

СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФСКИ ФАКУЛТЕТ

SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”
FACULTY OF GEOLOGY AND GEOGRAPHY



ГЕОПРОСТРАНСТВЕН АНАЛИЗ НА ГАЗОВИ ЕМИСИИ С ПОМОЩТА НА БЛС

АВТОРЕФЕРАТ

За присъждане на образователна степен „доктор“ по научна специалност
Картография (Тематично географско картографиране – Дистанционни изследвания)

Докторант: Павел Цветков

Катедра Картография и ГИС
e-mail: pavel.tzvetkov@outlook.com

Научен ръководител: Доц. Д-р Антон Филипов

Катедра Картография и ГИС

София, 2021

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание състояло се на 01/02/2021. Съгласно заповед на Ректора на СУ публичната защита на дисертацията ще се състои на 12/05/2021 в онлайн форма и пред научно жури в състав:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в катедра „Картография и ГИС“ в ректората на СУ „Св. Климент Охридски“, град София, бул. „Цар Освободител“ № 15, Северно крило, етаж 3.

Автор: Павел Иванов Цветков

Заглавие: „ГЕОПРОСТРАНСТВЕН АНАЛИЗ НА ГАЗОВИ ЕМИСИИ С ПОМОЩТА НА БЛС“

I. ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Замърсяването на въздуха е причина за 6,4 милиона смъртни случая годишно и в световен мащаб. Фините прахови частици (ФПЧ) са един от основните замърсители, които оказват въздействие върху човешкото здраве (Harrison, 2012). Праховите частици обикновено се разделя на ултра фини, фини и груби частици (Miranda, 2012; Kumar и Goel, 2016). Ултра фините частици са тези с диаметър по-малък от 1 микрометра (μm), докато фините частици са тези под 2,5 микрометра (μm). Грубите частици се дефинират като тези по големи от 2,5 микрометра (μm). (Kulkarni, Baron, и Willeke, 2011).

Горивни процеси на електрически и промишлени инсталации, изгаряне на биомаса (Crutzen и Andreae, 1990; Crutzen, Heidt, Krasnec, Pollock и Seiler, 2016; Souza, Allen, и Cardoso, 2017г.) и транспортни такива са основният източник на замърсители на въздуха в България и по света. Емисиите на моторни превозни средства са сред основните източници на изгорели газове (като азотни оксиди) и основен източник на концентрации на ултра фини частици (EPA, 2009; HEI, 2013). Тази част от емитираните частици има потенциал да достигне алвеолите на белите дробове и оттам в други части на тялото (HEI, 2013). Тези частици могат силно да въздействат върху здравето (WHO, 2013). Поради тези причини регулаторните органи в световен мащаб се опитват да ограничат нивата на емисиите от отработени газове в различните видове транспорт. Въпреки това настоящите методологии за измерване са с ниска пространствена разделителна способност и не са представителни за състоянието на реалния свят, тъй като транспортните емисиите са различни при реалните условия, както и спрямо различните им източници.

Нестатичните измерванията често са твърде скъпи или твърде опасни (измервания чрез пилотирани летателни апарати), не са лесно приложими, като измервания в трафик или такива, компрометирани от метеорологични условия или други външни източници на емисии.

Необходимите са нови, надеждни, лесно внедрими и евтини методи за измерване на терен на емисии от транспорта. Безпилотни летателни апарати (БЛА), оборудвани със сензори за измерване на качеството на въздуха, предлагат нови подходи и възможности за изследвания в областта на замърсяването на въздуха и мониторинга на емисиите. БЛА системите могат да предоставят много по-пространствено плътна информация за разпространението на замърсители както пространствено, така и в атмосферна колона и по този начин да се осигури по-добра картина на качеството на въздуха и композицията

на замърсяването в специфични атмосферни слоеве (Corrigan, Roberts, Ramana, Kim, и Ramanathan, 2008; Dubovik, 2000; Levy, Remer, и Kaufman, 2004).

Безпилотните летателни системи имат способността да покриват големи площи и могат да наблюдават отдалечени, опасни или труднодостъпни места. По този начин се повишава оперативната гъвкавост и разделителната способност в сравнение с наземните методи (Curry, Maslanik, Holland и Pinto, 2004; Soddell, McGuffie, и Holland, 2004). Изследователите могат да избират между летателни апарати с фиксирани крила или апарати с ротационни крила, за да се персонализира система, специфична за желаното изследване. Летателните апарати с фиксирани криле обикновено могат да покриват повече площ за даден интервал от време и обикновено имат високи скорости на работа. Използване на апарати с ротационно крило или и мултиротори (четирироторни, хексакоптери), както в настоящото изследване, позволяват да се проектират летателни планове с по-висока пространствена разделителна способност, която може да бъде постигната с цената на намаления обхват на територията на наблюдение. Безпилотни летателни апарати могат да предложат висока разделителна способност, което не е осъществимо или твърде скъпо за пилотирано въздухоплавателно средство.

Изследванията, представени тук, успешно интегрират елементите, необходими за разработване на система, способна да определя количеството на емисиите от пътният поток. Нейната новост се основава на съчетаване на експертен опит от две ясно отделни дисциплини. Знанията и резултатите, придобити с това изследване, могат да бъдат оптимизирани за измервания на качеството на въздуха и да се използват за разработване на различни методологии за контрола и разпространението на емисиите. Това изследване представя метод за характеризиране на разпространението на прахови емисии от трафик и автотранспорт като цяло. Тези изследвания също така допринасят за детайлизиране на знанията за вертикалното разпределение на генерираните от трафика замърсители, за наблюдения на площи с различни характеристики в непосредствена близост до магистрали и други натоварени артерии. Създадената безпилотна летателна система прелетява значителен брой хоризонтални и вертикални полети до максимална надземна височина от 50 метра, което потвърждава нейната способност за създаване на количествени хоризонтални и вертикални профили на концентрациите на прахови частици. Тази методология показва, че концентрацията на ФПЧ се увеличава и намалява вертикално в зависимост от релефа и по-често от препятствия в близост до земята и

източника на емисиите. Като показва рязко намаляване на концентрациите над дадена височина.

Различните климатични условия, например посока и скорост на вятъра, могат да повлияят на профила на разпространение, като го повишават или понижават, а най - стабилни стойности се представят при безветрие. Това е сред основните фактори в процеса на разпръскване на замърсители и въпреки че създаването на такъв модел не е целта на изследването, придобитите знания имат потенциал за развитие в такава насока.

Резултатите са последователни във всички тестове. Тези констатации са критични за подобряване на пространствено-времевите модели за оценка на разпространението на фини прахови частици и за по-добро разбиране на въздействието на емисиите от трафика върху човека в натоварена градска среда.

II. СЪДЪРЖАНИЕ

Дисертационният труд се състои от четири глави, Увод, Теоретико-методологична основа, Изследвания и Изводи. Дисертацията завършва с Библиография, Списък на съкращения и Ключови думи, Библиографската справка съдържа 130 заглавия. Общият обем на дисертационното изследване е 187 страници.

<u>ГЛАВА 1: Увод.....</u>	<u>6</u>
1.1 Предмети, Обекти и Цели на Изследването.....	8
1.2.1 Предмет на изследването.....	8
1.2.2 Обект на изследването.....	9
1.2.3 Цели.....	9
1.2.4 Задачи на изследването.....	10
<u>ГЛАВА 2: Теоретико-методологична основа.....</u>	<u>11</u>
2.1 Преглед на литературата.....	12
2.2 Използвани методи.....	13
2.3 Информационна основа.....	13
2.4 Хардуер и софтуер.....	14
<u>ГЛАВА 3: Изследвания.....</u>	<u>15</u>
3.1 Сравнителна анализ на сензор.....	16

3.2	Хоризонтални и вертикални изследвания.....	18
3.3	Вертикално изследване.....	19
3.4	Откриване на източник на замърсяване чрез БЛС.....	21
3.5	Разпространение на прахови частици по два маршрута, пресичащи град София.....	22
<u>ГЛАВА 4: Изводи.....</u>		24
4.1	Постигнато.....	25
4.2	Принос.....	27
4.3	Потенциал и практически приложения на методиката в България.....	29
4.4	Бъдеща работа.....	30
<u>БИБЛИОГРАФИЯ.....</u>		31

III. ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. УВОД

В увода е представено обстойно въведение в темата на дисертацията, включително мотивите за фокуса върху темата. Също така са представени разсъждения и научни публикации обсъждащи предметите и обектите на изследването. Във втората част на глава първа подробно са изложени предмета на изследването, обекта, целите и задачите на дисертационния труд.

