирана опажања, ова вриједност се креће у интервалу од 0.21 до 0.49, чиме је за та опажања задовољено ограничење (3.8-1).

Највећа вриједност количника маргиналне грубе грешке и варијансе планираног опажања износи 7.98 за опажања хоризонталних праваца са $TLS7$ и $TLS8$ према скенерском сигналу $OB3$ (Табела 5-11). За преостала опажања, максимална вриједност износи 7.54, што је унутар дозвољених граница, те је задовољено ограничење (3.8-3).

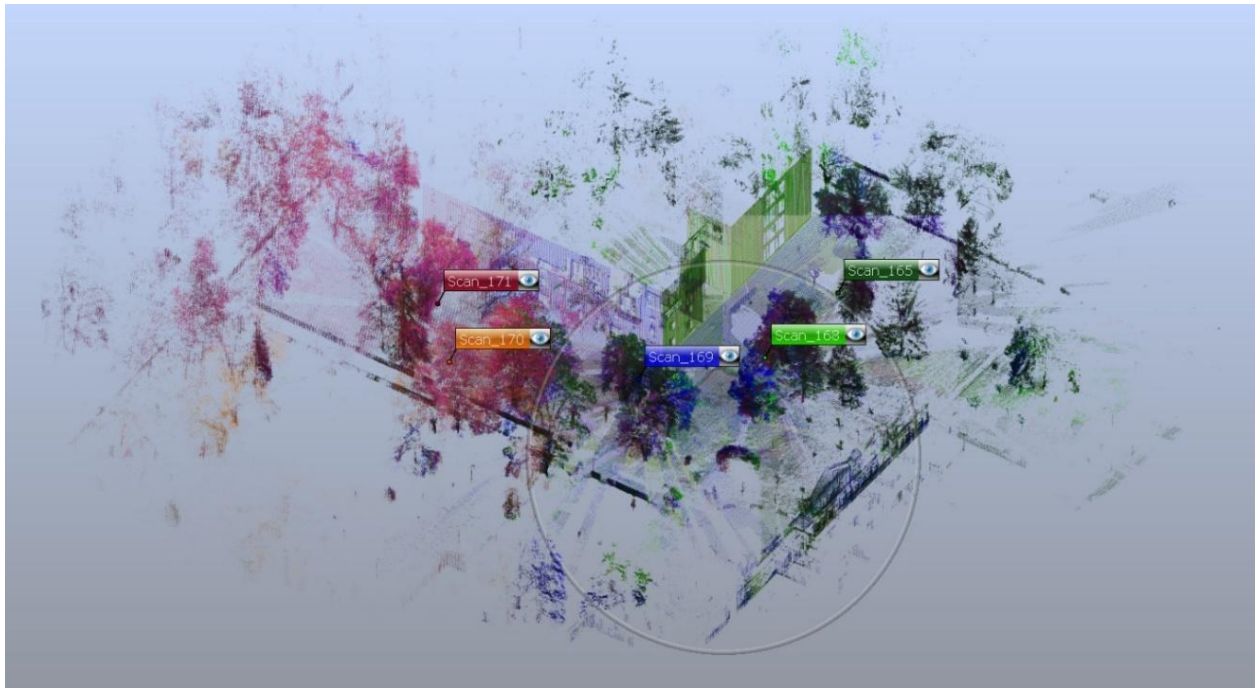
Највећа вриједност количника полуоса троосног елипсоида грешака A_0/C_0 износи 1.34 (Табела 5-12), што указује да ова вриједност не прелази дозвољену вриједност дефинисану ограничењем (3.8-2).

5.3. Обрада и анализа добијених резултата

Обрада података скенирања изведена је у софтверу FARO SCENE 3D Point Cloud Software. Примijeњена је комбинација двије методе регистрације облака тачака, регистрација типским скенерским сигнаlima и регистрација најбољим уклапањем површи. Добијени резултати који се односе на тачност регистрације облака тачака приказани су у Табели 5-13 и Табели 5-14.



