УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ
Геодезически факултет – катедра „Висша геодезия“

Приложение на мобилно лазерно сканиране при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен „ДОКТОР“

Професионално направление: 5.7. Архитектура, строителство и геодезия, докторска програма „ Обща, висша и приложна геодезия, кадастрални и геоинформационни системи“

Докторант: инж. Боримира Хаджиева
Научен ръководител: проф. д-р инж. Румен Миланов
Научен консултант: проф. д-р инж. Славейко Господинов

РЕЦЕНЗЕНТИ:

проф. д-р инж. Елена Пенева-Златкова
проф. д.ик.н. инж. Андрей Андреев

2025г.
гр.София

Дисертационната работа съдържа 86 страници писмена част и 27 страници под формата на 10 броя приложения.

Теоретичната и практическата част включват 49 фигури, 2 графики, 4 таблици, научно-приложни приноси и публикации на автора.

Библиографията обхваща 52 заглавия, от които 20 на кирилица и 32 на латиница.

Дисертационният труд е разгледан на заседание на катедра „Висша геодезия" в Геодезическия факултет на УАСГ на 18.06.2025г. и е насочен за защита.

Докторантът е зачислен на 12.07.2022г., като редовен докторантура към катедра „Висша геодезия" при Геодезическия факултет на УАСГ, по докторска програма „Обща, висша и приложна геодезия, Висша геодезия" със *Заповед №469/15.07.2022г.*

Отчислен е, с право на защита, със *Заповед №459/03.07.2025г*.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 18.09.2025г. от 17:00ч, в зала 520 – сграда на Ректората на УАСГ, бул."Христо Смирненски"№1.

Автор: инж. Боримира Хаджиева

Заглавие: Приложение на мобилно лазерно сканиране при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища

Утвърденото Научно жури е в състав:

Вътрешни за УАСГ-София

1. проф. д-р инж. Елена Пенева-Златкова
2. доц. д-р инж. Антонио Ангелов

резервен член: доц. д-р инж. Юри Цановски

Външни за УАСГ-София

3. проф. д.ик.н. инж. Андрей Андреев – НВУ „Васил Левски“
4. доц. д-р инж. Иван Митев – МГУ „Св. Иван Рилски“
5. доц. д-р инж. Радка Колева– ЛТУ

резервен член: доц. д-р инж. Милена Бегновска – МГУ „Св.Иван Рилски“

На първо място бих искал да изкажа своята искрена и дълбока благодарност към проф. д-р инж. Румен Миланов – мой научен ръководител, за изключително ценната му подкрепа, задълбочените му насоки и професионализма, който прояви през всички етапи от подготовката и реализацията на този дисертационен труд.

Изказвам признателност към екипите на „Геотехинженеринг“ ООД и GeoWILD MAK, с които имах удоволствието да работя. Съвместната ни проекти имаха съществен принос за практическата стойност на изследването.

Накрая, но не и по значение, съм благодарна на своето семейство за тяхната постоянна подкрепа, търпение и обич през целия период на работа по дисертацията. Вашето присъствие и разбиране ми вдъхнаха увереност и сила в най-предизвикателните моменти.

СЪДЪРЖАНИЕ

Увод.....1

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

I. Елементи на пътя 3

II.Пътна инфраструктура в България 4

1. Основни проблеми при пътната инфраструктура в България 4

1.1. Състояние на настилките и пътните съоръжения по републиканската пътна мрежа.....4

1.2. Състояние на общинската пътна мрежа 5

2. Дейности по отстраняване на основните проблеми при пътната инфраструктура 5

2.1. Поддръжка на пътища 5

2.2. Текущ ремонт.....5

2.3. Среден ремонт.....5

2.4. Основен ремонт на пътища.....6

III.Преглед и анализ на масово прилаганите в момента геодезически технологии.....6

1. Конвенционални геодезически измервания.....6

1.1 Същност на метода 6

1.2. Сфера на приложение.....7

1.3. Точност 7

1.4. Анализ на приложимостта 7

2. Глобални навигационни спътникови системи (ГНСС) измервания 7

2.1. ГНСС в режим RTK (Real Time Cinematic) с базова станция 7
2.2. ГНСС в режим RTK (Real Time Cinematic) с VRS (Virtual Reference Station)....8
2.3. Точност....8
2.4. Анализ на приложимостта....8
3. Въздушна фотограметрия....9
3.1. Същност на метода....9
3.2. Сфера на приложение....9
3.3. Точност....9
3.4. Анализ на приложимостта....9
4. Наземно лазерно сканиране....9
4.1. Същност на метода....9
4.2. Сфера на приложение....10
4.3 Точност....10
4.4. Анализ на приложимостта....10
5. Общо заключение....11
IV.Класификация на наземните лазерни сканиращи системи....11
1. Видове наземни лазерни скенери....11
1.1 Според принципа на измерване....12
1.2. Според ъгъла на обхват....12
1.3. Според отдалечеността на действие....13
1.4. Според мобилността....13
2. Мобилно лазерно сканиране....14
2.1. Опорна геодезическа мрежа (ОГМ)....14

2.2. Реализация на измерванията 14

4. Източници на грешки при наземното лазерно сканиране .16

4.1. Инструментални 16

4.2. Геометрични грешки от сканирането 16

4.3. Атмосферни условия 17

4.4. Грешки, породени от специфичните особености на обекта 17

4.5. Добри практики за минимизиране на грешките при наземното лазерно сканиране 17

4.6. Формула за определяне на общата грешка 17

5. Сфера на приложение 18

5.1. Приложение при заснемане на пътен участък с цел рехабилитация 18

5.2. Приложение при проверка и поддръжка на инженерни съоръжения 19

5.3. Приложение при тунелно строителство 19

5.4. Оценка на безопасността на пътната инфраструктура 19

5.5. Приложение при настъпило пътнотранспортно произшествие (ПТП) 21

ПРАКТИЧЕСКА ЧАСТ

1. Заснемане на част от урбанизирана територия 22

1.1. Цел на експеримента 22

1.2. Описание на обекта 22

1.3. Реализация на измерванията 22

1.3.1. Измерване с тотална станция 22

1.3.2. Измерване с лазерен скенер 23
1.3.3. Обработка на резултатите от сканирането 24
1.4. Анализ на крайните резултати от изследването 25
1.5. Заключение 26
2. Заснемане на част от булевард „Никола Габровски“, гр.Велико Търново 27
2.1. Цел на експеримента 27
2.2. Описание на обекта 27
2.3. Реализация на измерванията 27
2.4. Изграждане на работна геодезическа основа 28
2.5. Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки 29
2.5.1. Обработка на траекторията 29
2.5.2. Обработка на облака от точки 29
2.5.3. Филтрация на облака от точки 29
2.6. Заключение 31
3. Заснемане на републикански път III-552 „Трявна – Габрово“ 32
3.1. Цел на експеримента 32
3.2. Описание на обекта 32
3.3. Метод и реализация на измерванията 33
3.3.1. Метод на заснемане 33
3.3.2. Реализация на измерванията 34
3.4.Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки 34
3.4.1. Обработка на траектория 34

3.4.2. Обработка на облака от точки 35
3.4.3. Анализ на получените резултати 35
3.4. Заключение 35
4. Заснемане на общински път KRZ1430/ I-5, Николово - Черноочене/- с.Пчеларово, с.Минзухар -с.Драганово /III-5071/ 36
4.1. Цел на експеримента 36
4.2. Описание на обекта 37
4.3. Метод и реализация на измерванията 37
4.3.1. Метод на заснемането 37
4.3.2. Реализация на измерванията 38
4.3. Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки 38
4.3.1. Обработка на траектория 38
4.3.2. Обработка на облака от точки 39
4.3.3. Анализ на информацията, която съдържа облакът от точки 39
4.4. Заключение 41
ОБЩИ ЗАКЛЮЧЕНИЯ 42
ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ 44
ПУБЛИКАЦИИ 45
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА 46

Увод

Пътната инфраструктура представлява една от най-важните и стратегически системи за устойчивото социално-икономическо развитие на всяка страна. Тя осигурява мобилност, която свързва отделни региони и подкрепя ключови отрасли. Поддържането на функционалността, безопасността и ефективността на пътната мрежа изисква не само редовен техническа мониторинг, но и внедряване на иновативни технологии в процесите на обследване, планиране и проектиране.

В този контекст, геодезията заема централно място, като осигурява прецизна пространствена информация. Развитието на технологии през последните десетилетия води до значителна трансформация в начина, по който се набавят, обработват и анализират данните. Сред тези технологии, мобилното лазерно сканиране (Mobile Terrestrial Laser Scanning – MTLS) се очертава като особено обещаващ метод, предлагащ голям обем от информация, бързина на измерванията и възможност за безопасна работа в реална транспортна среда, без прекъсване на трафика.

Настоящият дисертационен труд има за цел да изследва приложението на мобилното лазерно сканиране като съвременен метод за геодезическо заснемане при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища. Основният фокус е насочен към анализа на точността, приложимостта и ефективността на тази технология в сравнение с конвенционалните геодезически подходи. Изследването е мотивирано от нуждата за оптимизация на времевите и ресурсни фактури при измерванията, както и минимизиране на рисковите ситуации при работа в зони с повишена пътна опасност.

В рамките на изследването е извършена практическа част, включваща теренни измервания върху реални пътни участъци от републиканската и общинската пътна мрежа в България. Разработена е методологии за предварителна и финална обработка на геодезическите данни. На базата на получените резултати е направен анализ на точността, надеждността и ефективността на метода.

Актуалността на темата се обуславя от засиления интерес към използването на съвременни технологии при мониторинг и поддръжка на пътната инфраструктура. Мобилното лазерно сканиране се налага като алтернатива на трудоемките и често рискови класически методи, осигурявайки детайлен набор от данни, приложим както в етапа на предварително проучване и проектиране, така и при последващ контрол и оценка на изпълнението. Чрез обединяването на теоретичен анализ, методологичен подход и практически изследвания, настоящият труд се стреми да допринесе за разширяване на приложимите геодезически методи в пътното строителство и да предложи решения за интегрирането на мобилното лазерно сканиране в инфраструктурните процеси.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

I. Елементи на пътя

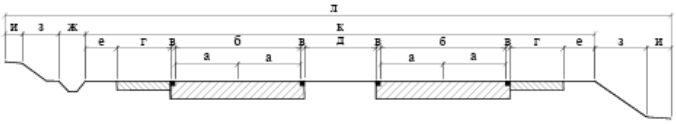
Съгласно Закона за пътищата, път се определя като ивица от земната повърхност, която е специално проектирана и изградена с цел осигуряване на безопасното и ефективно движение на превозни средства и пешеходци. За да бъде квалифицирана като път, тази ивица трябва да отговаря на определени технически изисквания, регламентирани от нормативните актове, свързани с проектирането и експлоатацията на пътища. Всеки път включва три основни елемента:

- Обхват на пътя;
- Пътни съоръжения;
- Пътни принадлежности.