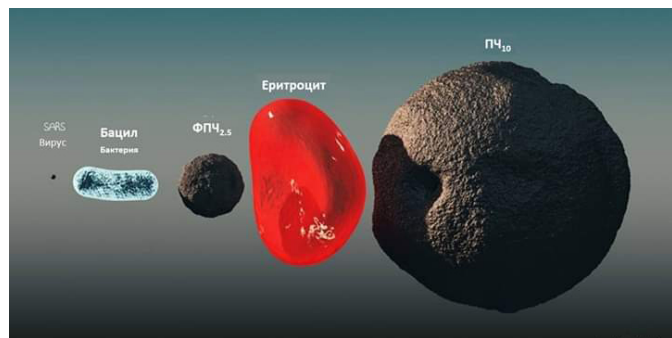
Хората, живеещи в градски зони, са почти постоянно изложени на замърсяване на въздуха в обкръжаващата ги среда. Замърсяването на въздуха е съществен фактор, имащ отношение към многобройни смъртни случаи всяка година. Замърсяването на градския въздух струва приблизително 2% от БВП в развитите страни и 5% в развиващите се страни. Според някои научни публикации емисиите от превозни средства произвеждат над 90% от замърсяването на въздуха в градовете.

Представената дисертация има следните цели: да търси нови начини за разширяване на приложенията за мониторинг на околната среда; изграждане на методология, която води до намаляване на сложността и разходите за мониторинг;

подобряване на достъпността до средствата за мониторинг и подобряване на управлението на получените данни.

Подобряването на достъпността до тези технологии ще улесни изследванията не само в областта на мониторинга на околната среда, но и на човешкото здраве и качеството на живот. В тази роля, безпилотните летателни системи (БЛС) дават нови възможности за изследвания в голям брой направления и осигуряват по-голяма прецизност в работата. БЛС разкриват значителен потенциал за изучаване на явления, които ни въздействат всеки ден. Такова ново за България приложение е представено в това изследване, даващо възможността за мобилно и прецизно измерване на замърсяването на въздуха над дадена територия. Чрез представеното изследване може да се добие картина за разпространението на частици в атмосферата, както и да се локализира техните източници. БЛС предлагат ефективна възможност за създаване на картина на дадено явление върху желана територия в реално време или близко до реалното време.

В дисертацията обстойно са представени са характеристиките на праховото замърсяване в градска среда. Праховите частици във въздуха се класифицират по размери на: фини ($<2,5\mu\text{m}$ аеродинамичен диаметър; $\text{ФПЧ}_{2,5}$) и груби ($>2,5\mu\text{m}$ $<10\mu\text{m}$ аеродинамичен диаметър; $\text{ФПЧ}_{2,5-10}$) частици. ФПЧ_{10} е сумирането на двете фракции (т.е. $\text{ФПЧ}_{10} = \text{ФПЧ}_{2,5} + \text{ФПЧ}_{2,5-10}$). Фините и груби частици освен различни размери също се различават по източници на произход, химичен състав и процеси на отстраняване. Фините частици обикновено възникват от антропогенни източници (Pore and Dockery, 2006) и могат да бъдат подложени на регулиране чрез технологии за контрол на замърсяването на въздуха. Образуването на груби частици е резултат от процесите на механично разрушаване и до голяма степен това са повторно суспендирани почви и улични прахове, емисии от промишлени източници, морски соли, прашец и гъбични спори, фрагменти от растения и животни и остатъци от износване на гуми. Тези частици са главно с естествен произход, както и произлизащи от индустрии (строителство, добив и



Фиг.1 Сравнителен размер на частици

кариери. Поради това са изключително трудни за контролиране като емисии (Pore и Dockery, 2006).

Също така във въведението са представени здравните ефекти като един от основните мотиви за фокуса върху темата. В Европа (Watkiss, 2005) се отчитат около 350 000 случая на преждевременна смърт годишно, докато в световен мащаб се регистрират повече от 1 милион смъртни случаи годишно поради излагане на прахови частици (WHO, 2009; Anenberg, 2010). Епидемиологичните проучвания на много изследователи показват силна зависимост между повишените концентрации на ПЧ10 и повишената смъртност и заболяемост (Arditsoglou и Samara, 2005; Namdeo и Bell, 2005). Pope и др. са показали връзка между замърсяването с ФПЧ и броя на смъртните случаи от рак и сърдечно-съдови и респираторни заболявания.

1.1 Предмети, Обекти и Цели на Изследването

1.1.1 Предмет на изследването

Основният предмет на изследване в тази дисертация е пространственият анализ на разпространението на фини прахови частици.

По-широко разглеждаме концепцията за разстоянието от източник, при което биха били наблюдавани различни концентрации или с други думи пространствена степен на въздействията. Радиусът, който е най-силно свързан с въпросните здравни резултати, се предполага, че е пространственият обхват на въздействието на източника.

Също така са разгледани различни несигурности при дисперсионното моделиране на разпространението на фините прахови частици влияещи върху точността на проведените измерванията.

Като такива са отчетени метеорологичните фактори. Скоростта на вятъра играе важна роля в изчисленията на параметрите на дисперсия. Вятъра определя степента, в която замърсителите първоначално се разреждат с обратната връзка между скоростта на вятъра и концентрацията, дадени в уравнението на Гаус.

В това проучване провеждаме анализ на публикуваната литература за пространствената степен на замърсяване на въздуха от мобилни източници с цел да определим кои фактори имат най-голям ефект за разпространението на замърсителите.

1.1.2 Обект на изследването

Изследването, представено в тази дисертация, се фокусира върху праховото замърсяване, произлизащо от различни категории източници в градските и крайградските райони. Като обекти на изследването са избрани места на наблюдение, които предоставят разнообразни условия и потенциални източници на фини прахови частици.

Автомобилният трафик е един от основните причинители на замърсяване на въздуха в градска среда. Също така е и сравнително постоянен в годишно времеви диапазон. Поради това голяма част от изследването е отделена за наблюдение на ефектите на автомобилния трафик върху качеството на въздуха.

Настоящата работа се стреми към количествена оценка на вертикалния и хоризонталния профил на замърсителите, генерирани от трафика в пространства, съседни на магистрали и други пътни артерии, като се използва разработена за целта безпилотна летателна система или БЛС. Такава нова за България система демонстрира високо ниво на точност, потвърждавайки нейната способност да установи количествен вертикален профил на замърсяването. Резултатите от това изследване са последователни при всички тестове, а откритията допълват знанията, необходими за подобряване на пространствените и времеви модели за оценка на замърсяването с фини частици и за по-добро разбиране на въздействието на емисиите от трафика върху човека. Спрямо критерии на изследването бяха избрани следните обекти на изследване:

- магистрала;
- натоварена градска артерия;
- вертикално наблюдение;
- натоварена улица в индустриална среда;
- обстановка и потенциал на различни източници на прахово замърсяване.

1.1.3 Цели

Целта на изследването е геопространствен анализ на газови емисии с помощта на БЛС. Това изследване допринася за придобиването на нови знания и разбиране в областта на разпределението на замърсяването в атмосферата. Също така предлага използването на нова за България технология за мониторинг на качеството на въздуха и свързаното с него излагане на хора на замърсители, генерирани от трафика. Този принос може да бъде обобщен, както следва:

1. Малък безпилотен летателен апарат (БЛА), оборудван с различни сензори е въведен за наблюдение на качеството на въздуха в близко до реалното време.
2. За първи път в България е разработена метод, базиран на система включваща БЛА, който може да измерва концентрация на замърсители директно от източниците на горене за получаване на цялостна характеристика на източниците на емисии директно от точката на произход.
3. В процеса на изследването се разработиха нови за България концепции за идентифициране на вертикалния профил на концентрация на броя на частиците в открити пространства в близост до магистрали, индустриални зони, както и пътища с различна натовареност на трафика.
4. Разработен е нов подход за оценка на коефициентите на емисии на превозните средства. Този подход идентифицира и необходимостта от нови, по-леки и по-точни сензори, които трябва да бъдат интегрирани на борда на БЛА.