Слика 5-8. Приказ распореда и броја станица ТЛС за први план скенирања. Подаци су преузети из софтвера "FARO SCENE 3D Point Cloud Software" након обраде скенирања



Слика 5-9. Приказ распореда и броја станица ТЛС за други план скенирања. Подаци су преузети из софтвера "FARO SCENE 3D Point Cloud Software" након обраде скенирања

Скенирањем двије стране зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета према плану без оптимизације (I план скенирања) и према плану заснованом на предложеној оптимизацији (II план скенирања) утврђена је разлика у средњој вриједности свих одступања између парова одговарајућих тачака у преклопу два облака тачака (Mean Point Error) од 3.1 mm. У оба случаја скенирање је трајало по 155 минута, а број станица ТЛС је исти – двије стране објекта су скениране са пет станица. Разлика у броју скенерских сигнала је значајна: за први план је коришћено 21, а за други осам скенерских сигнала, што је довело до смањења времена теренске припреме и времена обраде података за други план. У оба плана задовољен је минимум преклопа од 20%, али је у плану са оптимизацијом остварена већа вриједност минималног преклопа између сусједних облака тачака (Табела 5-14).

Средња вриједност свих одступања између парова одговарајућих тачака у преклопу два облака тачака (Mean Point Error) за други, трећи и четврти план имају минимална одступања (Табела 5-14). Насупрот томе, највеће појединачно одступање између парова одговарајућих тачака у преклопу два облака тачака (Maximum Point Error) за трећи и четврти план је веће за 1.5 mm и 1.6 mm, респективно, у односу на други план (Табела 5-14). Током скенирања према трећем и четвртном плану био је укључен компензатор, што је могло допринијети близини резултата ових планова према другом плану. Додатно, распоред станица и скенерских сигнала задовољава основна ограничења ТЛС (минималан преклоп сусједних облака тачака, максималан упадни угао) и у одређеној мјери задовољава разматране критеријуме квалитета 3Д геодетских мрежа.

Табела 5-13. Показатељи квалитета регистрације облака тачака типским скенерским сигнаlima

	Mean Horizontal Error [mm]	Maximum Horizontal Error [mm]	Mean Vertical Error [mm]	Maximum Vertical Error [mm]	Mean Distance Error [mm]	Maximum Distance Error [mm]
I план (без оптимизације) 155 мин	2.2	8.7	3.4	16.1	4.3	17.2
II план (са оптимизацијом, 3 тачке у преклопу) 155 мин	0.5	1.2	1.7	5.3	1.8	5.5
III план (са оптимизацијом, 2 тачке у преклопу) 155 мин	0.4	0.8	2.5	6.0	2.5	6.0
IV план (са оптимизацијом, 2 тачке у преклопу) 92 мин	0.6	1.6	1.8	5.4	1.9	5.6

Табела 5-14. Показатељи квалитета регистрације облака тачака комбиновањем двије методе (регистрација типским скенерским сигнаlima + Cloud to Cloud метода регистрације)

	Mean Point Error [mm]	Maximum Point Error [mm]	Minimum Overlap [%]
I план (без оптимизације) 155 мин	8.1	10.3	32.9
II план (оптимизација у 3Д, 3 тачке у преклопу) 155 мин	5.0	7.2	40.0
III план (оптимизација у 3Д, 2 тачке у преклопу) 155 мин	5.1	8.7	40.0
IV план (оптимизација у 3Д, 2 тачке у преклопу) 92 мин	5.2	8.8	34.7

Анализом добијених резултата утврђено је да је тачност регистрације (*Mean Point Error*) за други, трећи и четврти план скенирања значајно већа у односу на први план. Посебно је важно истаћи да је код трећег и четвртог плана број скенерских сигнала на преклопу редукован на два, без уоченог значајног погоршања тачности регистрације. У сва четири случаја скенирања је био укључен двоосни компензатор нагиба оса. Резултати указују да је, у конкретним условима експеримента, при укљученом компензатору нагиба, могуће остварити поуздану регистрацију и са минималним бројем од два сигнала на преклопу. Ипак, имајући у виду номиналну тачност компензатора скенера Faro FocusM ($\approx 19''$), као и чињеницу да експеримент није обухватио варирање нагиба и контролно искључивање компензатора, добијени резултати се могу тумачити искључиво у оквиру испитиваних услова. За потпунију провјеру утицаја компензатора неопходно је спровести контролисано поређење са и

без укљученог компензатора током скенирања према трећем и четвртом плану, као и извршити испитивања инструментима са различитом тачношћу компензатора.