Тези елементи са неразделна част от пътната инфраструктура и изпълняват ключови функции по отношение на безопасността, навигацията и експлоатационната годност на пътя.



Фигура 1. **Елементите на напречния профил на път, който не е автомагистрала (Източник: НАЦИОНАЛНА АГЕНЦИЯ „ПЪТНА ИНФРАСТРУКТУРА“)**



а - лента за движение; б - платно за движение; в - водеща ивица; г - лента за принудително спиране; д - средна разделителна ивица; е - банкет (или отделителна ивица при необходимост); ж - отводнителен окоп; з - откос; и - ограничителна ивица; к - пътно платно; л - обхват на автомагистралата

Фигура 2. **Елементите на напречния профил на автомагистрала (Източник: НАЦИОНАЛНА АГЕНЦИЯ „ПЪТНА ИНФРАСТРУКТУРА“)**

II.Пътна инфраструктура в България

Пътната мрежа на държавата е организирана, въз основа на административно-икономическите си характеристики и ролята им в транспортната система. Тези пътища се разделят на автомагистрали, скоростни пътища и пътища от първи, втори и трети клас. Местните пътища са общински и частни, те са разрешени за обществено ползване и представляват транспортните връзки от местно значение.

Пътните съоръжения са важна и неделима част от пътната инфраструктура. Те биват мостове, тунели, пешеходни пътеки, велосипедни пътища и железопътни линии и са от съществено значение за икономическото развитие, социалната свързаност и улесняването на движението на хора и стоки.

1. Основни проблеми при пътната инфраструктура в България

1.1. Състояние на настилките и пътните съоръжения по републиканската пътна мрежа

Въз основа на записаното в *„Стратегия за развитие на пътната инфраструктура в Република България 2016 - 2022 г.“*, състоянието на настилките по републиканската пътна мрежа, определено съгласно действащата "Методика за измерване и оценка на повредите по пътните настилки" е както следва:

- Добро състояние – с повреди по настилките < 10 %;
- Средно състояние – с повреди по настилките 10 % - 30 %;
- Лошо състояние – с повреди по настилките > 30 %.

Пътните съоръжения са важна и неделима част от пътната инфраструктура, като стойността на мостовите съоръжения е пъти по-висока от тази на настилките. През 2005 година е проведено обстойно проучване на състоянието им. Резултатите ясно показват, че 36% от анализираните съоръжения, част от републиканската пътна мрежа, изискват незабавни възстановителни мерки, а 15% от общия брой, са засегнати от поне един дефект, който налага незабавен ремонт в краткосрочен план.

1.2. Състояние на общинската пътна мрежа

Отговорността за състоянието на общинската пътна мрежа обикновено попада в компетенцията на общинските власти или местните управления. Въз основа на тази информацията, процентното отношение на състоянието на общинската пътна мрежа е както следва:

- Добро – 17% ;
- Средно – 21%;
- Лошо – 47%;
- Без трайни настилки – 15%.

2. Дейности по отстраняване на основните проблеми при пътната инфраструктура

2.1. Поддръжка на пътища

Поддържката на пътищата представлява комплекс от дейности, чиято главна цел е осигуряване на тяхната нормална експлоатация през цялата година. Тя включва ежедневен надзор, превантивни грижи и оперативни действия, целящи запазване на пътната инфраструктура в добро техническо състояние. Основната цел на поддържката пътищата е да се гарантират безопасността, комфортът и непрекъснатостта на движението на превозни средства при всякакви атмосферни условия.

2.2. Текущ ремонт

Текущ ремонт на пътища представлява съвкупност от дейности, насочени към отстраняване на дребни и средни повреди по пътната настилка, пътните съоръжения и прилежащата инфраструктура. Основната цел на текущия ремонт е поддържането на нормални условия за безопасно и удобно движение на превозни средства и пешеходци, както и удължаване на експлоатационния срок на пътната мрежа.

2.3. Среден ремонт

Среден ремонт на пътища представлява комплекс от дейности, насочени към периодичното възстановяване и подобряване на експлоатационното състояние на пътното платно. Основната му цел е да се възвърнат или подобрят основни

характеристики на настилката, като равност, грапавост (осигуряваща сцепление) и водонепроницаемост, което е от съществено значение за безопасността на движението и удължаване на експлоатационния срок на пътя.

2.4. Основен ремонт на пътища

Основният ремонт на пътища е комплексен процес, който включва различни видове строително-ремонтни дейности с цел подобряване на функционалността, безопасността и дълготрайността на пътната инфраструктура. Той представлява сложен и многопластов процес, който изисква координация между различни специалисти и стриктно спазване на техническите стандарти и изисквания. Основният ремонт включва дейностите реконструкцията и рехабилитацията.

2.2.1. Реконструкция на пътища

Спрямо Закон за пътищата, Чл. 58. (Изм. - ДВ, бр. 88 от 2000 г., бр. 118 от 2002 г., отм., бр. 112 от 2003 г.), реконструкция на пътища – *"представлява дейност по разширяването и модернизирането на съществуващите материални активи, която включва цялостно преустройство на пътя и пътните съоръжения при запазване на основното направление на съществуващото трасе."*

2.2.2. Рехабилитация на пътища

Спрямо Закон за пътищата, Чл. 58. (Изм. - ДВ, бр. 88 от 2000 г., бр. 118 от 2002 г., отм., бр. 112 от 2003 г.), рехабилитация на пътища – *"е дейност по възстановяването или подобряването на транспортно-експлоатационните качества на пътищата и привеждането им в съответствие с изискванията на движението."*

III.Преглед и анализ на масово прилаганите в момента геодезически технологии

1. Конвенционални геодезически измервания

1.1 Същност на метода

Конвенционалните геодезически измервания обикновено включват определяне на точките по положение, чрез ъглово-дължинни измервания, и височинно чрез геометрична или

тригонометрична нивелация. Извършват се с помощта на тотални станции и нивелири.

1.2. Сфера на приложение

Конвенционалните геодезически измервания играят съществена роля в поддръжката, основния ремонт и строителството на пътища. В различните етапи на тези дейности се използват следните видове измервания:

1.2.1. Поддръжка на пътища

1.2.2. Основен ремонт на пътища

1.2.3. Строителство на нови пътища

1.2.4. Създаване на работна геодезическа основа (РГО)

1.3. Точност

Според болшинството от проведените изследвания, точността на измерванията може да варира в интервала от 0.6-2 mm/km за дължини и 0.5-3“ за ъгли. Най-модерните и точни тотални станции осигуряват точност на измерено разстояние от порядъка на 0.6mm + 1ppm и средна квадратна грешка за измерен хоризонтален ъгъл от 0.5” [Leica, 2020].

1.4. Анализ на приложимостта

Конвенционалните геодезически измервания са неотменна част от комплекса методи, осигуряващи успешното изпълнение на всяка фаза от поддръжката, ремонта и строителството на пътища, като гарантират прецизност и надеждност на геометричните параметри на извършваните дейности. Те могат да бъдат използвани автономно, както и да бъдат комбинирани с други технологии, с цел постигане на комплексност при изпълнението на по-сложни и нестандартни задачи.

2. Глобални навигационни спътникови системи (ГНСС) измервания

2.1. ГНСС в режим RTK (Real Time Cinematic) с базова станция

2.1.1. Същност на метода

RTK (Real-Time Kinematic) е техника, прилагана при ГНСС-измерванията, за заснемане на различни елементи от инфраструктурата и топографските дадености , която използва корекции, излъчвани от оторизирани базови станции в реално време с цел достигане на необходимата точност на измерванията.

Точността на определенията, в случая, е в сантиметровия диапазон [Leick, 2017].

2.1.2. Сфера на приложение

Понастоящем, RTK намира широко приложение при заснемането на пътни участъци, като за целта са необходими преносим ГНСС приемник, базова станция и комуникационно средство.

Технологията позволява да бъдат маркирани ключови точки, като кръстовища, завои, промени в настилката по време на самото заснемане, които да бъдат „складирани“ директно в софтуера за събиране на данни.

Специализиран софтуер обработва събраните данни, генерирайки информация за съответния пътен участък. Тази информация може да включва височини, наклони и други релевантни характеристики на пътя.

2.2. ГНСС в режим RTK (Real Time Cinematic) с VRS (Virtual Reference Station)

2.2.1. Същност на метода

VRS (Virtual Reference Station) е техника, използвана при ГНСС-измерванията, която подобрява точността на позиционирането, чрез създаване на виртуална референтна станция в близост до местоположението на потребителя.

2.2.2. Сфера на приложение

ГНСС в режим VRS намира приложение в пътното строителство при топографски изследвания и проектиране, машинно управление и контрол на качеството.

2.3. Точност

При идеални условия, RTK системите могат да постигнат точност по положение от 1 до 3cm [Gao, 2022]. Във вертикално положение обикновено точността варира между 2 и 5cm.

2.4. Анализ на приложимостта

RTK технологията намира по настоящем широко приложение в сферата на пътното строителство, поради факта, че точността, постигната чрез нея, е напълно достатъчна за повечето строителни дейности. Особено предимство на тази технология е минимизирането на времевия ресурс, необходим за извършване на геодезически измервания, което допринася за оптимизацията на техническите процеси на строителната площадка.

3. Въздушна фотограметрия

3.1. Същност на метода

Въздушната фотограметрия е метод за геопространствено изследване, при който се използват въздушни изображения, заснети от дронове, самолети или хеликоптери, чрез които се набавят точни географски и пространствени данни за земната повърхност [Малджански, 2017].

3.2. Сфера на приложение

Въздушната фотограметрия има намира приложение в различни области в сферата на пътната инфраструктура:

3.2.1. Планиране и проектиране на нови пътища

3.2.2. Оценка на въздействие върху околната среда

3.2.3. Поддръжка и мониторинг на мостове и пътни възли

3.2.4. Изчисляване на геометрията на пътища

3.2.5. Събиране на данни за пътната обстановка и пътни инциденти

3.2.6. Ремонт и възстановяване след природни бедствия

3.3. Точност

Точност в планово положение (X, Y) варира между 1-5cm (със земни контролни точки) и до 10cm (без контролни точки). Точност във височина може да бъде между 3-8cm, когато се използват земни контролни точки и до 15-30cm без използването на такива.