1.1.4 Задачи на изследването

Задачите на изследването могат да се разделят на теоретико-методологични и практико-приложни. Първата теоретико-методологична задача е създаването на безпилотна летателна система включва изборът на БЛА както и полезният товар за целите на изследването.

Втория теоретико-методологичен компонент е разработване и утвърждаване на система за БЛА за измервания на замърсяване на въздуха. Установяването на най-добрата точка на монтаж на сензора за концентрация на частици на борда на БЛА е от решаващо значение за разработената система, способна да измерва емисиите от точковия източник.

Трети основен компонент на научните изследвания е използването на системата на БЛА в реални условия за определяне на концентрацията на прахови частици в съседство с магистрали и различни класове пътища.

Това изследване има две главни практико-приложни задачи. Първата цел е да се разработи БЛС за количествена оценка на замърсяването на въздуха в условия, при които вземането на проби с общи техники не е възможно или би дало по неточна представа. Тази система е тествана, утвърдена и използвана за количествена оценка на концентрацията на газообразни и частични замърсители, генерирани от трафик от пътища и открити пространства в атмосферната колона.

Втората и основна част от практико-приложни задачи на дисертацията включва 5 различни изследвания които ще бъдат представени в дисертацията и ще демонстрират възможностите на системата.

1. Апробиране / Сравнителен анализ на сензора спрямо 3 различни статични мрежи за качеството на въздуха.
2. Хоризонтални и вертикални изследвания
3. Използване на БЛС за наблюдение на вертикалното разпространение на праховото замърсяване.
4. Откриване на източник на замърсяване чрез БЛС
5. Анализ на профили на разпространение на прахови частици по два маршрута, пресичащи град София.

2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧНА ОСНОВА

В настоящата част на дисертационния труд е представена теоретико методологичната основа на изследванията, започвайки със преглед на наличната литература по темата. Представени са използваните методи, методи на измерване и дистанционни методи като цяло. Представен е и обзор на информационната основа, а именно растерни данни и натрупаните и използвани данни. Главата завършва с преглед на използвания хардуер и софтуер.

2.1 Прегледа на литературата

Прегледа на литературата използва три различни библиографски бази данни: Web of Knowledge, Scopus и Google Scholar. Scopus предоставя широко отразяване на тематичната област, но беше ограничен до статии, публикувани след 1995 г. Google Scholar е полезен за извличане на по-трудно достъпни източници и информация, въпреки че използването му е ограничено от неадекватна или неактуална информация за цитиране. Данните са събрани от статии в списанията, доклади от конференции, книги и друга литература, а именно технически доклади, публикувани от държавни агенции, академични институции, търговски публикации и информация, събрана от уебсайтове на производители, които обикновено не са подложени на проверка и могат да съдържат субективни данни.

Разгледани са теми като хардуер за измерване на замърсители, видове и изисквания на БЛС, както и проведени подобни изследвания към момента на дисертацията.

2.2 Използвани методи

Като използвани методи в изследването са представени множество измервателни полети и методи за прилагането на беспилотната летателна система. Сензорите за измерване представляват първият компонент от използваната БЛС. Измерването на данните се извършва посредством сензор за прахови частици AirBeam2 с възможност за измерване на частици ФПЧ₁, ФПЧ_{2.5} и ФПЧ₁₀, температура и влажност. Устройството е избрано като икономично решение с отворен код и добра функционалност. AirBeam2 използва метод за разсейване на светлината за измерване на частиците. Сензорните данни от AirBeam2 се прехвърлят в реално време на устройство с операционна система андроид чрез безжична Bluetooth връзка или Wi-Fi мрежа. Посредством безжичната интернет връзка на андроид устройството, данните се прехвърлят на интернет портал, където могат да бъдат наблюдавани. Данните могат да бъдат намерени в съответната сесия на устройството на <http://www.aircasting.org/>.

Вторият компонент на системата за осъществяването на настоящото наблюдение е беспилотна летателна система, разработена на основата на дрон Tarot FY650 IRON MAN 650 Quad-Copter.

Използването на летателната система в настоящото наблюдение включва процес, който може да бъде разделен на няколко последователни стъпки:

1. Избор на подходяща територия или такава от определен интерес във връзка с локализация на въздушно замърсяване.
2. Създаване на летателен план за територията с подходящи за нея параметри. Поради естеството на някои от изследванията би било оптимално БЛС да бъде управлявана ръчно.
3. Следваща стъпка е създаване на сесия за измерване на Андроид устройството.
4. Данните от изследването могат да бъдат визуализирани по няколко различни начина: визуализация е след приключване на полета и чрез запазен CSV (Excel) файл с гео-реферирани стойности и възможност за външна визуализация.

БЛА са оперативно по-гъвкави и видими в сравнение с наземните подходи или други въздушни методи, като пилотирани самолети и спътници. Провеждането на атмосферни измервания в отдалечени места е ситуация, при която използването на малки, леки БЛА е от особена полза (Barnhart, 2012).

Като дистанционни методи са разгледани различните аспекти на използването на БЛС, като ефикасност и качество, и БЛС като цяло в ролята на платформа за изследване на качеството на въздуха. Също така са разгледани регулаторните ограничения на органи за въздухоплаване, които уреждат кой може да има достъп до националното въздушно пространство и при какви условия с цел защита на широката общественост и други потребители на въздушното пространство, като гарантират спазването на стандартите за безопасност.

2.3 Информационна основа

Като информационна основа на изследването и поради спецификата на извършените наблюдения, е представен обзор на растерните данни. Растерните бази данни представят географски характеристики, които разделят света на дискретни квадратни или правоъгълни клетки, разположени в мрежа. Всяка клетка има стойност, която се използва за представяне на някаква характеристика на това място, като температура, кота или спектрална стойност

Има много аналитични инструменти, които могат да се използват с растерни данни, но не могат да се използват с векторни данни. Например, растери могат да се използват за моделиране на воден поток върху земната повърхност. Тази информация може да се използва за изчисляване на местата, където водните басейни и поточните мрежи съществуват на базата на терена. Също така с по-прости растерни формати човекът, на когото се дава растерното изображение, може просто да го гледа като изображение на компютъра си, без да се нуждае от специален GIS софтуер. Това е и една от основните цели на това изследване.

Основният резултат и информационната цел на това изследване е представяне на растерни данни, показващи стойностите на фините прахови частици за определени точки в пространството.

Извлечените растерни данни са представени под формата на таблици в CSV (comma separated values) формат. Различните измерени стойности са разделени времево и представени в същата таблица една под друга. Таблиците за различни стойности са представени една след друга. Табличните файлове съдържат следните четири колони:

- 1) Точното време на измерването, приблизително на една секунда;
- 2) Географската ширина на измерената точка;
- 3) Географската дължина на измерената точка;
- 4) Измерената стойност при наблюдението.

В текста на дисертацията, за улеснение данните са визуализирани посредством софтуера на Airbeam2.

2.4 Хардуер и софтуер

В следващата част на глава втора е представен използваният хардуер и възможността на въздухоплавателните средства в контекста на мониторинга на качеството на въздуха е аспект, който трябва да бъде разгледан въз основа на целта на изследването.

Безпилотните летателни апарати могат да се използват и в самостоятелни операции, включващи една платформа или по-модерни системи, използващи множество платформи. Във всеки случай наземната станция обикновено е необходима за дистанционно пилотиране и командване на мисия.

В тази графа разглеждаме изискванията за проектиране на БЛС, способна да наблюдава замърсяването на въздуха в целевите райони, както и използваните части и консумативи по време на изследването.

1. Отворен дизайн на БЛА
2. Интеграция на цялостна комуникационна система.
3. Интегриране на датчици за мониторинг на замърсяването.
4. Съхранение, обработка и показване на данни на базата на облак.

Като избор на сензор беше избран AirBeam2. Той е преносим инструмент със сравнително малки размери ($132 \times 98 \times 28$ мм), ниско тегло (140гр.) и дълго време на работа на батерията (8 часа работа). Използва се за измерване на броя на частиците с диаметри между $1\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ и $10\mu\text{m}$, с времева резолюция 1 секунда и допълнителни данни за относителна влажност и температура. Един от големите плюсове на избраното устройство е фактът, че то е с отворен код, както и с пълен и свободностъпен набор от спецификации. Фърмуерът и електронните схеми на AirBeam2 са достъпни на GitHub.