Током обраде података добијених скенирањем према другом, трећем и четвртом плану скенирања софтвер је омогућио аутоматску регистрацију облака тачака, при чему је софтвер аутоматски детектовао скенерске сигнале и извршио регистрацију облака тачака, што није био случај код првог плана. Тиме је вријеме обраде података скраћено. Због тога је као додатни параметар поређења планова скенирања у *Табели 5-8* укључена могућност аутоматске регистрације у софтверу.

На основу података који се односе на показатеље квалитета регистрације облака тачака (*Табеле 5-13* и *5-14*), други план показује боље резултате у односу на први план, чиме се потврђује исправност и ефективност предложене методологије оптимизације. Распоред станица ТЛС и скенерских сигнала, који обезбјеђује задовољење захтијева у погледу максималне дозвољене вриједности упадног угла и минималног преклопа сусједних облака тачака, као и испуњење разматраних критеријума квалитета 3Д геодетских мрежа, показала је значајан утицај на побољшање квалитета регистрације.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉЕ ИСТРАЖИВАЊЕ

Стални напредак компјутерских и информационих технологија и њихова све шира примјена доводе до потражње за све већом количином квалитетнијих и детаљнијих података, посебно о простору људске активности и објектима у њему. Због комплексности и разноликости тих објеката, прије свега у геометријском смислу, за њихово прецизно моделовање потребна је значајна количина мјерних података. У последњих тридесетак година афирмисала се технологија терестричког ласерског скенирања као високо аутоматизована и изузетно ефикасна метода прикупљања просторних података. Међутим, још увијек недостају верификоване методологије планирања процеса скенирања и јасно дефинисани критеријуми оцјене квалитета прикупљених података.

У дисертацији је предложена 3Д оптимизација геометрије терестричког ласерског скенирања. Оптимизација је обухватила одређивање оптималног броја и распореда станица ТЛС, као и броја, врсте и распореда скенерских сигнала за регистрацију сусједних облака тачака. Планирање је спроведено у тродимензионалном координатном систему, при чему је, поред распореда станица ТЛС и скенерских сигнала у хоризонталној (2Д) равни, укључена и вертикална компонента, односно висина објекта. Увођењем вертикалне компоненте и додатних параметара добијени су прецизнији и свеобухватнији резултати, уз повећану сложеност поступка.

За оптимизацију распореда станица ТЛС и скенерских сигнала формулисан је математички модел вишекритеријумске оптимизације, у којем су технолошка ограничења ТЛС система (максимална дозвољена вриједност упадног угла, минимални степен преклопа облака тачака и потпуна покривеност објекта) и граничне вриједности показатеља квалитета 3Д геодетске мреже дефинисале допустиви скуп рјешења, док је варирањем координата унутар тог скупа одређена оптимална конфигурација ТЛС мреже.

У предметном истраживању вишекритеријумски приступ се не заснива на избору најповољније алтернативе из унапријед дефинисаног дискретног скупа варијантних рјешења, што је чест приступ у класичним геодетским моделима вишекритеријумског одлучивања. Скуп могућих конфигурација ТЛС мреже овдје је дефинисан као континуалан допустиви простор станица ТЛС и скенерских сигнала, унутар којег се варирањем њихових координата спроводи поступак оптимизације. На тај начин оптимално рјешење није резултат рангирања коначног броја алтернатива, већ резултат итеративног варирања параметара унутар континуалног простора рјешења у складу са дефинисаним критеријумима и ограничењима.

Потребно је нагласити да у оквиру спроведеног истраживања није доказиван глобални оптимум у строгом математичком смислу, нити је вршена потпуна претрага простора свих могућих конфигурација мреже станица ТЛС и скенерских сигнала. Оптимизациони проблем је формулисан као вишекритеријумски, са векторском функцијом циља и скупом ограничења, при чему је примјеном дефинисаног поступка варирања координата станица ТЛС и скенерских сигнала добијена конфигурација ТЛС мреже која унутар допустивог скупа обезбјеђује најповољније вриједности усвојених критеријума. Могућност постојања других еквивалентних или блиских рјешења представља карактеристику

вишекритеријумских проблема и не утиче на валидност и примјенивост предложеног модела.