3.4. Анализ на приложимостта

Въздушната фотограметрия се отличава с бързо заснемане на големи площи и събиране на данни за трудно достъпни места, без да се застрашава безопасността на оператора. Тя позволява редовен мониторинг на пътната инфраструктура без нужда от спиране на трафика. Недостатъците ѝ включват зависимост от метеорологичните условия и ограничена ефективност в планински райони с гъста растителност, където видимостта е затруднена.

4. Наземно лазерно сканиране

4.1. Същност на метода

Методът на наземно лазерно сканиране (TLS) е съвременна технология за бързо и прецизно събиране на пространствени

данни. Процесът на лазерно сканиране се състои в събирането на данни за разстоянието до обекта, като същевременно се измерва и скоростта на движение на лазерния лъч [Vosselman, 2010]. Съществуват два основни вида TLS: статично сканиране, при което скенерът е позициониран на определени места, и мобилно сканиране, при което данните се събират в процеса на движение, като скенерът е монтиран върху подвижна платформа.

4.2. Сфера на приложение

Сферите на приложение на TLS са разнообразни. Те обхващат геодезия, архитектура, строителство, управление на инфраструктура, мониторинг на околната среда и дори археология. TLS е полезен инструмент за мониторинг на съществуващата инфраструктура и за нейната оценка, което е особено важно при нейната поддръжка и бъдещ (планиран) основен ремонт.

4.3 Точност

Статичното лазерно сканиране предлага висока точност, обикновено в диапазона на 1-5mm по положение (хоризонталната равнина на станцията) и 2-10mm по височина (в направление, перпендикулярно на хоризонталната равнина) [Rysbekov, 2019]

Мобилното лазерно сканиране (MTLS) предлага точности, вариращи от 1 до 10 cm както по положение, така и по височина, в зависимост от условията на работа и типа на използваното оборудване. В допълнение, новите технологии в мобилното лазерно сканиране позволяват интегриране на инерциални навигационни системи, което допълнително подобрява точността на измерванията и позволява заснемане на участъци, без достъп на ГНСС-сигнал [Марков, 2024].

4.4. Анализ на приложимостта

Методът на наземното лазерно сканиране, в двете си разновидности, предлага значителни предимства в точността и детайлността при събирането на пространствени данни, което го прави потенциално ценен инструмент в строителството и поддръжката на пътища [Plesnik, 2023].

5. Общо заключение

Наземното лазерно сканиране (TLS), както статичен, така и мобилен вариант, е особено подходящо за поддръжка, ремонт и строителство на пътища. То осигурява висока точност и гъстота на данните, което ускорява планирането и изпълнението на проектите. Технологията позволява интеграция с други източници на данни, създавайки детайлни 3D модели на пътната инфраструктура.

TLS е гъвкав и адаптивен метод, който позволява измервания в труднодостъпни райони, без да застрашава безопасността на операторите. За разлика от традиционните методи, мобилното сканиране не изисква спиране на трафика, което го прави особено ефективно в натоварени пътни участъци. То оптимизира разходите, минимизира рисковете и осигурява надеждни резултати в реално време.

IV.Класификация на наземните лазерни сканиращи системи

1. Видове наземни лазерни скенери



Фигура 3. Класификация на лазерни сканиращи системи

1.1 Според принципа на измерване

В зависимост от възприетия метод на измерване, използван в TLS, могат да бъдат категоризирани в няколко основни типа:

- **Импулсни сканиращи системи** – Базирани за на така наречения „импулсен метод“ за измерване с електромагнитни вълни;
- **Фазови сканиращи системи** – Базирани на така наречения “фазов метод” за измерване с електро-магнитни вълни. Този метод е един от основните за измерване, използвани в наземните лазерни скенери (TLS);
- **Тригонометрични лазерни системи** – Основани са на така наречения „тригонометричен метод“, който позволява точно измерване на разстояния и генериране на 3D модели на обекти и повърхности.

1.2. Според ъгъла на обхват

В зависимост от ъгъла си на обхват, сканиращите системи биват:

- **С ограничен обхват** – Обикновено тези скенери имат ъгли на измерване от 10° до 30°, което ги прави подходящи за приложения изискващи висока детайлност на близки разстояния, изискван характерно при сканиране на малки обекти.
- **С тесен ъгъл на обхват** – Ъглите на измерване варират от 30° до 90°. Тези устройства предлагат по-висока плътност на точките и детайлност, което ги прави подходящи за приложение при строителни и архитектурни обекти;
- **С широк ъгъл на обхвата** – Тези сканиращи системи предлагат ъгли на измерване от 180° до 360°. Устройствата са проектирани да покриват големи площи, което ги прави подходящи за приложения, където е необходимо бързо сканиране на обширни територии, без особени претенции относно степента на детайлност.
- **Панорамните лазерни скенери** – Тези устройства предлагат 360° „видимост“ и са проектирани да събират данни във всички посоки, което ги прави особено удобни

в ситуации, в който е необходимо да се получи пълно покритие на изследвания обект във всички направления.

- **Многолъчевите скенери** – При тях е предвидена гъвкавост при регулиране на ъгъла на обхвата, което ги прави подходящи за различни приложения, това, от своя страна, позволява по-добро качество на данните, според спецификата на конкретния обект.

1.3. Според отдалечеността на действие

Видовете TLS могат да бъдат категоризирани, въз основа на заложени в техните конструкции максимални разстояния на измерване, което влияе върху тяхната приложимост за различни задачи.

- **Скенери с къс обхват** – Тези скенери обикновено имат действие от няколко метра до около 100 метра. Те са подходящи за измервания в ограничени пространства като вътрешни помещения, архитектурни детайли и други малки обекти;
- **Скенери със среден обхват** – Приложението им варира от 100 метра до около 500 метра. Подходящи са за градско моделиране и прецизно измерване на инфраструктурата;
- **Скенери с дълъг обхват** – Способни са да измерват (заснемат) на разстояния до километър. Подходящи са за мащабни проучвания, като топографско картографиране и мониторинг на големи инфраструктурни обекти;
- **Скенери с изключително дълъг обхват** – Притежават разширен обхват на приложение, отвъд типичните възможности за лазерно сканиране на дълги разстояния, надхвърляйки дистанция от 5km.

1.4. Според мобилността

В зависимост от техническите им характеристики и конструкция, можем да различим следните типове наземни лазерни скенери, според мобилността им:

1.4.1. Статични наземни лазерни скенери

Статичните лазерни скенери се характеризират с висока точност и капацитет за заснемане на големи обекти. Те се

разполагат подходящо избрани наземни станции (позиции), монтирани на триноги или други основи (като например стълбове, с устройство за принудително центриране, стативи и др.).

1.4.2. Мобилни наземни лазерни скенери

Мобилните лазерни скенери предлагат значителна гъвкавост при работа. Те могат да се използват за сканиране на големи и труднодостъпни обекти (или участъци от тях), като например пътища, крайпътни обекти и скални образувания, железопътни линии, територии с разнообразен релеф. Тези устройства обикновено се монтират върху превозни средства (например автомобили с висока проходимост) и могат да събират данни в движение.

2. Мобилно лазерно сканиране

2.1. Опорна геодезическа мрежа (ОГМ)

2.1.1. Създаването на опорна геодезическа мрежа (ОГМ)

Основните стъпки при изграждането на ОГМ са следните:

1. Определяне на целите на проекта;
2. Планиране на геодезическата мрежа;
3. Избор на инструменти и технологии;
4. Полагане и стабилизиране на опорните точки;
5. Обработка на данни и създаване на мрежата.

2.1.2. Функции на ОГМ

Опорната геодезическа мрежа (ОГМ) играе различни роли и изпълнява различни функции в зависимост от етапа на геодезическите измервания (мобилно лазерно сканирате) и спецификата на проекта. Нейната роля е многостранна и се адаптира към нуждите на всяка фаза на работа.

2.2. Реализация на измерванията

- **Избор на ГНСС базова точка**

Разполагането на базовата станция трябва да се планира съобразно размера на изследвания обект. При по-малки обекти (до 10km), една добре позиционирана базова станция (приблизително в центъра на изследвания обект) е достатъчна.

При обекти между 10 и 15km може да е необходимо да се използват две базови станции или да се премества базовата станция по време на сканирането.

При големи обекти над 15km е задължително да се използват няколко базови станции, разпределени стратегически около изследвания обект.

- **Избор и поставяне на контролни марки**

Контролните марки са основен елемент в процеса на привързване и георефериране на облаците от точки, акумулирани чрез мобилното лазерно сканиране [Господинов, 2024]. Те осигуряват точни и надеждни референтни точки, необходими за определяне на положението, височините и ориентация на сканираните данни. Разположени стратегически около обекта, контролните марки гарантират прецизност при интеграцията на данните, което е от важно значение за качеството и точността на крайния резултат при анализа и визуализацията на обекта.

Съществуват различни типове контролни марки, които се използват в зависимост от условията на сканиране и изискванията на проекта [Постоловски, 2021]. Общото между тях е, че обикновено са черно-бели за контраст:

- Картонени марки
- Марки от боя/спрей
- Метални марки
- Специализирани марки



а. Марка на хартиена основа б. Марка, регистрирана с боя/спрей в. Марка върху метална основа

г. Специални видове марки

Фигура 4. Видове контролни марки

- **Ситуиране на контролните марки**

Марките трябва да бъдат изработени и поставени така, че да бъдат ясно видими от различни ъгли и позиции на скенера. Това гарантира, че те ще бъдат правилно „засечени“ по време на сканирането.

Обикновено се препоръчва на няколко места да бъдат поставяни (отбелязани), по четири броя марки в близост една до друга, с цел да се осигури надеждност, идентифициране на грешки и осигуряване на необходимата точност.

5.2.3. Измерването на контролните марки

Измерването на контролните марки, за нуждите на мобилното лазерно сканиране (георефериране на модела), може да се извърши с различни видове геодезически апаратури и техники, в зависимост от необходимата точност и условията на терена. Най-често са използвани ГНСС измервания, ъглово-дължини измервания и геометрична нивалация. В зависимост от поставената задача може да се избере един от методите или комбимация между тях.