В дисертацията са представени три сравнителни изследвания на резултатите на AirBeam2 спрямо други сензори. Едно от тях е проведен по време на измерванията за този труд и два са данни от предишни измервания, които са представени в дисертацията. Техническите спецификации, експлоатация и изпълнение са;

Тегло: 140 грама

Сензор за частици: Plantower PMS7003

Сензор за относителна влажност: Honeywell HIH-5030-001

Температурен датчик: Microchip MCP9700T-E / TT

Bluetooth: Nova MDCS42, версия 2.1 + EDR

Wi-Fi: Espressif ESP8266-ESP-12S, 2.4 GHz

Мобилна връзка: SIMCOM SIM808, 2G GSM

Микроконтролер: Teensy ++

3. ИЗСЛЕДВАНИЯ

Третата част на изследването включва основната и практико-приложна задача на дисертацията. Представени са 5 различни изследвания които демонстрират възможностите на системата, а именно;

1. Апробиране / Сравнителен анализ на сензора спрямо 3 различни статични мрежи за качеството на въздуха.
2. Хоризонтални и вертикални изследвания
3. Използване на БЛС за наблюдение на вертикалното разпространение на праховото замърсяване.
4. Откриване на източник на замърсяване чрез БЛС
5. Анализ на профили на разпространение на прахови частици по два маршрута, пресичащи град София.

3.1 Апробиране / Сравнителен анализ на сензор

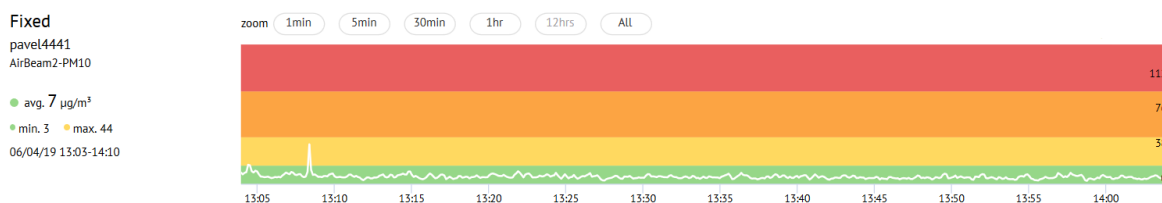
Основна част от научните изследвания, както и в много други сфери, е контролът по отношение на качеството на измерване и получените резултати. Както във всички други практически изследвания, така и тук бива използван контролен елемент.

Сравнителния анализ на сензора включва апробиране спрямо 3 различни системи за следене на качеството на въздуха на територията на град София.

1. Единственият официален източник е система за мониторинг на концентрации за фини прахови частици в страната е системата за предоставяне на обществеността на информация за качеството на атмосферния въздух (КАВ).
2. AIRTHINGS - Пилотна система от сензори за следене на атмосферния въздух. Системата се състои от 22 станции за следене на качеството на атмосферния въздух (КАВ), разположени на територията на Столична община и следи в реално време най-разпространените замърсители на въздуха (ПЧ₁₀, ПЧ_{2.5}, СО, NO₂, SO₂, O₃), температура, влажност и налягане.
3. Мрежата от сензори за качеството на въздуха AirBG. Системата разполага с над 400 станции само в град София, които мерят нивото на ФПЧ и визуализират данните в реално врем.

Целта на сравнителното измерване на терен е да се оцени работата на използваният сензор в сравнение с референтен инструмент. Това сравнително наблюдение е ключова стъпка за получаване на надеждни данни, тъй като включва реални условия на околната среда и данни за качеството на въздуха за продължителен период, обикновено няколко дни.

Събраните базови данни са в резултат от наблюдения в 3 различни дни в продължение от 1 час, за всяка от сравнителните мрежи. Резултатите показват сходно поведение при всички типове сензори включително AirBeam2. Като се отчита разликата във времевата разделителна способност между нашия сензор и сензорите на сравнителните системи по време на измерванията, можем да видим обща корелация в часовите стойности. И при всичките 3 случая средната стойност за едночасовите тестове е много подобна на стойността, предоставена от общинските сензори.



Фиг. 2 Едно-часови данни от AirBeam2 при сравнителен



Фиг. 3 Сравнителен анализ със сензор на изпълнителната агенция по околната среда

3.2 Хоризонтални и вертикални изследвания

1) Обект на изследване – Автомагистрала „Тракия“

В настоящето изследване безпилотната летателна система беше използвана за наблюдение и визуализация на праховото замърсяване, произлизащо от трафика на автомагистрала „Тракия“. Изследването бе проведено в близост до град София и точно на изхода на автомагистрала Тракия към село Лозен. Мястото на изследване беше



Фиг. 4 Разпространение на ФПЧ_{2.5} частици на 20м.

избрано заради отдалечеността си от гъсто населени градски части, ограничавайки страничните източници на замърсяване както и поради силния трафик в района. Интензивността на трафика представя сравнително постоянна картина на замърсяването, както и реалното

му разпространение в близост до населеното място. Терена на изследването е равен и открит с ниска храстова растителност в непосредствена близост до магистралата. Летателният план предвижда полети от четири надлъжни прелитания, всяко с дължина от по 200м над територията с дистанция между тях от 50м. Първото прелитане е на височина 10м, второто на 20м. Височините на полетите бяха съобразени и избрани спрямо условията, вероятното разпространение на частиците и потенциала на картината на замърсяването. Територията на изследването обхваща около 25 декара,

непосредствено на юг от автомагистрала Тракия. Специфичните времена на наблюдение са, както следва;

- Измерване №1 бе проведено на 15 ноември 2018 г. в 11:40 часа, при усилен трафик на автомагистрала „Тракия“.
- Измерване №2 бе проведено на 10 март 2019 г. в 12:00 часа.
- Измерване №3 бе проведено на 15 юни 2019 г. в 09:30 часа, при сравнително натоварен трафик.

В резултат на осъществения летателен план и измервания бяха създадени осемнадесет изображения, разделени по измерени стойности и летателна височина. Събраните данни представят разпространението на частици с различна големина в непосредствена близост до обект от значителен интерес за целите на изследването - автомагистрала Тракия. При изследването можем да заключим, че в близост до повърхността и до магистралата съществува район от няколко десетки метра на сравнително по-ниска прахова концентрация.

Полетите ясно показват хоризонталното и вертикално разпространение на частиците, причинени от трафика на юг от магистрала „Тракия

2) Обект на Изследване – Индустриален път, кв. Младост

В настоящето изследване безпилотната летателна система беше използвана за наблюдение и визуализация на праховото замърсяване, произлизащо от трафика в индустриален район и път в град София. Измерванията бяха проведени в района на улица „инж. Георги Белов“, индустриална зона Изток, София. Това е участък с натоварен автомобилен и товарен трафик. Мястото на изследване беше избрано поради обема и спецификата на трафика в района. Разнообразието и натовареността на трафика представя добра картина на ежедневният фон на прахово замърсяване в град София. Друг важен фактор в избора на тази локация беше разнообразието на терена, както и бариерите които биха имали потенциален ефект върху



Фиг. 5 Разпространение на $PM_{2.5}$ частици на височина 10м

движението на замърсителите. Налична е ниска до средно висока растителност в централната и главно източна част на терена, достигаща височина 3 метра.

Измерванията бяха проведени през три делнични дни в три различни седмици. Също така варираха в специфичните часове от деня, представяйки всеобхватна картина на праховото замърсяване. Първото прелитане е на височина 10м, второто на 20м.. Специфичните времена на наблюдение са както следва;

- Измерване №1 бе проведено на 02 юли 2019 в 10:30 часа
- Измерване №2 бе проведено на 04 юли 2019 в 16:00 часа
- Измерване №3 бе проведено на 05 юли 2019 в 13:00 часа

В следствие на полетите се доби сравнителна триизмерна основа за анализ на разпространението на частиците. В резултат на измерванията бяха създадени по шест изображения за всеки от дните на наблюдение, разделени по измерени стойности и летателна височина. При сравнение с наблюденията, проведени на различните тестови локации и главно в близост до автомагистрала „Тракия“, можем да видим ефектите на различните фактори, въздействащи на разпространението на частиците. През всеки ден на наблюдение стойностите отчетени на по- ниска височина бяха по- високи в частите на полетите, където отсъства бариера или растителност между точките на измерване и пътя. Анализирайки разпръскването на замърсителите можем да забележим ефектите на терена и бариерите върху формата на дисперсия на праховите частици. Стойностите, отчитани на височина 10 метра, имат по-малка корелация и следователно ефект върху тези отчитани на 20 метра височина.