Први научни допринос дисертације представља увођење концепта допустиве области постављања терестричког ласерског скенера у процес 3Д оптимизације броја и локација станица ТЛС. Допустива област дефинисана је линијом максималног удаљења инструмента од објекта у зависности од препрека у непосредној близини објекта и линијом максималног приближења инструмента објекту у зависности од максималне дозвољене вриједности упадног угла ласерског зрака. Уколико се станица скенера позиционира унутар допустиве области са сигурношћу се може тврдити да за сваки видљиви дио објекта упадни угао не прелази максималну дозвољену вриједност и да се скенирање може изводити несметано. Иако је област конструисана у 2Д окружењу, прорачун упадног угла вршен је у 3Д простору, што је у складу са тродимензионалним карактером оптимизационог модела.

У доступној литератури није идентификован приступ који експлицитно дефинише и користи допустиву област постављања скенера у оквиру оптимизације локација станица ТЛС, што овом истраживању даје карактер оригиналног научног доприноса. Увођењем допустиве области редукује се простор претраге станица ТЛС на оне локације које задовољавају геометријска ограничења (одсуство препрека и дозвољени упадни угао), чиме се повећава ефикасност оптимизације.

Други научни допринос дисертације огледа се у интеграцији принципа класичног 3Д геодетског пројектовања мреже у процес оптимизације терестричког ласерског скенирања. Ограничења 3Д ласерског скенирања, као што су максимална дозвољена вриједност упадног угла ласерског зрака, услов потпуног скенирања објекта и минималан преклоп сусједних облака тачака, заједно са критеријумима квалитета тродимензионалних геодетских мрежа, интегрисана су у јединствен оптимизациони поступак с циљем одређивања оптималног броја и локација станица ТЛС и скенерских сигнала, уз уважавање присуства препрека у непосредној близини објекта и техничких карактеристика скенера. Такав интегрисани приступ у планирању ТЛС мреже није разматран у досадашњим истраживањима.

Објекат на којем је примјењена предложена методологија оптимизације процеса скенирања је зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци. Ријеч је о објекту комплексније конструкције, са доста препрека у његовој близини (сметње од других објеката, дрвећа и сл.) које значајно отежавају скенирање и утичу на квалитет самог скенирања. За потребе верификације предложене методологије планирања процеса терестричког ласерског скенирања, скениране су двије стране зграде факултета. Пројектована оптимална ТЛС мрежа за скенирање двије стране објекта обухвата пет станице ТЛС и осам скенерских сигнала. Обје стране објекта биће скениране у потпуности, са најмање 40% преклопа између сусједних облака тачака. Положајем станица осигурано је да упадни угао не прелази дозвољену вриједност. Скенерски сигнали су распоређени тако да је испуњен захтјев неколинеарности. Мрежа задовољава критеријуме квалитета 3Д геодетских мрежа.

Резултати показују да предложена методологија оптимизације може значајно смањити број потребних станица скенера за потпуно скенирање објекта и укупан број скенерских сигнала за поуздану регистрацију свих сусједних облака тачака, истовремено унапређујући квалитет регистрације облака тачака и скраћујући

вријеме теренских радова. Методологија показује практичну примјенљивост и поставља темељ за развој аутоматизованих алата за планирање ТЛС мјерења у сложеним урбаним срединама.

Добијени резултати потврђују да интеграција технолошких ограничења терестричког ласерског скенирања, допустиве области постављања скенера и показатеља квалитета 3Д геодетских мрежа у јединствен модел вишекритеријумске оптимизације представља поуздану основу за систематско пројектовање ТЛС мреже, чиме се потврђује постављена хипотеза дисертације.

Такође, резултати анализе показују да геометрија мреже станица ТЛС и скенерских сигнала, која задовољава захтијеве у погледу максималне дозвољене вриједности упадног угла, минималног преклопа сусједних облака тачака, неколинеарности скенерских сигнала и критеријуме квалитета 3Д геодетских мрежа, има значајан утицај на побољшање квалитета регистрације, чиме се потврђује постављена хипотеза дисертације.

Анализа допустиве области постављања станица ТЛС показала је да при граничним упадним угловима од 65°, 70° и 75° није могуће обезбиједити потпуно скенирање објекта односно распоредити станице ТЛС тако да буде скенирана цијела зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета. Потпуно обухватање објекта остварено је тек при граничној вриједности упадног угла од 78°. Иако се у релевантној литератури препоручује примјена мањих упадних углова ради повећања тачности мјерења, резултати истраживања указују да у реалним условима, усљед сложене геометрије објекта и просторних ограничења, такве препоруке нису увијек примјенљиве. Ово потврђује значај укључивања геометријских и просторних ограничења у процес планирања терестричког ласерског скенирања.