4. Източници на грешки при наземното лазерно сканиране

4.1. Инструментални

Инструменталните грешки са едни от основните източници на неточност при наземното лазерно сканиране. Те са свързани с конструкцията, калибровката и работата на лазерния скенер [Lichti, 2005]. Инструменталните грешки биват:

- Грешки в конфигурацията на измерването;
- Грешки при избор на подходящите параметри на скенера;
- Грешки при синхронизация на данните;
- Механични грешки;
- Грешки в електронните компоненти.

4.2. Геометрични грешки от сканирането

Геометричните грешки при TLS възникват от различни фактори, които значително влияят върху точността и надеждността на генерираните облаци от точки [Soudarissanane, 2011]. Отличават се грешки при позициониране на скенера и грешки породени от разстоянието.

4.3. Атмосферни условия

Лазерният лъч, използван за измервания, преминава през атмосферата, преди да достигне обекта и да се върне към скенера. По време на това преминаване атмосферните условия могат да причинят различни ефекти, които водят до грешки в измерванията:

- Вибрации и нестабилност на основата;
- Пречупване на светлината;
- Разсейване на лазерния лъч;
- Влияние на температурата.

4.4. Грешки, породени от специфичните особености на обекта

Специфичните особености на измерваните обекти могат значително да повлияят на точността на получените данни. Тези особености включват физическите характеристики на обекта, структура на материалите, неговата форма, както и динамичните му свойства [Reshetyuk, 2009], например сложната геометрия, свойствата и материалите на обекта, неговата динамичност, както и повърхността на текстурата му.

4.5. Добри практики за минимизиране на грешките при наземното лазерно сканиране

Анализът на изследвания обект е от първоначално и съществено значение за успешната реализация на измерването. Предварителното проучване на различните характеристики на обекта позволява на оператора да избере оптимални параметри за сканиране.

За да се минимизира влиянието на грешките породени от атмосферните влияния, е препоръчително да се извършват сканирания в оптимални метеорологични условия и да се използват алгоритми за корекция на данните, които могат да компенсират атмосферните влияния

Редовното калибриране на лазерните скенери и прилагането на автоматизирани методи за откриване и корекция на грешки, в данните, могат значително да подобрят точността на измерванията и намаляването на инструменталните грешки.

4.6. Формула за определяне на общата грешка

Общата грешка при определяне на положението на конкретна точка от обекта при наземното лазерно сканиране може да бъде

представена чрез формула, която обединява различните фактори, влияещи на точността на измерванията.

$$m_p = \sqrt{{m_c}^2 + {m_g}^2 + {m_a}^2 + {m_s}^2} \quad (1)$$

Където:

- m_c е грешката произтичаща от механичните (конструктивните) характеристики на скенера и неговата настройка;
- m_g е геометричната грешка, свързана с позиционирането на скенера и ъглите на сканиране;
- m_a е атмосферната грешка, която включва влиянието на условията на околната среда;
- m_s е специфичната грешка, произтичаща от особеностите на обекта, който се сканира.

5. Сфера на приложение

5.1. Приложение при заснемане на пътен участък с цел рехабилитация

Мобилното наземно лазерно сканиране (MTLS) се утвърждава като приложима технология за пътни изследвания, благодарение на своята прецизност и възможност за заснемане на голям обем от територия за малък период от време.

При заснемането на пътни участъци данните, получени от MTLS, се намират приложение в различни аспекти на рехабилитацията, като:

- **Оценка на състоянието на настилката –** идентифициране на пукнатини, коловози, дупки и деформации;
- **Анализ на геометрията на пътя –** създаване на повърхнина на заснетия участък, на базата на която се изготвят напречни и надлъжни профили;
- **Управление на пътната инфраструктура** – заснемане на пътни знаци, ОСП и отводнителни системи;
- **Инспекции на мостове и тунели** – оценка на конструкции за изправност и потенциални рискове;
- **Мониторинг на деформации** – периодични заснемания с цел сравняване на данни за откриване на слягания или износване.

5.2. Приложение при проверка и поддръжка на инженерни съоръжения

Технологията „Наземно лазерно сканиране“ (TLS) представлява модерен метод за получаване и анализ на триизмерна информация, свързана с деформационни процеси в инженерни съоръжения, особено мостове. Данните от TLS осигуряват основа за навременно обслужване и превантивна поддръжка.

Интегрирането на TLS в проектирането, строителството и анализа на обекти с национално значение улеснява бързото идентифициране на рискове, вземането на инженерни мерки и удължаването на експлоатационния живот на съоръженията, което е важно за обществената безопасност [Петрова, 2021].

На фона на нарастващата сложност на инфраструктурни обекти като язовири, мостове и тунели, анализът на деформации е от решаващо значение за предотвратяване на инциденти.

5.3. Приложение при тунелно строителство

Мобилното лазерно сканиране намира приложение при тунелното строителство, като специфично при заснемането е че GNSS-апаратурата е неефективна във вътрешността на самия тунел [Постоловски, 2021] . Поради тази причина се монтира инерциална система, която съдържа жироскопи и одометър DMI.

За постигане на необходимата точност на измерванията, предварително трябва да се поставят контролни марки, обикновено по стените на тунела или около тротоарите. За тяхното координиране се използва предварително създадена работна геодезическа основа (РГО) [Щерева, 2021].

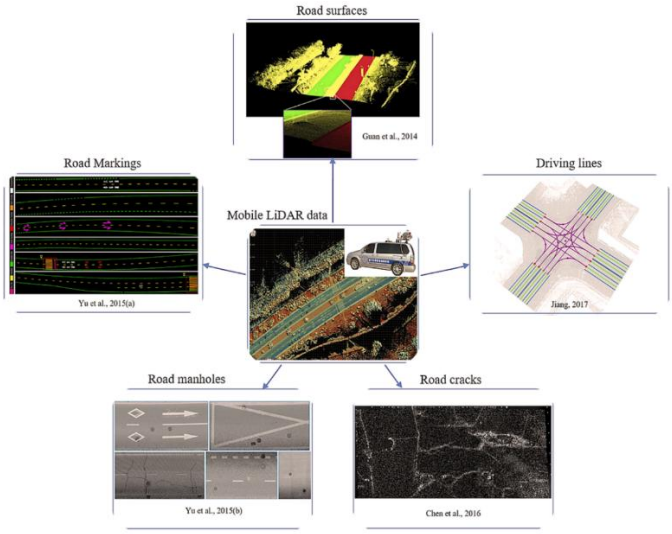
Сканирането е препоръчително да се извърши два пъти, чрез поставяне на скенера в хоризонтално положение, за получаване на подробно заснемане на пътното платно и тротоарите и два пъти, чрез поставяне във вертикално положение, за набавяне на информация за вътрешността на тунела.

5.4. Оценка на безопасността на пътната инфраструктура

Мобилното лазерно сканиране (MLS) е изключително полезно за цялостна геометрична и визуална оценка на пътната инфраструктура. Събраните данни позволяват анализ на пътните условия и идентифициране на рискове като ограничена

видимост, неравности и липса на сигнализация, които могат да доведат до инциденти:

- Автоматично разпознаване на пътни обекти и маркировка чрез облаци от точки позволява бързо установяване на проблеми, свързани с пътната безопасност [Ma, 2018];
- Анализ на геометрията на пътя, важен за сигурността на пешеходците – например при лоша видимост в завои, която пречи на шофьорите да ги забележат навреме;
- Откриване и класифициране на неравности, дупки и деформации, които крият риск за водачите. Това подпомага приоритизацията на ремонти и намалява риска от инциденти [Horst, 2019];
- Прецизно локализиране на растителност, която ограничава видимостта или закрива пътната сигнализация;
- Моделиране на зони с риск от наводнения, което улеснява планирането на дренажни системи и предотвратява инциденти, свързани с аквапланинг.



Фигура 5. Данни, получени от MLS, служещи за анализ и оценка на пътната безопасност [Ma, 2018]

5.5. Приложение при настъпило пътнотранспортно произшествие (ПТП)

Мобилното (MLS) и статичното наземно лазерно сканиране (TLS) предлагат нови възможности за бързо и прецизно документиране на пътнотранспортни произшествия (ПТП), като осигуряват надеждни физически доказателства за разследващите органи.

Когато се прави избор коя от технологиите да бъде приложена, трябва да се обърне внимание на следното:

- **TLS** е по-точен при малки зони и сложни детайли, но изисква повече време за сканиране на големи площи;
- **MLS** е по-бърз при покриване на големи участъци, макар и с по-ниска точност в детайли.

3D лазерното сканиране предоставя детайлни модели на местопроизшествието, които подпомагат реконструкцията на инцидента, определянето на причините и идентифицирането на отговорните лица [Mohammed, 2023; Baier, 2020; Yunus, 2022]. То документира следи от гуми, повреди по превозни средства и щети на околната среда, като същевременно позволява бързо възстановяване на трафика без загуба на информация.

Основни приложения на лазерното сканиране при ПТП:

- 3D реконструкция на местопроизшествието – полезна при разследвания, съдебни процеси и обучения [Maneli, 2022];
- Архивиране на данни за бъдещи анализи или преразглеждане;
- Визуализация на събитията за съдебни и институционални нужди;
- Автоматичен анализ чрез AI за откриване на разстояния, деформации и точки на удара [Gao, 2019].

MLS и TLS значително подобряват събирането и анализа на данни при ПТП, като предлагат иновативни решения за повишаване на ефективността на пътната полиция и намаляване на пътните инциденти.

ПРАКТИЧЕСКА ЧАСТ

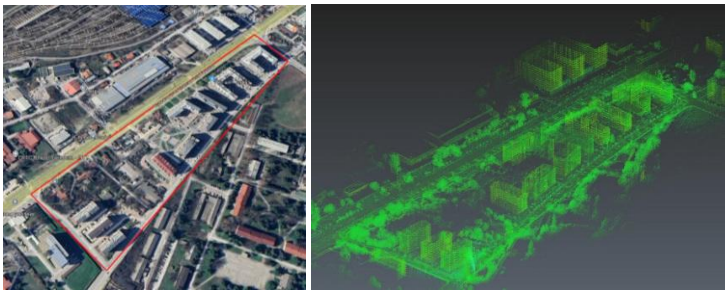
1. Заснемане на част от урбанизирана територия

1.1. Цел на експеримента

Основната цел, в случая, е да се направи сравнение между получените резултати чрез конвенционални геодезически методи (в случая заснемане с тотална станция) и чрез лазерно сканиране, като след подробен анализ, да се определи точността на сканиращата техника.