3) Обект на изследване – Околовръстен път на София

В настоящето изследване безпилотната летателна система беше използвана за наблюдение и визуализация на праховото замърсяване, произлизащо от трафика в близост до околовръстен път на град София. Измерванията бяха проведени в района на Национален исторически музей, един от участъците от околовръстния път на София с най- натоварен автомобилен трафик.

Мястото на изследване беше избрано поради големия интензитет на трафика в района, както и високата гъстота на населението, представяща добра картина на ежедневния фон на прахово замърсяване в град София. Терена на изследването е напълно открит към шосейния трафик, без значими



Фиг. 6 Разпространение на ФПЧ2.5 частици на височина 10м

препятствия. Измерванията бяха проведени през три делнични дни в три различни седмици. Също така варираха в специфичните часове от деня, представяйки всеобхватна картина на праховото замърсяване. Специфичните времена на наблюдение са, както следва;

- Измерване №1 бе проведено на 27 май 2019 в 12:40 часа
- Измерване №2 бе проведено на 05 юни 2019 в 09:30 часа
- Измерване №3 бе проведено на 11 юни 2019 в 16:20 часа

Измерванията във всички дни на наблюдение ясно показват хоризонталното и вертикално разпространение на частиците, причинени от околновръстния път на град София. При споменатите условия можем да наблюдаваме равномерно разпространение на частиците и тяхното разреждане в дистанция, и височина спрямо източникът им.

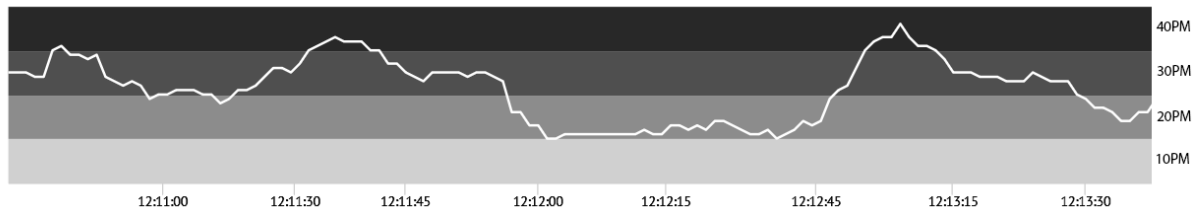
Анализирайки разпръскването на замърсителите можем да създадем хипотеза, че в специфичните условия и терен основен фактор за динамиката на разпространение е посоката на трафика на пътя, и по-специфично локалната турбуленция.

3.3 Вертикално изследване

Към момента съществуващите мрежи от сензори предлагат ниска пространствена точност, ограничено покритие и главно отсъствие на данни за вертикалното разпространение на замърсителите. В това изследване е използвана мултироторна безпилотна летателна система (БЛС) за измерването на вертикалното разпространение на фини прахови частици с размери ПЧ1, ПЧ2.5 и ПЧ10. В настоящето изследване безпилотната летателна система беше използвана за наблюдение и визуализация на вертикалното разпространение на праховото замърсяване, произлизащо от трафика в

непосредствена близост до южната дъга на околоръстен път град София и по-точно в района на резиденция Бояна.

Метеорологичните условия по време на измерването бяха благоприятни: незначителната скорост на вятъра както и ниската влажност на въздуха. Практическото безветрие предостави точна картина на замърсяванията.



Фиг. 7 Концентрации на ФПЧ2.5 във височина.

Измерванията бяха проведени на следните дати и часове от деня;

- Измерване №1 бе проведено на 05.06.2019 в 12:00 часа
- Измерване №2 бе проведено на 06.06.2019 в 09:30 часа
- Измерване №3 бе проведено на 11.06.2019 в 16:00 часа

В изследването са представени три измервателни полета, всеки до височина от 50 метра над терена, това е съпътствано с паузи на всеки 10м височина. Тези височини дават представа за функционално значимото за нас замърсяване, като резултатите отчетливо представят разлика в концентрациите.

И в трите дни на наблюдение след издигане на височина над около 30 метра има видимо намаление на праховите концентрации. Във всяко от наблюденията най-повлияни от височината са частиците с по-голяма маса, като концентрациите им са най отчетливо диференцирани. При изследването също така откриваме, че в близост до повърхността и до обекта на изследване съществува район на сравнително по-ниска прахова концентрация.

Изследването демонстрира, че използването на безпилотни летателни системи може да представи вертикални сечения на разпространението на замърсители от пътен трафик в атмосферата.

1.4 Откриване на източник на замърсяване чрез БЛС

Основният предмет на това изследване е локализация и количествена оценка на замърсителите, както и създаване на профили на разпространението на фините прахови частици. В настоящето изследване безпилотната летателна система беше използвана за

локализация и наблюдение на разпространяването прахови частици от специфична точка. За симулация на замърсител с фини прахови частици бяха използвани стандарти димки. Изследването бе проведено в извън градски условия.



Фиг.8 Концентрации на ФПЧ2.5.

Специфичните времена и

метеорологични условия при наблюденията са, както следва:

- Измерване №1 бе проведено на 09/06/2020 в 13:00 часа с метеорологични условия: температура 22°C, слънчево и незначителен южен вятър.
- Измерване №2 бе проведено на 02/07/2020 в 12:10 часа с метеорологични условия: температура 20°C, слънчево с южен вятър със средна скорост от 5м/с.
- Измерване №3 бе проведено на 02/07/2020 в 12:27 часа с метеорологични условия: температура 20°C, незначителна облачност и югоизточен вятър със средна скорост от 5м/с

Проведените полети се състояха от четири надлъжни прелитания, всяко с дължина от около 100м над територията с дистанция между тях от около 20м. Височината на полетите беше съобразена с разпространението на димния факел и следователно вероятното разпространение на частиците и потенциала за нагледна картината и локализация на замърсяването. Източника на потенциалното замърсяване (димките) се намираще в южната централна част на полетния терен, както е показано на фигура едно. Поради нуждата от прецизност, ограничено времетраене на наблюденията и корекции спрямо средата, полетите бяха извършвани в полуавтоматичен режим на пилотиране, при който безпилотният летателен апарат бива стабилизиран автоматично.

В резултат на изследването също можем да добием представа за разпространението на частиците от обекта на изследване. И във трите дни на наблюдение забелязваме ефекта на който вятъра има върху димния факел. В страни от посоките на вятъра има видимо намаление на праховите концентрации. Друг извод който може да бъде направен по отношение на източника на замърсяването е големината и произтичащо от това потенциално типа на отделяните частици. Частиците с размер под 2.5µг от друга страна показват значително по-постоянни резултати, също така и по-добра корелация със

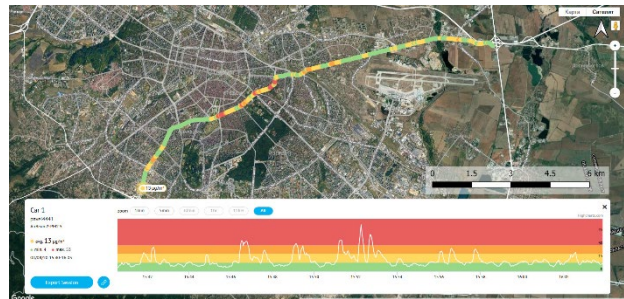
стойностите измерени за 10µг. При 10µг бяха отчетени значително и постоянно по-високи стойности спрямо по 1µг и 2.5µг. Изненадващ резултат е по отчетливият ефект на вятъра върху по големите частици, нещо което може да бъде свързано с значително по високите им концентрации и лекота на детекция.

Изследването демонстрира, че използването на безпилотни летателни системи може да представи хоризонтални сечения на разпространението на замърсители, както и да спомогне за тяхната локализация.