Истраживање је указало и на значај утицаја двоосног компензатора нагиба оса на квалитет регистрације облака тачака када се минимални број скенерских сигнала на преклопу редукује са три на два. За потпуну процјену утицаја компензатора потребна су контролисана експериментална испитивања са укљученим и искљученим компензатором, као и испитивања инструментима различите номиналне тачности компензатора.

Унапређење истраживања могло би се постићи приједлогом избора терестричког ласерског скенера оптималних мјерних карактеристика узимајући у обзир специфичности предмета скенирања (комплексност конструкције и димензије објекта, препреке у непосредној близини објекта и сл.) и захтјеве пројекта у погледу тачности.

Иако је у раду примјењен итеративни поступак оптимизације уз контролу геометријских ограничења и критеријума квалитета, даља истраживања могу бити усмјерена ка аутоматизацији поступка генерисања и вредновања већег броја могућих конфигурација ТЛС мреже унутар дефинисаног допустивог скупа.

Значајан истраживачки потенцијал представља примјена предложеног модела на сложеније просторне системе (индустријска постројења, урбани блокови, објекти културног наслеђа и др.).

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Akca, D. (2007): *Least Squares 3D Surface Matching*. Doctoral thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [2] Akca, D., Gruen, A. (2005): *Recent advances in least squares 3D surface matching*. Optical 3-D Measurement Techniques VII, Volume 2, pp. 197-206, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005126706>.
- [3] Ahn, J., Wohn, K. (2016): *Interactive scan planning for heritage recording*. Multimedia Tools and Applications, Volume 75, pp. 3655–3675, <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2473-0>.
- [4] Aryan, A., Bosche, F., Tang, P. (2021): *Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review*. Automation in Construction, Volume 125, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103551>.
- [5] Ašanin, S., Pandžić, S., Gospavić, Z., Milovanović, B., (2007): *Zbirka izabranih zadataka iz inženjerske geodezije*, Beograd.
- [6] Beinat, A., Crosilla, F. (2001): *Generalized Procrustes analysis for size and shape 3-D object reconstructions*. Optical 3-D Measurement Techniques V, Vienna, pp. 345-353.
- [7] Божић, Б., Савановић, М. (2023): *Рачун изравнања*. Академија техничко-уметничких струковних студија Београд. Уџбеник. ИСБН: 978-86-6090-066-3
- [8] Bianculli, D., Hernikl, C., Humphries, D. E. (2015): *Optimization of 3D target measurement accuracy for the leica scanstation P20*. The Journal of the CMSC , Volume 10, Issue 2, DOI: 10.13140/RG.2.1.1480.0482.
- [9] Cosarca, C., Jocea, A., Savu, A. (2009): *Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning*. Journal of Geodesy and Cadaster Volume 11, pp. 115-124.
- [10] Dehbi, Y., Leonhardt, J., Oehrlein, J. Haunert, J. (2021): *Optimal scan planning with enforced network connectivity for the acquisition of three-dimensional indoor models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 180, pp. 103–116, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.013>.
- [11] Dewitt, B. A. (1996): *Initial approximations for the three dimensional conformal coordinate transformation*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Volume 62, Issue 1, pp. 79-83.
- [12] Eling, D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 641, München.
- [13] Gordon, S. J., and Lichti, D. D. (2004): *Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: the effect on 3D resection solutions*. Survey Review, Volume 37, Issue 292, pp. 448-468, <https://doi.org/10.1179/sre.2004.37.292.448>.
- [14] Hejbudzka, K., Lindenbergh, R. C., Soudarissanane, S., Humme, A. (2010): *Influence of atmospheric conditions on the range distance and number of returned points in Leica Scanstation 2 point clouds*. In Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, Volume 38, Part 5, pp. 21–24.