1.2. Описание на обекта

Булевард „Трета македонска бригада“ е пътна артерия в квартал Аеродром на град Скопие, Северна Македония.



Фигура 6. Заснет участък

1.3. Реализация на измерванията

1.3.1. Измерване с тотална станция

Реализирани са ъглово-дължинни измервания към 193 подробни точки и 29 броя марки (необходими за последващо георефериране на облаците от точки след лазерното сканиране), като за изходни са използвани точки с известни координати, ситуирани в района на обекта. Използвана е тотална станция Leica TS30, гарантираща точност на измерена посока 0.5“, а на измерено разстояние – 1mm+1ppm. Резултатите от измерванията са обработени чрез програмен продукт *„Leica Captivate“*, в резултат на което са получени координатите и височините на точките

1.3.2. Измерване с лазерен скенер

За целите на измерванията е използван мобилен комплекс, включващ хибриден лазерен скенер RIEGL VZ-2000, монтиран върху автомобил с висока проходимост, съвместно с двойка GPS приемници, високорезолюционна камера "Canon" и 3D инерциална система.

Скенерът може да бъде използван в две положения – вертикално (за заснемане на пътното платно и околните обекти) и хоризонтално (за по-детайлно заснемане на елементи като банкет, канавки, маркировка и др.).

С оглед на спецификата на задачата е решено да се извършат измервания и в двете положения, като резултатите ще бъдат сравнени с тези от ъглово-дължинни измервания към идентични точки.

а) Извършване на измерването

Паралелно с идентифициране на допълнителните устройства (GPS, инерциални сензори, индикатор за измерване на разстояния (DMI) и цветни камери) са извършени измервания с GNSS-приемник, функциониращ в статичен режим като базова станция. Данните, събрани от базовия GNSS-приемник, са предназначени за допълнително прецизиране на траекторията, която се получава от сканирането, като се гарантира една независима и същевременно надеждна информация за корекция на позиционирането.

Местоположението на базовата станция се подбира стратегически, с оглед минимизиране на потенциалните смущения и загуби на сигнал.

Избраният участък е сканиран двукратно в две направления, при вертикална позиция на сканиращото устройство, а след това и при хоризонтална позиция. От натрупания опит е установено, че така се гарантира максимално покритие на обекта и минимизиране на зони, заснети с ниска резолюция или такива, за които липсват данни („мъртви зони“).

б) Резултати от измерванията

В резултат от сканирането, са получени траекторията на измерването и облак от точки.

Чрез тези два елемента е формирана основата за последващата обработка и анализ на данните, като предпоставка за едно

детайлно представяне на изследвания обект и възможност за последващи точни измервания върху получения 3D-модел.

1.3.3. Обработка на резултатите от сканирането

а) Обработка на измерената траектория

След получаването на първоначалната траектория, в хоризонтална и вертикална позиция на лазерния скенер, тя е обработена чрез специализиран софтуер за последваща обработка. Така, получената в реално време, траектория е георефериранa, спрямо избраната базова точка (точката, в която е работил ГНСС-приемника).

Като крайни резултати, от обработката на траекторията, са получени следните стойности за точността на позиционирането:

- При хоризонтално положение на скенера:
  - RMSE (Root Mean Square Error / Средна квадратна грешка) по положение: 1-4cm
  - RMSE във височина: 2-5cm
- При вертикално положение на скенера:
  - RMSE (Root Mean Square Error / Средна квадратна грешка) по положение: 1-3cm
  - RMSE във височина: 2-5cm

На базата на предварителни проучвания и анализ на литературни източници, може да се каже, че получените резултати са с очаквани стойности, което, от своя страна, означава, че обработката на траекторията е извършена успешно.

б) Обработка на облака от точки

Това е последният етап от същинската обработка на резултатите от сканирането, като е осъществено обединение на изравнената траектория с облака от точки, както и тяхното георефериране по марките, които са предварително поставени и позиционирани.

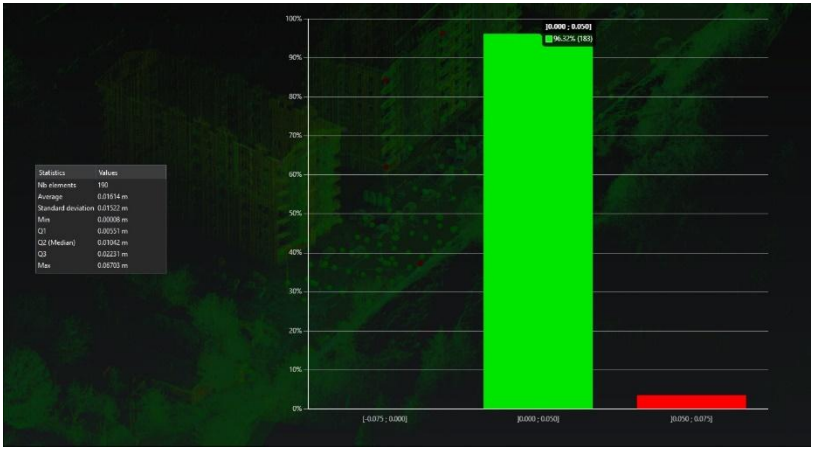
При георефернирането на облака от точки, получен от заснемането във вертикално положение на сканиращото устройство, са използвани 11 (единадесет) контролни марки. Посредством подходящ софтуер са изчислени средните квадратни грешки за всяка от тях, като от получените резултати става ясно, че в планово положение тези грешки варират между 0,009m и 0,049m, а във височинно отношение се наблюдават стойности от 0,001m до 0,009m.

По подобен начин е извършено георефериране на облака от точки, получен от сканирането при хоризонтално положение на скенера, като са използвани 17 (седемнадесет) контролни марки. В планово положение стойностите на средните квадратни грешки варират между 0,004m и 0,023m, а във височинно отношение са регистрирани стойности от 0,001m до 0,018m.

1.4. Анализ на крайните резултати от изследването

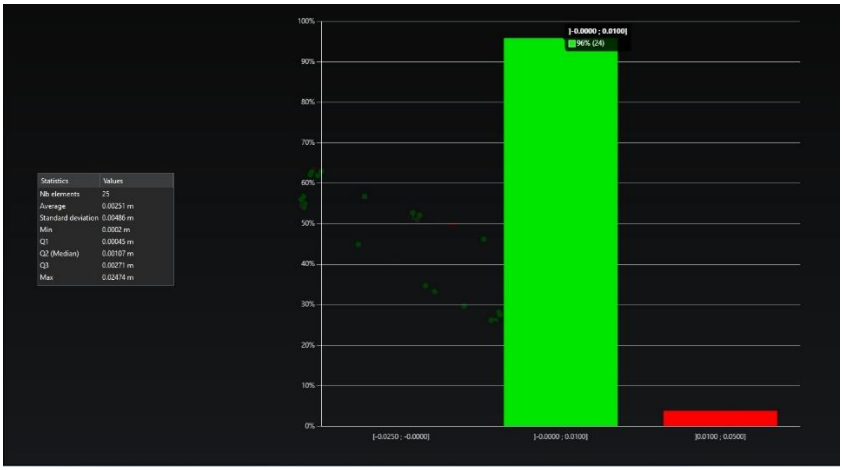
С цел установяване приложимостта на метода е направено сравнение на данните, получени от лазерното сканиране и тези, получени в резултат от измерванията с тотална станция.

- **При вертикално положение на сканиращото устройство –** направено е сравнение на 190 броя идентични точки. Резултатите показват, че получените разлики варират между 0.00008m и 0.06703m. За по-голяма нагледност е съставена диаграма, представена на *Фигура 7*. От нея се вижда, че 96.32% (183 броя точки) от поучените стойности попадат в интервала 0.000-0.050m.



Фигура 7. Диаграма на получените резултати от сравнението между данни от тотална станция и лазерно сканиране (вертикално положение)

- **При хоризонтално положение на сканиращото устройство** – направено е сравнение на 25 броя идентични точки. Получените резултати показват, че 96% от разликите попадат в интервал 0.000-0.010m (*Фигура 8*).



Фигура 8. Диаграма на получените резултати от сравнението между данни от тотална станция и лазерно сканиране (хоризонтално положение)

1.5. Заключение

Получените резултати от направеното изследване показват, че точността на данните, получени от лазерно сканиране, при вертикално и хоризонтално положение на устройството, са съпоставими с тези, получени чрез тотална станция. Това от своя страна е предпоставка да се заключи, че от гледна точка на точност лазерното сканиране е обосновано приложим метод при заснемането на пътни участъци.

2. Заснемане на част от булевард „Никола Габровски“, гр.Велико Търново

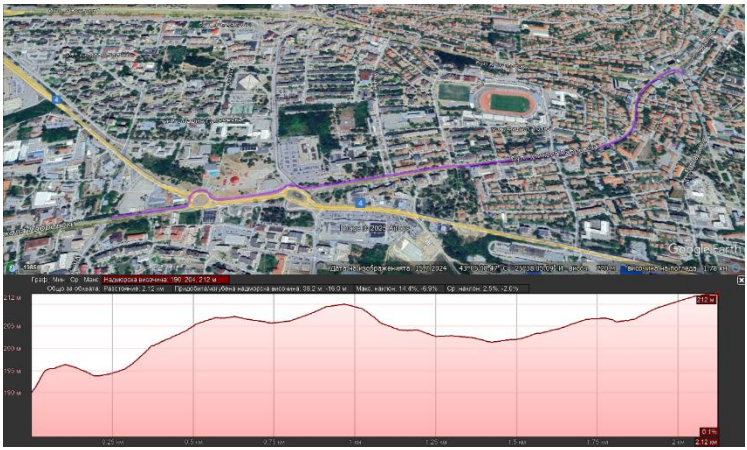
2.1. Цел на експеримента

Целта на направеното изследване е да се анализира възможно ли е приложението за мобилно лазерно сканиране за мониторинг и рехабилитация на улични участъци, елемент от урбанизираната среда.

След получаване на облак от точки да се установи открояват ли се елементите на улицата, които е необходимо да съдържа един ситуационен чертеж (съгласно съществуващата и актуална към момента нормативна база), служещ за основа за бъдещи дейности като проектиране и ремонт.

2.2. Описание на обекта

Измерваният участък е с дължина от 2 125m. Започва от Районен съд – Велико Търново и завършва до Автобусна спирка "Качица" (*Фигура 9*).