3.5 Разпространение на прахови частици по два маршрута, пресичащи град София

Като се имат предвид здравните ефекти от замърсяването на въздуха, свързано с трафика и близостта до главни пътища нараства интересът към различни приложения на използваните технологии за измерването на пространствени градиенти на замърсителите. Такова представено приложение е използването на сензорите за измерване на ПЧ във въздуха чрез тяхното прикачване към различни видове наземни превозни средства в градска среда. Това дава възможност за много лесно приложим метод на измерване в среди където използването на безпилотни летателни системи е ограничено от съображения за безопасност или времето им на полет.

Двете примерни трасета на измерване бяха избрани по няколко критерия. Пресичайки се сравнително перпендикулярно, както и пресичайки центъра на София, те дават картина на концентрациите на прахови частици в различни части на столицата.



Фиг. 9 Маршрут едно пресичащ гр. София

Специфичните времена и метеорологични условия при наблюденията са, както следва:

- Измерване №1 бе проведено на 08/04/2020г. в периода от 15:40 до 16:40 часа с метеорологични условия: температура 15°C, слънчево и североизточен вятър със средна скорост от 3м/с
- Измерване №2 бе проведено на 10/04/2020г. в периода от 13:40 до 14:40 часа с метеорологични условия : температура 20°C, слънчево с западен вятър със средна скорост от 3м/с.

- Измерване №3 бе проведено на 12/04/2020г. в периода от 15:46 до 16:40 часа с метеорологични условия : температура 19°C, лека облачност и югоизточен вятър със средна скорост от 3м/с.

Първото трасе на измерване пресича град София от югозапад в посока североизток, започвайки в началото на булевард България и околоръстния път на София. Следвайки булевард България към центъра на столицата достига Орлов мост, където пресича Цариградско шосе и достига булевард Мадрид. След кратка отсечка на изток, маршрута продължава по Ботевградско шосе, отново достигайки Околоръстния път на София. По протежението на маршрута са налични 12 светофара, като по значими отсечки без такива са в средната част на трасето, а именно между кръстовищата на бул. Акад. Гешов и бул. Черни връх, както и в края на маршрута по протежението на Ботевградско шосе.

Второто трасе на измерване пресича град София от югоизток в посока северозапад, започвайки от Околоръстен път и началото на Цариградско шосе в посока център пресичайки Орлов мост и продължавайки по булевардите Цар Освободител и Тодор Александров. След кратка отсечка на север продължава по булевард Сливница на северозапад до Околоръстния път в района на жилищен район Люлин. По протежението на маршрута са налични 17 светофара и основни кръстовища, като единствената част от трасето без такива където движението не е ограничено от тях е по- голямата част от Цариградско шосе.

Вземайки под внимание двете трасета на изследването можем да наблюдаваме общи тенденции за райони и точки в град София с постоянни завишения в концентрациите на прахови частици. Такива биват от една страна пресечни точки на основни булеварди с натоварен трафик по протеженията на маршрутите, а от друга специфични части на града където са нагледни продължителни участъци с равномерни и постоянни завишения. Възможни причини на това бива гъстота на трафика както и на сградите, ограничавайки проветривостта, също в случая на бул. Сливница и стопанска дейност. Според това изследване такива биват средните части на бул. България в района на Борово, периферията на идеалния център от където минават главни булеварди, ограничен район покрай моста Чавдар, както и западните части на бул. Сливница в района на Захарна фабрика и особено ж.к. Люлин. Друг резултат от изследването са наблюдаваните разлики в концентрациите на праховите частици с различна големина. При всички измервания се наблюдава по- малка корелация между кръстовища и

локалните ефекти от трафика като цяло върху леките частици ФПЧ₁. В първия ден от изследването завишенията в концентрацията им биват главно в централните части на града и ж.к. Люлин, докато в следващи измервания тази корелация е по слаба. ФПЧ_{2,5} от друга страна показват значително по- постоянни резултати, също така и по- добра корелация с обем на трафика и големина на кръстовища и други предполагаеми източници като стопански обекти в близост то трасетата на измерване. За разлика от полеките частици, чиито резултати до голяма степен си съвпадат, при ФПЧ₁₀ бяха отчетени значително и постоянно по- високи стойности. Също така при повечето измервания, завишенията не са в идеалния център на града. Тук се наблюдава и по- добра корелация с наличието на пътен трафик, кръстовища и светофари, което подсказва за по- значителното влияние на автомобилния трафик върху едрите прахови частици или в най-ограничения случай по-трудното им разпръскване от движението на въздушни маси. Потенциален ефект, свързан с вятър върху нивата на ФПЧ₁₀ можем да наблюдаваме в третия ден на измерванията. Завишените концентрации бяха отчетени след преминаване на кръстовища в северно-източна посока и най- отчетливо при наличието на плътно застрояване покрай трасето.

4. ИЗВОДИ

Четвърта глава разглежда постигнатото в дисертационния труд, приносите и потенциала за бъдещо развитие. Изследване представи за първи път в България изчерпателен анализ на това, което трябва да се направи, за да се оптимизира развитието на системи за БЛА, така че те да бъдат по-точни в приложения в реално време. В следната таблица са представени някои от ползите и ограниченията за използването на малки, леки БЛА в областта на атмосферните изследвания, които бяха открити в процеса на изследванията;

Ползи	Ограничения
Гъвкавост - широк спектър от приложения на БЛА за атмосферни изследвания	Капацитет на полезния товар
Цена - малките леки платформи са по-евтини спрямо пилотиран самолет, наземни инструменти и спътници	Ограничения за издръжливост - времето за полет все още е едно от най-големите ограничения

Безопасност - няма риск за екипажа при летене на БЛА опасни ситуации като близост до земята	Аерокосмическо регулиране - пълен набор от правила за работа на БЛА все още не са дефинирани
Време - разполагането на малка платформа на БЛА спестява време спрямо големи пилотирани платформи, както и наземни станции	Наличност на сензори - ограничен избор за професионални сензори, подходящи за монтаж на борда на малък лек БЛА
Повторяемост - наземна станция позволява да следвате всеки път един и същ програмиран маршрут на полета	Ограничения на сензорите - по-малките сензори могат имат по-малка чувствителност, избирателност
Рутинни полети - събирането на данни за рутинни полети може да бъде досадно / стресиращо за хората	Системна интеграция в мрежата
Лесен за разполагане - малките БЛА не се нуждаят от летищни писти, като БЛА с фиксирано крило могат да излитат на по-малко от 10–30 м, докато БЛА с въртящи се крила не се нуждаят от писти	Автономно проследяване на шлейфа - макар и малко алгоритми за автономно проследяване на шлейфа са разработени и успешно тествани в стимулационни среди, приложението в световен мащаб все още търпи доказуемост
Събиране на данни - малките БЛА могат да правят измервания във всяка точка на триизмерно пространство	Обща цена за разполагане - за да се позволят по-опасни мисии, когато съществува риск от загуба на БЛА

4.1 Постигнато

В градските райони разполагаме с платформи за наблюдение, използвайки мобилен сензор, интегриран със смартфони за ускоряване на извличането на проби и тяхното качване в различни платформи, и облачна система за обработка на данни. Освен тези системи, в тази дисертация се разглежда използването на БЛА за наблюдение на замърсяването на въздуха в конкретна зона. По-конкретно, се предлага физическа архитектура, за да се вгради желания сензор за качество на въздуха на БЛА и за да се наблюдава замърсяването на въздуха. Това изследване разработва и утвърждава БЛС за характеризирание на замърсители, отделяни от източници на горене, използвани от моторни превозни средства и причиняващи общо замърсяване в града. Такава система

може да измерва замърсяването на въздуха, спестявайки време и разходи, като същевременно събира информация, необходима за разбиране на разпределението на замърсителите и за определянето на свързаните емисионни фактори. След това се показва как да се контролира БЛА и да се наблюдава определена зона по автономен начин, като вниманието е съсредоточено върху потенциално най-замърсените зони.