- [15] Jia, F., Lichti, D. (2019): *Optimal Placement of a Terrestrial Laser Scanner with an Emphasis on Reducing Occlusions*. Remote Sensing, Volume 11, Issue 15, pp. 1746-1772, <https://doi.org/10.3390/rs11151749>.
- [16] Jia, F., Lichti, D. (2018): *An efficient, hierarchical viewpoint planning strategy for terrestrial laser scanner networks*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-2, pp. 137-144, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-137-2018>.
- [17] Jia, F., (2019): *A Model-based, Optimal Design System for Terrestrial Laser Scanning Networks in Complex Sites*. Doctoral thesis. University Of Calgary. Department of Geomatics Engineering.
- [18] Jia, F., Lichti, D. (2022): *A Practical Algorithm for the Viewpoint Planning of Terrestrial Laser Scanners*, Geomatics, Volume 2, Issue 2, pp. 181-196. <https://doi.org/10.3390/geomatics2020011>.
- [19] Kawashima, K., Yamanishi, S., Kanai, S., and Date, H. (2014): *Finding the nextbest scanner position for as-built modeling of piping systems*. In *International Archives of the Photogrammetry*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 40, Issue 5, pp. 313-320, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-313-2014>.
- [20] Kaasalainen, C., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A., Kukko, A. (2011): *Analysis of Incidence Angle and Distance Effects on Terrestrial Laser Scanner Intensity: Search for Correction Methods*. Remote Sensing, Volume 3, Issue 10, pp. 2207-2221, <https://doi.org/10.3390/rs3102207>.
- [21] Krooks, A., Kaasalainen, S., Hakala, T., Nevalainen, O. (2013): *Correction of intensity incidence angle effect in terrestrial laser scanning*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antalya, Turkey, Volume II-5/W2, pp. 145-150, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W2-145-2013>.
- [22] Михаиловић, К., Алексић, И., (2008): *Концепти мрежа у геодетском премеру*. Привредно друштво за картографију "ГЕОКАРТА", Београд.
- [23] Niemeier, W. (2008): *Ausgleichsrechnung*. 2. überarb. u. erw. Aufl., Lehrbuch, de Gruyter Berlin, ISBN: 978-3-11-019055-7.
- [24] Noichl, F., Lichti, D. D., Borrmann, A. (2024): *Automating adaptive scan planning for static laser scanning in complex 3D environments*. Automation in Construction, Volume 165, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105511>.
- [25] Lichti, D. D. (2007): *Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 61, Issue 5, pp. 307-324, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004>.
- [26] Lichti, D. D., Skaloud, J. (2010): *Registration and Calibration*. In: VOSSSELMAN, G., MAAS H-G, editors: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, ISBN 978-19044445-87-6. pp. 83-129.
- [27] Оприцовић, С. (1986): *Вишекритеријумска оптимизација*. Научна књига и Грађевински факултет Универзитета у Београду.
- [28] Pejić, M., Božić, B., Abolmasov, B. (2013): *Analiza metoda georeferenciranja podataka terestričkog laserskog skeniranja*. Tehnika - Naše građevinarstvo, izdanje 67, broj 2, str. 213 - 220.

- [29] Пејић, М., (2010): *Примена технологије терестричког ласерског скенирања у геодезији*. Часопис савеза инжењера Србије, Београд, ISSN 0040-2176, издање 64, број 1, стр. 13 – 18.
- [30] Пејић, М. (2013): *Тачност моделирања објеката технологијом терестричког ласерског скенирања*. Докторска дисертација. Универзитет у Београду. Грађевински факултет. Одсек за геодезију и геоинформатику.
- [31] Pejić, M., Petković, D. (2019): *Etaloniranje terestričkih laserskih skenera u laboratorijskim uslovima*. Tehnika - Naše građevinarstvo, izdanje 73, broj 4, str. 507 – 513.
- [32] Пејић, М. (2022): *Терестричко ласерско скенирање у инжењерству*. Грађевински факултет Универзитета у Београду и Академска мисао. Уџбеник. Београд. ИСБН: 978-86-7466-932-7.
- [33] Perović, G. (2001): *About PERG Strategy for Geodetic-Network Optimization*, Proc. of the International Workshop of Geodesy in South-East Europe, Dubrovnik, May 2-6, 2000. Eds: H. Moritz, D. Medak, B. Pribičević, Mitteilungen Der geodätischen Institute der TU Graz, Folge 89, Graz, pp. 81-99.
- [34] Перовић, Г. (2005): *Метод најмањих квадрата*, Грађевински факултет и аутор, Београд.
- [35] Перовић, Г. (2017): *Прецизна геодетска мерења*, Грађевински факултет и аутор, Београд.
- [36] Perović, G., Skorup, D., Sekulović, D. (2019): *Optimisation of the 2D control geodetic network of the landslide*. Monograph "Application of geographic information system in modeling of natural catastrophe". Faculty of Information Technology and Engineering University "Union-Nikola Tesla". pp. 129-159.
- [37] Перовић, Г. (2018): *Геодетске мреже – теорија и примене*. Издање у припреми за штампу.
- [38] Roca-Pardinas, J., Arguelles-Fraga, R., Asis Lopez, F., Ordonez, C. (2014): *Analysis of the influence of range and angle of incidence of terrestrial laser scanning measurements on tunnel inspection*. In Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 43, pp. 133–139, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.04.011>.
- [39] Reshetyuk, Y. (2009): *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Doctoral thesis in Infrastructure-Geodesy. Royal Institute of Technology, Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. Stockholm.
- [40] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R. (2011): *Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up*. In Proceedings of the ISPRS Calgary 2011 Workshop, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, pp. 127-132.
- [41] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., and Gorte, B. (2008): *Reducing the error in Terrestrial Laser Scanning by optimizing the measurement set-up*. In Proceedings of the ISPRS Congress, Silk Road for Information from Imagery, Volume 37, pp. 615–620.
- [42] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2009): *Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points*. In Proceedings of the ISPRS Workshop, Laser Scanning 2009, Volume 38, pp. 183–188.