Фигура 9. Заснет участък

2.3. Реализация на измерванията

Имайки предвид разположението на трасето в централната част на града и оскъдната информация относно съществуващата

геодезическа основа, бе реализирана технологията на мобилното наземно лазерно заснемане, която не изисква ограничаване на пътния поток по булеварда.

Реализацията на избраната технология бе осъществена посредством интегриран комплект, включващ: хибридна лазерна система RIEGL VMZ, монтирана върху подвижна платформа (автомобил с висока проходимост), в комбинация с двойка GPS-приемници, дигитална камера „Canon“ с висока резолюция и 3D-инерциална система.

За допълнително прецизиране на траекторията на комплекта е използван GNSS – приемник (“STONEX S900A”), работещ в статичен режим.

За координатното и височинно привързване на облака от точки са използвани предварително означени върху асфалта марки. Предвид изискванията за точност на конкретния проект и дължината на трасето е взето решение да се разположат по 4 (четири) броя марки на три места – в началото, средата и края на пътния участък.

2.4. Изграждане на работна геодезическа основа

Във връзка и за целите на бъдещите строителни работи, около пътното трасе е изграден работен геодезически полигон, материализиран посредством 14 нови и две съществуващи точки.

Координирането на точките от полигона е осъществено чрез стандартни ъглови-дължинни измервания, като за целта е използвана високоточна, безрефлекторна тотална станция „STONEX R2W-2 PLUS“, гарантираща точност на измерена посока 2“, а на измерено разстояние – 2mm+2ppm. Реализирани са и ГНСС измервания, като са спазвани стриктно всички изискванията за създаване на РГО с помощта на ГНСС, описани в *Инструкция №РД-02-20-25 от 20.09.2011г. – за определяне на геодезически точки с помощта на глобални навигационни спътникови системи*.

Височинното определяне на полигоновите точки е осъществено чрез тригонометрична нивелация, в две направления. За целта е използвана същата тотална станция.

Поради специфичните особености на трасето, големият поток на хора и коли, трасето бе заснето с две преминавания в посока

(от спирка "Качица" до Районен съд – Велико Търново и обратно).

Позиционирането на марките, привързващи и контролни, е реализирано посредством ъглово-дължинни измервания, помощта на тотална станция.

Всички ситуационни подробности, необходими за по-нататъшната реализация на проекта, са заснети (регистрирани) посредством 611 765 779 подробни точки.

2.5. Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки

2.5.1. Обработка на траекторията

Първоначалната траектория, получена от IMU/GPS системата, е с точност, постигната с диференциални методи (DGNSS). С помощта на специализиран софтуер за последваща обработка (Post processing) RiPRECISION, желаната траектория е изчислена в реално време. Извършено е георефериране спрямо точката, избрана за базова станция на ГНСС-приемника и е направено изравнение на траекторията, чрез което е достигната сантиметрова точност (в планово и височинно отношение).

2.5.2. Обработка на облака от точки

Към предварително обработената траектория са присъединени отделните записи. Посредством данните от GNSS-измерванията, координатно ориентираните жироскопи от инерциалната система и допълнително измерените контролни марки, е осъществено изравнение на траекторията, заедно с отделните записи от Light Detection and Ranging (LIDAR) технологията.

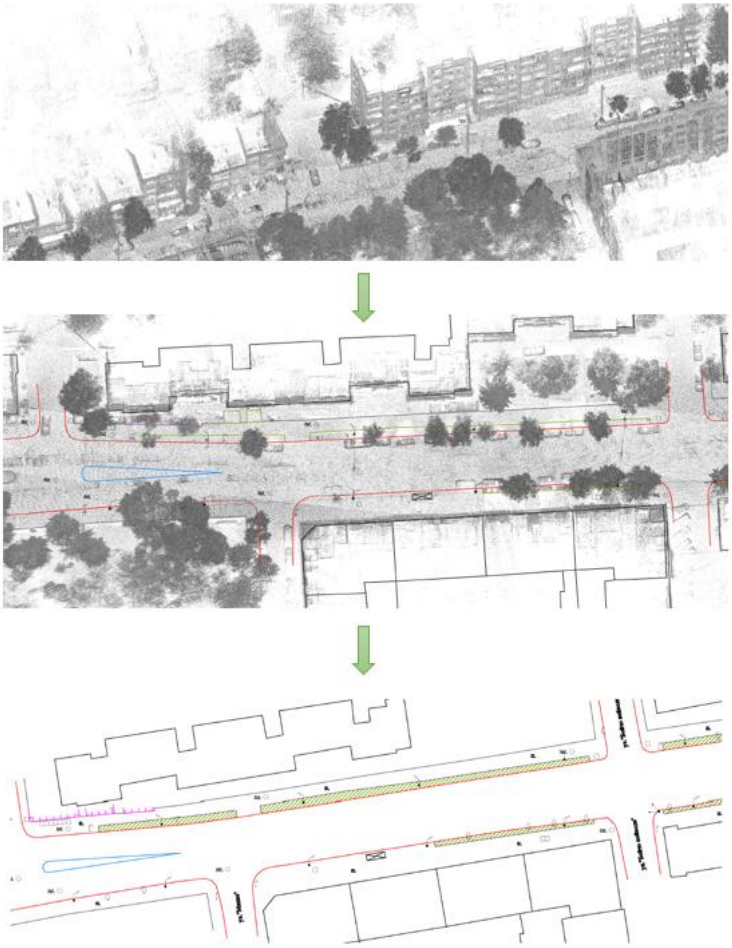
При обработка на всяка една от траекториите поотделно с всички припокриващи се записи за трасето бе достигната точност от 0,0072m, която представлява средната релативна квадратна грешка за траекторията и облаците от точки.

2.5.3. Филтрация на облака от точки

а) Използване на нефилтрирания облак от точки

Нефилтрираният облак от точки, съдържащ множество пространствено дефинирани точки, в детайли описва пътното платно и прилежащия му терен. За нуждите на направеното изследване той е използван за създаване на ситуационен чертеж,

понеже на него ясно се открояват елементите на надземната и подземната инфраструктура (*Фигура 10*), като граници на асфалтово покритие, маркировка, бордюри, пътни знаци, шахти, граници на имоти, граничещи с пътното платно, светофари, растителност и др.



Фигура 10. Изчертаване на ситуационни елементи чрез нефилтриран облак от точки

б) Приложение на филтриран облак от точки

За да бъде създадена коректна и цялостна повърхнина на пътния участък, е необходимо да се премахнат точки извън терена като: растителност, малки обекти, движещи се превозни средства, отдалечени предмети и др. За тази цел се извършва филтрация на облака, използвайки „теренен филтър“,

Според приетите нормативни уредби за мониторинг и рехабилитация на пътни участъци е необходимо да се изготвят надлъжни и напречни профили на пътната настилка и терена около нея за всички характерни участъци от трасето. За тази цел филтрираният облак от точки се генерализира в TIN повърхнина (Mesh). На базата на тази повърхнина са създадени надлъжни и напречни профили.

2.6. Заключение

Въз основа на извършеното изследване може да се констатира че мобилното лазерно сканиране (MLS) представлява бърз и надежден метод за заснемане на елементи на урбанизирана територия. Методологията на MLS позволява прецизно и бързо заснемане на геометрични характеристики на различни обекти от техническата и транспортната инфраструктура, като значително се оптимизират времето и ресурсите в сравнение с конвенционалните геодезически методи.

Получените данни позволяват изграждане на детайлен ситуационен модел и генериране на надлъжни и напречни профили, необходими за инженерно проектиране, реконструкция и рехабилитация на съществуваща инфраструктура.

Прецизността на резултатите, съчетана с възможността за бърза интеграция в ГИС среди и CAD платформи, утвърждава мобилното лазерно сканиране като приложим и съответстващ на съвременните професионални и нормативни изисквания метод в областта на приложната геодезия и пътното строителство.

3. Заснемане на републикански път III-552 „Трявна – Габрово“

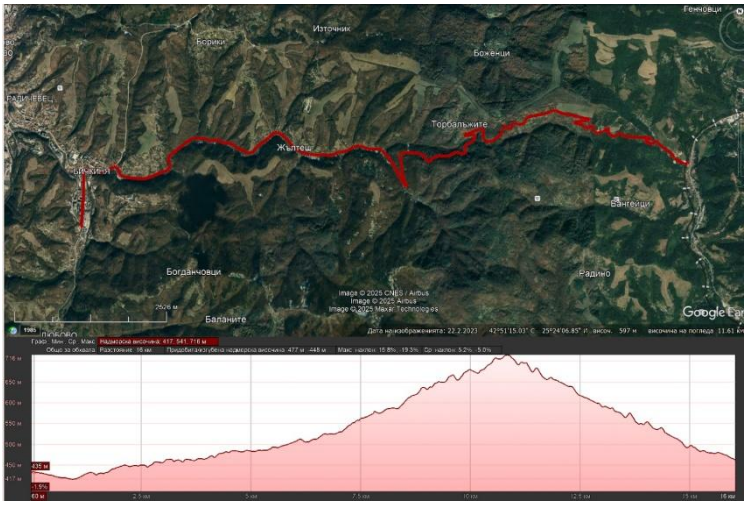
3.1. Цел на експеримента

Целта на експеримента е да се проучи и оцени ефективността и приложимостта на технологията на наземното лазерно сканиране при получаването на геопространствени данни за пътен участък, разположен в планински район. Изследването има за задача да установи дали тази технология е подходяща за заснемане и създаване на детайлни триизмерни модели на сложна пътна инфраструктура, характеризираща се с множество резки завои, серпентини с ограничена видимост, големи наклони и наличие на гъста горска растителност, която може да затрудни сигнала към GNSS-приемниците.

Чрез провеждането на този експеримент се цели не само да се оцени техническата реализация на метода в подобен терен, но и да се анализират точността, плътността на получените данни, както и влиянието на естествените препятствия (като дървета и стръмен релеф) върху качеството на крайния продукт.

3.2. Описание на обекта

Измерваният участък е републикански път III-552 е третокласен път, част от Републиканската пътна мрежа на България, преминаващ по територията на области Велико Търново и Габрово.



Фигура 11. Заснет участък

3.3. Метод и реализация на измерванията

3.3.1. Метод на заснемане

Имайки предвид комплексните характеристики на трасето, бе избрана технологията на мобилното наземно лазерно заснемане. Реализацията на избраната технология бе осъществена посредством интегриран комплекс, включващ: хибридна лазерна система, монтирана върху подвижна платформа (автомобил с висока проходимост), в комбинация с двойка GPS -приемници, дигитална камера „Canon“ с висока резолюция и 3D-инерциална система.