Специфичните практико-приложните задачи в това изследване бяха разделени на две части. Първата от която беше да се разработи система за безпилотни летателни апарати (БЛА) за количествена оценка на замърсяването на въздуха в условия, при които вземането на проби с общи техники не е възможно или би дало по неточна представа. Втората и основна част от практико-приложни задачи на дисертацията включваше 5 различни изследвания които бяха представени в дисертацията и демонстрираха възможностите на системата;

Изследването демонстрира, че използването на безпилотни летателни системи може да представи хоризонтални и вертикално сечения на разпространението на замърсители, както и да спомогне за тяхната локализация. Това даде картина с по-голяма пространствена и времева резолюция от възможното и очаквано до момента.

Като заключение на експерименталната част на дисертацията беше демонстриран лесно приложим метод на измерване на качеството на въздуха в среди където използването на безпилотни летателни системи е ограничено от съображения за безопасност или времето им на полет. Такова представено приложение е използването на сензорите за измерване на ФПЧ във въздуха чрез тяхното прикачване към различни видове наземни превозни средства в градска среда.

Успешно бяха създадени профили на разпространение на прахови частици с размери 1 μ g, 2.5 μ g и 10 μ g по два маршрута, пресичащи гр. София. Двете примерни трасета на измерване бяха избрани по няколко критерия. Пресичайки се сравнително перпендикулярно, както и пресичайки центъра на София, те биха дали картина на концентрациите на прахови частици в различни части на столицата. Както и при предходните изследвания, и тук измерванията бяха проведени през три различни дни.

Това изследване даде възможност за много лесно приложим метод на измерване в среди където използването на безпилотни летателни системи е ограничено от съображения за безопасност или времето им на полет. Също така беше демонстрирана гъвкавостта и различните приложения на такива сензори.

4.2 Принос

Като обобщение на най-важните приноси на тази дисертация може да споменем подобряването на научното разбиране за развитието, същността и прилагането на БЛС за измерване и наблюдение на фините прахови частици и са приложими за наблюдение на замърсителите на въздуха като цяло, особено такива отделяни от различни видове транспорт. Съществени приноси на това изследване включват:

- Показано е приложението на системи за БЛА за изследвания на качеството на въздуха с акцент върху настоящите и бъдещите приложения и предизвикателствата;
- Успешното интегриране на две ясно обособени научни дисциплини и са представени нови методики за измерване и наблюдение на атмосферата;
- Нов метод за оценка на замърсители, излъчвани както от стационарни, така и от мобилни източници на горене, като например промишлени обекти и автопаркове. Тази методология намалява разходите и увеличава достъпността, както и качеството на данните;
- Усъвършенстването на знанията за вертикалното разпределение на замърсителите, генерирани от трафика чрез прилагане на новия метод в реални условия, в различни обстановки като открито пространство в съседство на магистрала, индустриална зона и други. Това е постигнато чрез летене на БЛС над 30 полета до максимална височина от 50м, което потвърждава нейната способност да определя количествен вертикален профил на концентрация на прахови частици с различна големина. Този метод установява, че концентрацията на ПЧ се увеличава до около 10м над земята, а след 20м показва рязко намаляване във височина. Резултатите са много последователни при всички тестове и са от решаващо значение за подобряване на пространствено-времевите модели за оценка на концентрацията на частици и за по-добро разбиране на въздействието на емисиите от трафика върху човека;
- Демонстрация, че тази нова методология може да сведе до минимум настоящото ниво на несигурност на оценката на емисиите и че такава система БЛА може да бъде интегрирана като система за патрулиране с цел по-ефективна оценка на емисиите, отделяни от транспорта, спестявайки време и пари;
- БЛА могат да се използват и за редовни патрули около индустриални зони (Chao-Chung, P. и Chao-Yung, H., 2015г.) и площадки. Това разширява целите на измерването на качеството на въздуха към мониторинг отвъд наземните фиксирани станции за събиране и предаване на данни, помагайки за по-бързо вземане на решения (Danilov, A.; Smirnov, Y. и Petrova, T., 2015г.). БЛА могат да се

използват и като инструмент за предотвратяване и ранна диагностика на екологични бедствия, като например мониторинг на нивата на ядрена радиация с цел идентифициране на изтичане на радиация (Han, J.; Xu, Y. и Di, L., 2013г.; Behnke, D.; Bok, P.B. и Wietfeld, C., 2013г.)

- Демонстрацията на предизвикателствата спрямо сензорите, капацитета на полезния товар на БЛА и издръжливостта на полета, основни ограничения за използването на БЛА в областта на изследването на качеството на въздуха;
- Не на последно място са представени данни за характеристиките на генерираното замърсяване в избраните райони и условия.

В резултат на изследването можем да извлечем редица изводи по отношение на обектите му и да разширим познанията за профилите на концентрация на фини прахови частици, произлизащи от транспорта. Преди това проучване замърсяването от автомагистрала и пътища се измерва само на нивото на земята, показвайки експоненциално понижение на концентрацията на замърсители с разстояние от пътя до няколкостотин метра по-надолу. Основните изводи са;

- БЛС, разработена в това проучване, демонстрира високо ниво на точност при полети до максимална височина от 50m, потвърждавайки способността ѝ да установява количествен вертикален профил на концентрация на фини прахови частици;
- Използваната БЛС също така демонстрира, че концентрацията на частици се увеличава и намалява с височина и разпределение въз основа на вида на частиците;
- Генерираните от трафика замърсители пряко влияят на качеството на въздуха само в сравнително тесен атмосферен слой, в рамките на първите десетки метра над повърхността;
- Емисиите от трафика могат да засегнат хора, живеещи в многоетажни сгради на надморска височина до около 30м височина, с намаляващи стойности на замърсяване над това ниво;
- Географските особености и препятствия оказват голямо влияние върху разпределението на частиците и трябва да се вземат под внимание при създаването на летателни планове за наблюдения за всяка специфична локация.
- Наблюдаваните ефекти при изследването предполагат, че бариерите и дърветата са полезни при ограничаването на замърсяването от динамична гледна точка, тъй като намаляват концентрацията на емисиите от трафика на височината на пешеходците.

Това намаление се дължи предимно на увеличаване на турбуленцията, което от своя страна увеличава смесването на по-чист въздух с емисиите от трафика.

- Въздушните частици и газовите молекули се отлагат, когато преминават близо до повърхност. Повечето растения имат голяма площ на единица обем, което увеличава вероятността от отлагане в сравнение с гладките, изкуствени повърхности, присъстващи в градските райони.
- Бариерите между източника на замърсяване и хората могат да се използват за филтриране на въздуха, т.е. чрез дисперсия и отлагане. Бариерите като храсти и дърве са полезни при ограничаването на замърсяването от динамична гледна точка, тъй като намаляват концентрацията на емисиите от трафика на височината на пешеходците. Това намаление се дължи предимно на увеличаване на турбуленцията, което от своя страна увеличава смесването на по-чист въздух с емисиите от трафика. Също така, въздухът, преминаващ отгоре, а не през растителността не се забавя или филтрира, това се отразява главно на по-малките и по-леки частици. В заключение, растителните бариери оказват положително влияние върху качеството на въздуха с гъста и висока растителност. Проучванията водят до наблюдението, че значително отстраняване на замърсители се постига чрез проектиране на растителни бариери по-близо до източника на замърсяване. Бъдещето на тази изследователска тема се нуждае от фокус върху събирането на допълнителни резултати от измервателни изследвания в различни метеорологични и геометрични конфигурации.

4.3 Потенциал и практически приложения на методиката в България

Данните събирани по методологията представена в дисертацията могат да бъдат използвани от всички институции които имат правомощия и отговорности за създаването на политики и реакции свързани с качеството на въздуха. Такива биват Изпълнителната агенция за околната среда, общините и в частност Столичната община, както и специфични неправителствени лица като на пример “Асоциация на българите боледуващи от астма.”

Информацията, която се изпраща на ведомствата, организациите и средствата за масово осведомяване в случаите на превишаване на установените алармени прагове и показатели дава възможност за своевременно уведомяване на населението, а също така съдържа и информация за събитието, здравен риск и предпазни мерки, които следва да

бъдат предприети от засегнатите чувствителни групи от населението. Специфични мерки които биват прилагани от общините и изброените институции могат да бъдат доста разнообразни и обвързани с подобни граждански платформа предупреждава за замърсяване.