- [43] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., and Teunissen, P. (2011): *Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points*. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 66, Issue 4, pp. 389–399.
- [44] Soudarissanane, S., Van Ree, J., Bucksch, A., and Lindenbergh, R. (2007): *Error budget of Terrestrial Laser Scanning: influence of the incidence angle on the scan quality*. In Proceedings of the 3D-NordOst 2007, pp. 73–81, Berlin, DOI: 10.13140/RG.2.1.1877.6404.
- [45] Soudarissanane, S. (2016): *THE GEOMETRY OF TERRESTRIAL LASER SCANNING - Identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry*. Doctoral thesis. Technische Universiteit Delft. ISBN 978-94-6233-203-4.
- [46] Sanso, F. (1973): *An exact solution of the roto-translation problem*. Photogrammetria, Volume 29, pp. 203–616.
- [47] Tan, K. and Cheng, X. (2015): *Intensity data correction based on incidence angle and distance for terrestrial laser scanner*. Journal of Applied Remote Sensing, Volume 9, Issue 1, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.094094>.
- [48] FARO Focus Laser Scanners. Training Workbook. Version 2021. https://knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/Training_Manual_for_SCENE.
- [49] <https://aggf.unibl.org/sr/o-fakultetu/nova-zgrada>

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Корнелија Кљечанин, рођена је 1. јануара 1988. године у Добоју од мајке Душанке Ристић и оца Теше Ристић. Основну школу је завршила у Теслићу као одличан ученик. Средњу школу, гимназију, је завршила 2007. године у Теслићу, такође са одличним успјехом.

Основне студије студијског програма Геодезија и геоинформатика, завршила је 2010. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, чиме је стекла академско звање инжењер геодезије (180 ЕЦТС). Мастер студије студијског програма Геодезија и геоинформатика, завршила је 2012. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду и стекла академско звање мастер инжењер геодезије (300 ЕПСБ). Школу докторских академских студија студијског програма Геодезија и геоинформатика, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, уписала је 2012. године.

Од 2013. године запослена је на Архитектонско-грађевинско-геодетском факултету Универзитета у Бањој Луци, гдје је ангажована као виши асистент. Изводи вјежбе на предметима у области геодетског премјера.

Као аутор и коаутор објавила је већи број научних и стручних радова из области геодезије, од којих су два на SCI листи.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: **Корнелија Т. Кљечанин**

Број индекса: **921/12**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОПТИМИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ СКЕНИРАЊА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, април 2026. године

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: **Корнелија Т. Кљечанин**
Број индекса: **921/12**
Студијски програм: **Геодезија и геоинформатика**
Наслов рада: **ОПТИМИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ
СКЕНИРАЊА**
Ментор: **проф. др Марко Пејић**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, април 2026. године

Потпис аутора

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ОПТИМИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ТЕРЕСТРИЧКОГ ЛАСЕРСКОГ СКЕНИРАЊА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, април 2026. године

Потпис аутора

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прерада, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прерада, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прерада, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прерада, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.