За допълнително прецизиране на траекторията на комплекса са използвани два базови GNSS – приемника, работещи в статичен режим. За координатното и височинното привързване на облака от точки са използвани предварително означени върху асфалта марки. За всеки километров участък от трасето са означени по 4 марки. Освен това, на подходящи места са избрани и означени допълнителни (контролни) марки.

3.3.2. Реализация на измерванията

Поради геометричните и физико-географски особености на трасето, то бе условно разделено на два, сравнително равни по дължина, участъка.

Позиционирането на марките (привързващи и контролни) е реализирано посредством GNSS-определения, в режим RTK.

Заснемането на всеки от участъците (с известно припокриване) бе извършено двукратно с двете направления, при хоризонтална позиция на сканиращото устройство. Цялото трасе е заснето еднократно и при вертикална позиция на сканиращия модул.

В подучастъците извън урбанизираната територия, където е установен слаб или липсващ GNSS-сигнал, породен от преминаването под гъста растителност, образуваща своеобразен горски тунел над пътното платно, позиционирането на траекторията бе осъществявано посредством 3D-инерциалната система. Тази система, наричана още инерциална навигационна система – INS, представлява съвкупност от акселерометри и жироскопи, които измерват линейните ускорения и ъгловите скорости по трите основни пространствени оси. Чрез интегриране на тези измервания, INS изчислява текущото положение, скоростта и ориентацията на сканиращото устройство, спрямо начално зададена референтна система.

Пътната настилка, прилежащият терен и елементите на крайпътната инфраструктура (всички ситуационни подробности, необходими за реализацията на проектирането) са заснети (регистрирани) посредством 4 418 543 689 подробни точки.

3.4.Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки

3.4.1. Обработка на траектория

Първоначалните траектории, получени от IMU/GPS системата, е с точност, достижима с диференциални методи (DGNSS). Чрез специализирания софтуер за последваща обработка (Post processing), траекториите са изчислена в реално време, а след това са георефериран спрямо съответните точки, избрани за базови станции и впоследствие са изравнени до сантиметрова точност.

3.4.2. Обработка на облака от точки

Към предварително обработената траектория са присъединени отделните записи. Посредством данните от GNSS-измерванията, координатно ориентираните жироскопи в инерциалната система и допълнително измерените контролни марки, е изравнена траекторията, заедно с отделните записи от Light Detection and Ranging технологията (LIDAR).

При обработка на всяка една от траекториите поотделно с всички припокриващи се записи за трасето бе достигната точност от 0,0154m, представлява средната релативна квадратна грешка за траекторията и облаците от точки.

3.4.3. Анализ на получените резултати

Преминато е към създаване на ситуационен чертеж на заснетото пътно трасе, като за целта е използван нефилтриран облак от точки. Участъците, които се намират в урбанизирана територия и в обсег с добър сигнал към GNSS-приемниците са изчертани по описания принцип в т.2 от практическата част от дисертационния труд.

Особено внимание е обърнато на участъците, където има наличие на сложна пътна инфраструктура и гъста горска растителност. Направен е анализ, представляващ сравнение на контролните марки, които не са участвали в изравнението, но попадат в тези участъци. Получените резултати показват, че стойностите на разликите между координатите са в интервала от 3 до 15mm, следователно, с помощта на 3D-инерциалната система е набавена подробна информация, благодарение на която могат да бъдат точно отразени всички необходими характеристики на пътната инфраструктура, включително геометрията на трасето, разположението на прилежащите обекти и релефните особености.

3.4. Заключение

Проведеното изследване потвърждава, че технологията на наземното лазерно сканиране е ефективен метод за получаване на геопространствени данни в сложни теренни условия, характерни за планински пътни участъци. Той осигурява необходимата точност, плътност и детайлност на събраната информация, като същевременно преодолява ограниченията, свързани с

традиционните методи, особено при наличие на гъста растителност, стръмен релеф и ограничена видимост.

Особено значим аспект на технологията е свързан с гарантирането на безопасността при геодезическите дейности. Чрез използването на сканираща технология се избягва необходимостта от физическо присъствие на специалисти в рискови зони с ограничена видимост, остри завои и интензивен трафик – обстоятелства, които създават предпоставки за възникване на инциденти. Това, от своя страна, значително намалява риска от инциденти и подобрява безопасността на геодезическите екипи.

В заключение, наземното лазерно сканиране се утвърждава като надеждно средство за набиране на информация относно пътната инфраструктура в труднодостъпни райони, осигурявайки не само качествени геопространствени данни, но и повишено ниво на безопасност при изпълнението на геодезически работи.

4. Заснемане на общински път KRZ1430/ I-5, Николово -Черноочене/- с.Пчеларово, с.Минзухар - с.Драганово /III-5071/

4.1. Цел на експеримента

Целта на проведения експеримент е да се оцени приложимостта на метода за заснемане – мобилно лазерно сканиране при пътен участък след завършване на дейностите по неговата рехабилитация. Основната идея е чрез използването на мобилна лазерна сканираща система да се набави детайлна и точна информация за геометрията на пътната настилка и прилежащите пътни елементи, като маркировки, бордюри, банкети и други.

След получаването на данните да се извърши обработка на резултати с цел да се провери дали всички елементи от пътната инфраструктура се визуализират ясно и във формирания 3D облак от точки. На база на тази информация да се направи съпоставка между проектната документация и реалното изпълнение на терен. Това сравнение позволява да се идентифицират евентуални отклонения от проекта, като по този начин се предоставя обективна оценка на качеството на

изпълнените строително-ремонтни дейности, след което да се премине към въвеждане в експлоатация на пътния участък.

Основната цел е да се установи дали мобилното лазерно сканиране може да се използва като надежден метод за последващ контрол и проверка в сферата на пътното строителство.

4.2. Описание на обекта

Заснет е участък от общински път KRZ1430/ I-5, Николово - Черноочене/- с.Пчеларово, с.Минзухар -с.Драганово /III-5071/, находящ се на територията на община Черноочене, област Кърджали, в Източните Родопи.



Фигура 12. Заснет участък

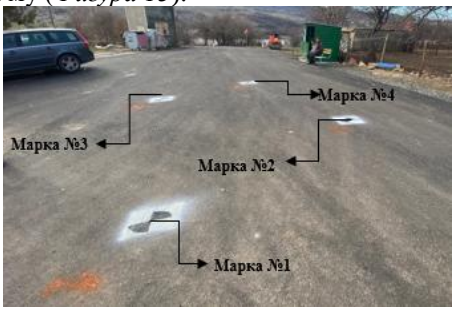
4.3. Метод и реализация на измерванията

4.3.1. Метод на заснемането

Избрана е технологията на мобилното наземно лазерно заснемане. За допълнително прецизиране на траекторията на комплекта е използван GNSS – приемни, работещ в статичен режим.

За координатното и височинно привързване на облака от точки са използвани предварително означени върху асфалта марки. Предвид характеристиките и дължината на трасето е взето

решение да се поставят по 4 (четири) броя марки в началото, средата и края му (*Фигура 13*).



Фигура 13. Привързващи марки

4.3.2. Реализация на измерванията

С цел да се избегне възникването на т.нар. "мъртви зони", в които липсва информация, както и за да се осигури необходимата пространствена резолюция на данните, трасето е заснето чрез три преминавания. Обхвата на заснемане е 10 m в ляво и дясно на пътното платно, като при характерни места обсега е по-голям.

Позиционирането на марките, привързващи и контролни, е реализирано посредством ГНСС измервания. Приложен е кинематичен метод, в реално време (RTK). Използвана е виртуална референтна станция (VRS), с данни от инфраструктурната мрежа.

Всички ситуационни подробности, необходими за по-нататъшната реализация на проекта, са заснети (регистрирани) посредством 89 603 296 подробни точки.

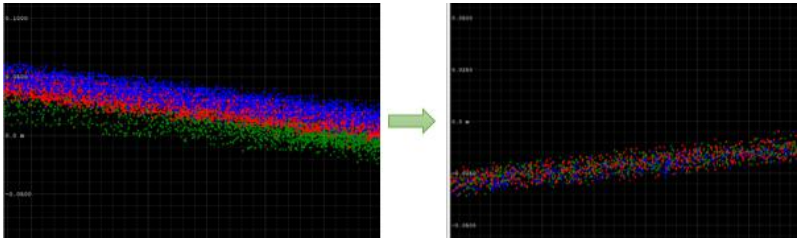
4.3. Предварителна обработка и селектиране на информацията от облаците от точки

4.3.1. Обработка на траектория

Първоначалната траектория, получена от IMU/GPS системата, е с точност, постигната с диференциални методи (DGNSS). С помощта на специализиран софтуер за последваща обработка, желаната траектория е изчислена в реално време. Извършено е георефериране спрямо точката, избрана за базова станция и е направено изравнение, чрез което е достигната сантиметрова точност, за точките от траекторията.

4.3.2. Обработка на облака от точки

Към предварително обработената траектория са присъединени отделните записи. Посредством данните от GNSS-измерванията, координатно ориентираните жироскопи в инерциалната система и допълнително измерените контролни марки, е осъществено изравнение на траекторията, заедно с отделните записи от Light Detection and Ranging (LIDAR) технологията (*Фигура 14*).



а) преди изравнение *б) след изравнение*

Фигура 14. Облак от точки преди и след обработка

При обработка на всяка една от траекториите поотделно с всички припокриващи се записи за трасето бе достигната точност от 0,0020m, представлява средната релативна квадратна грешка за траекторията и облаците от точки.

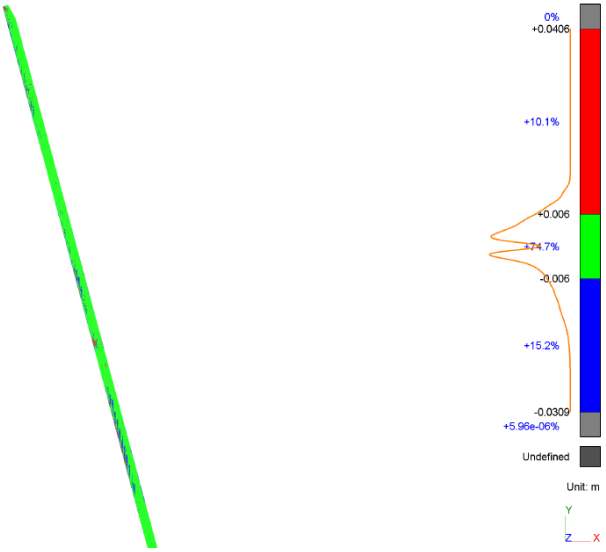
4.3.3. Анализ на информацията, която съдържа облакът от точки

Направен е анализ на получения 3D облак от точки относно визуализацията на елементите на пътя, след направената рехабилитация. От получената информация става ясно, че се разграничават елементи, като пътна маркировка, ОСП, пътни знаци и др.



Фигура 15. Визуализация на пътни елементи

Получените пространствени данни позволяват извършването на сравнителен анализ между проектираните и реално изпълнените характеристики на пътната инфраструктура. На *Фигура 16* е представена извадка от направената съпоставка на изследвания обект, от която става ясно в коя част как е изпълнено трасето и къде има по-големи отклонения от допустимите. Провеждането на подобна проверка е важен етап от процеса по въвеждане в експлоатация, тъй като установяването на отклонения от проектната документация може да застраши безопасността на движението и да увеличи риска от пътнотранспортни инциденти.



Фигура 16. Извадка от направен сравнителен анализ за изпълнението на пътен участък

4.4. Заключение

В заключение, проведеното изследване потвърждава, че мобилното лазерно сканиране представлява ефективен и надежден метод за контрол и оценка на изпълнени строително-ремонтни дейности по пътната инфраструктура. Методът позволява детайлно и прецизно заснемане на геометрията на пътната настилка и съпътстващите елементи, като по този начин се осигурява цялостна картина на съответствието между проект и реализация.

Особено важен аспект от прилагането на тази технология е нейният принос за гарантиране на пътната безопасност – чрез идентифициране на потенциални отклонения и несъответствия още преди въвеждане в експлоатация на обекта. Това дава възможност за навременно предприемане на необходимите действия и осигурява по-високо ниво на сигурност за всички участници в движението.

ОБЩИ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Проведените изследвания потвърждават приложимост и ефективност на мобилното лазерно сканиране при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища. Получените резултати от практическата част на дисертацията позволяват да се направят следните обобщени изводи:

1. Данните, получени чрез мобилно лазерно сканиране (MLS), се отличават с точност, съпоставима с тази на класическите геодезически методи. Това утвърждава технологията като надеждна и приложима при заснемания в областта на пътната инфраструктура.

2. MLS позволява бързо, детайлно и прецизно заснемане на геометричните характеристики на транспортната инфраструктура. Това води до съществено съкращаване на времето за теренни заснемания, както и до оптимизиране на човешки и технически ресурси спрямо традиционните методи на измерване.

3. Наземното лазерно сканиране доказва своята ефективност в труднодостъпни и рискови терени, като планински участъци с ограничена видимост, стръмен релеф или гъста растителност. Чрез елиминиране на необходимостта от физическо присъствие в опасни зони, технологията повишава безопасността на геодезическите екипи.

4. Мобилното лазерното сканиране е ефективен метод за проверка и последващ анализ на съответствието между проектираната и изпълнената пътна инфраструктура. Възможността за ранно откриване на отклонения и несъответствия допринася за по-надежден контрол и повишаване на пътната безопасност преди въвеждане на обектите в експлоатация.

5. Възможността за директна интеграция на получените пространствени данни в ГИС и CAD системи утвърждава лазерното сканиране като съвременен, стандартизиран и широко приложим метод в областта на приложната геодезия и пътното проектиране.

Мобилното лазерно сканиране се утвърждават като ефективен инструмент за получаване и анализиране на геопространствени данни, с широк потенциал за прилагане във всички етапи – от проектиране, през изпълнение, до поддръжка и контрол на пътната инфраструктура.

ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

1. На фона на утвърдените в практиката и прилагани, до момента, геодезически методи, е извършен анализ на приложимостта на технологията MTLS (Mobile Terrestrial Laser Scanning) при реализацията на различни етапи от проектирането, строителството и поддръжката на пътни участъци.

2. На базата на подробна, официална статистическа информация, са обособени и са формализирани основните проблеми в сферата на пътната структура на територията на Р България.

3. Направен е анализ на масова прилаганите понастоящем геодезически технологии в процеса на реализация на техническите дейности в областта на пътното строителство, като са откроени и обосновани основните предимства на MTLS-технологиите

4. Разработена е и е приложена в практиката MTLS – технологията, за целите на проектирането, строителството и поддръжката на пътища от различен клас.

5. Разработена е и е приложена технология за комбинирано използване на мобилен лазерен скенер и триосова жироскопична инерциална система за обекти с ограничен или липсващ сигнал от GNSS-системи.

ПУБЛИКАЦИИ

[1]. М. ДИМИТРОВ, М. МАРКОВ, **Б. ХАДЖИЕВА**, *Създаване на 3D модел на стена на хвостохранилище по резултати от наземно лазерно сканиране*, Национална научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, 28 октомври 2021г.;

[2]. С. ГОСПОДИНОВ, М. МАРКОВ, **Б. ХАДЖИЕВА**, *Применение лазерного сканирования для обследования объектов, имеющие отношение к безопасности дорожного движения*, Сборник научных статей – 10-й Международной научно-технической конференции, 20 юни 2024г.;

[3]. **Б. ХАДЖИЕВА**, *Применение МТЛС – технология в обслуживании и капитальном ремонте дороги*, Славянски форум – Материали на 2-й Международната научно-практическа конференция “Интелигентни и киберфизични системи: управление, логистика, сигурност”, 15 август 2024г.;

[4]. С. ГОСПОДИНОВ, А. ПОСТОЛОВСКИ, **Б. ХАДЖИЕВА**, М. МАРКОВ, *Определяне и генериране на гравиметрични аномалии в района на гр. Златоград*, XI Международна конференция по геомеханика, 16-20 септември 2024г.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

[1]. Ангелов, А., Пенев, П., /2017 г./ - Предварителна оценка на точността на тунелна инженерно-геодезическа мрежа, Годишник на УАСГ – електронно издание, бр. 50, том. 2, 2017

[2]. Господинов, С., Марков, М., Хаджиева, Б., /2024 г./ - Применение лазерного сканирования для обследования объектов, имеющие отношение к безопасности дорожного движения, Сборник научных статей 10-й Международной научно-технической конференции, Москва

[3]. Закон за пътищата /2024 г./ - изм. и доп. ДВ. бр.13 от 13 Февруари 2024г., доп. ДВ. бр.39, Май 2024

[4]. Игнатова, В., /2019 г./ - Кратък наръчник за строителство и поддържане на пътища

[5]. Институт по пътища /1985 г./ - Методика за оценка и измерване на повредите по пътните настилки

[6]. Пл. Малджански, Цифрова фотограметрия, 2017

[7]. Марков М., Приложение на наземното лазерно сканиране за структурно-геоложко картиране на скални откоси, УАСГ, София, 2024

[8]. Михайлов, Н., /2021 г./ - Строителство на автомобилни пътища, трето преработено издание, УАСГ, 2021

[9]. МРРБ и МТИТС, Стратегия за развитие на пътната инфраструктура в Република България 2016-2022, 2016, стр.18-30

[10]. НАЦИОНАЛНА АГЕНЦИЯ „ПЪТНА ИНФРАСТРУКТУРА“ /2009 г./ - „Технически правила и изисквания за поддържане на пътища“, 2009

[11]. Петрова, М., /2021 г./ - „Изследване на деформациите на инженерни съоръжения посредством технологията „Terrestrial laser scanning”**,** автореферат, УАСГ, София, 2021

[12]. Постоловски, А., Димитров, М., Марков, М., /2021 г./ - Приложение на MTLS - технология при одит на тунелното

строителство. XVI Международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, Св. Св. Константин и Елена, България

[13]. Цановски, **Ю., /2023 г./ -** ГНСС - Добри геодезически практики, УАСГ, 2023

[14]. Щерева, К., /2021 г./ - Специфични приложения при наземно лазерно сканиране, София, 2021

[15]. Baier, W., Donnelly, M., Payne, M., Williams, **M.A., /2020 y./ -** A holistic multi-scale approach to using 3d scanning technology in accident reconstruction. Journal of Forensic Sciences, 65(5), 1774-1778., 2020

[16]. Gao, P., et al., /2022 y./ - Improved position estimation algorithm of agricultural mobile robots based on multisensor fusion and autoencoder neural network. Sensors, 22(4), 1522, 2022

[17]. Horst, B., Lindenbergh, R., Puiste, **S., /2019 y./ -** Mobile laser scan data for road surface damage detection, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W13, 1141—1148, 2019

[18]. Ivanova, E., Gospodinov, S., Boyadzhieva, **D., /2023 y./ -** Monitoring of road infrastructure operation indicators using mobile laser scanning, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2023

[19]. Leick, A., Rapoport, L., Tatarnikov, **D., /2017 y./** Real-Time Kinematic Positioning: Principles and Applications, 2017

[20]. Ma, L., Liu, Y., Li, J., Wang, C., Wang, R., Chapman, **M., /2018 y./ -** Mobile laser scanned point-clouds for road object detection and extraction: a review. Remote Sensing, 10(10), 1531., 2018

[21]. Maneli, M., Isafiade, **O., /2022 y./ -** 3D Forensic Crime Scene Reconstruction Involving Immersive Technology: A Systematic Literature Review. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3199437, 2022

[22]. Mohammed, **S., /2023 y./ -** An overview of traffic accident investigation using different techniques. Automotive Experiences, 6(1), 68-79, 2023

[23]. Petr, K., Jakub, N., Michal K., Tomas, **V., /2020 y./ -** Accuracy evaluation of RIEGL VMX-450 mobile mapping system, 165-174, Conference: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020, 2020

[24]. Rysbekov, K. **/2019 y./**, Dai, H., Kalybekov, T., Sandybekov, M., Idrissov, K., Zhakypbek, Y., … & Bakhmagambetova, G. (2019). Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation. Mining of Mineral Deposits, 13(3), 40-48.

[25]. Reshetyuk, Y., /2009 y./, Terrestrial laser scanning: Error sources, self-calibration and direct georeferencing, VDM Verlag Dr. Muller ISBN: 9783639175509, 2009

[26]. Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P., /2011 y./ - Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66(4):389-399, 2011

[27]. Yunus, **R., /2022 y./ -** Traffic accident analysis model in traffic accidents that have no witness. Estudiante Law Journal, 4(2), 208-223., 2022