4.4 Бъдеща работа

Бъдещите научни изследвания могат да разширят проучванията, представени в настоящата изследователска работа, и да включват следните основни области;

- Проучване на емисиите при реални условия и за по-добра регулация на тези източници на емисии;
- По-нататъшно разработване на полезния товар на БЛС, за да се включат метеорологични датчици за влажност, скорост и посока на вятъра и други, за да се предостави информацията, необходима за оценката на дисперсията;
- Използване на различни сензори, включително хиперспектрални изображения и газови анализатори в реално време, за да се правят измервания в реално време чрез БЛС. Това би увеличило способността на системата да следи потенциално мобилни източници;
- Подобряване на схемата на полета за събиране на данни. Грешката в извадката може да бъде намалена чрез събиране на повече точки от данни вътре в шлейфа. Намирането на оптимално разстояние на трасетата би осигурило най-широкото напречно сечение на данните, като същевременно би осигурило ясно разграничение между шлейфа и околната въздушна маса;
- Подобряване на БЛС с помощта на вграден полезен товар за летливи органични съединения (ЛОС), за по-добро характеризирание на емисиите от източника на горене. Създадените наземни методи за вземане на проби от качеството на въздуха, като например методите за вземане на проби от микроекстракция на твърда фаза за ЛОС, могат да бъдат препроектирани за използване на бордови БЛС, както и интегриране с дисплей в реално време към регистрацията на данни. Разработките на алгоритъма, използващи множество БЛА за проследяване на шлейфа, са възможни, когато един БЛА лети нагоре, докато другият проследява низходящия вятър, за да предвиди пътя на шлейфа и да предостави ранно предупреждение за области на замърсяване. Генетични алгоритми също могат да бъдат използвани за получаване на по-бързи и ефективни реакции;

- Разглеждането на миниатюризацията на сензорите изглежда е основният проблем при работа с леки БЛА. Разнообразният диапазон на капацитета на полезния товар на БЛС се осъществява предимно от разликата между различните категории БЛА.

IV. ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Цветков, П. Използване на безпилотна летателна система за картиране на Прахово замърсяване, Геолого-географски факултет, Годишник на Софийски университет „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“, 2019

Цветков, П. Наблюдение на вертикалното разпространение на праховото замърсяване, Геолого-географски факултет, Годишник на Софийски университет „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“, 2021

V. БИБЛИОГРАФИЯ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Monksa P., C. Granierbcd, S. Fuzzie, A. Stohlf, M. L. Williams, H. Akimoto, M. Amanni, A. Baklanovj, U. Baltenspergerk, I. Beyl, N. Blakem, R.S. Blakea, K. Carslaw, O.R. Coopercd, F. Dentenero, D. Fowlerp, E .Fragkouq, G.J. Frosted, R. von Glasowbb, *Atmospheric composition change – global and regional air quality*, Atmospheric Environment Volume 43, Issue 33, Pages 5268-5350, October 2009
2. Chak K.Chana, Xiaohong Yaoab, „*Air pollution in mega cities in China*“, Atmospheric Environment, Volume 42, Issue 1, Pages 1-42, January 2008
3. Kasischke Eric S., J. E. Penner, *Improving global estimates of atmospheric emissions from biomass burning*, 2004
4. Khoder M.I, *Atmospheric conversion of sulfur dioxide to particulate sulfate and nitrogen dioxide to particulate nitrate and gaseous nitric acid in an urban area*, Chemosphere Volume 49, Issue 6, November 2002
5. Yoram J. Kaufman, *Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations*, Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland & Earth Science Directorate, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 2002
6. Rajkumar W. S., A. S. Chang, *Suspended particulate matter concentrations along the east–west corridor, Trinidad, West Indies*, Atmospheric Environment, 2000
7. Karthikeyan K. G., M. T. Meyer, *Occurrence of antibiotics in wastewater treatment facilities in Wisconsin, USA*, science of the Total Environment, 2006
8. Lewtas J., *Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects*, Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2007
9. Simeonov V., J. A. Stratis, C Samara, *Assessment of the surface water quality in Northern Greece*, Water research, 2003

10. Morawska, L., Ristovski, Johnson, Jayaratne, & K. Mengersen, *Novel method for on road emission factor measurements using a plume capture trailer*. Environmental Science & Technology, 41(2), 574-579. doi: 10.1021/es060179z, 2007
11. Mysliwiec, MJ Kleeman, *Source apportionment of secondary airborne particulate matter in a polluted atmosphere*, Environmental science & technology, 2002
12. Smith, A., P. Watkiss, G. Tweddle, McKinnon, A. Campbell. *The Validity of Food Miles as an Indicator of Sustainable Development: Final Report for DEFRA*. Harwell: AEA Technology, 2005
13. Susan C. Anenberg, Larry W. Horowitz, Daniel Q. Tong, *An Estimate of the Global Burden of Anthropogenic Ozone and Fine Particulate Matter on Premature Human Mortality Using Atmospheric Modeling*, 2010
14. WHO, *World health statistics 2009*
15. Arden Pope III C. & Douglas W. Dockery, *Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect*, Journal of the Air & Waste Management Association, 56:6, 709-742, DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485, 2006
16. Braga, C. F., E. C. Teixeira, L. Meira, F. Wiegand, M.L. Yoneama, J. F. Dias, *Elemental composition of PM10 and PM2.5 in urban environment in South Brazil*. Atmospheric Environment 39, 1801-1815. 2005
17. Debry, E., K. Fahey, K. Sartelet, B. Sportisse, M. Tombette, Technical Note: *A new Size Resolved Aerosol Model (SIREAM)*. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 6 (6), 11845-11875. 2006
18. Oberdorster, G, E. Oberdorster, J. Oberdorster. *Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles*. Environmental Health Perspective 113, 823-839. 2006
19. Malm, W. C., *Introduction to visibility*. Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIRA) NPS Visibility Program, 1999
20. Yin, J., R. M. Harrison. *Pragmatic mass closure study for PM1.0, PM2.5 and PM10 at roadside, urban background and rural sites*. Atmospheric Environment 40, 980-988, 2008
21. Mysliwiec, M. J., Kleeman, M. J., *Source apportionment of secondary airborne particulate matter in a polluted atmosphere*. Environmental Science and Technology 36, 5376-5384, 2002
22. Baltensperger, U., M. Kalberer, J. Dommen, D. Paulsen, M. R. Alfarra, H. Coe, R. Fisseha, A. Gascho, M. Gysel, S. Nyeki, M. Sax, M. Steinbacher, A. S. H. Prevot, S. Sjogren, E. Weingartner, R. Zenobi, *Secondary organic aerosols from anthropogenic and biogenic precursors*, Faraday Discussion, 130, 265-278, 2005
23. Hueglin, C., R. Gehrig, U. Baltensperger, M. Gysel, C. Monn, H. Vonmont, *Chemical characterization of PM2.5, PM10 and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland*. Atmospheric Environment 39, 637-651, 2005
24. Samet, J.M., F. Dominici, F. C. Curriero, I. Coursac, S.L. Zeger, *Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994*. New England Journal of Medicine, 343, 1742-1749, 2000
25. Schwartz, J., D. W. Dockery, L. M. Neas, L. *Is daily mortality associated specifically with fine particles?* Journal of the Air and Waste Management Association 46(10), 927-939, 1996
26. Anderson, M. J., S. L. Miller, J. B. Milfor, *Source apportionment of exposure to toxic volatile organic compounds using positive matrix factorization*. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 11, 295-307, 2001

27. Kulkarni, P., P. A. Baron, & K. Willeke, *AEROSOL MEASUREMENT: PRINCIPLES, TECHNIQUES, AND APPLICATIONS*: John Wiley & Sons, 2011
28. Wey, M.-Y., J. Su, & J. C. Chen, *Influence of Operating Conditions on the Formation of Heavy Metal Compounds During Incineration*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(4), 444-453, 1999
29. Harrison, R. M., M. Jones, & G. Collins, *Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere*. *Atmospheric Environment*, 33(2), 309-321. doi: 10.1016/S1352-2310(98)001642, 1999
30. Shi, J. P., & R. M. Harrison, *Investigation of Ultrafine Particle Formation during Diesel Exhaust Dilution*. *Environmental Science & Technology*, 33(21), 3730-3736. doi: doi.org/10.1021/es981187I, 1999
31. Shi, J. P., A. A. Khan, & R. M. Harrison, *Measurements of ultrafine particle concentration and size distribution in the urban atmosphere*. *Science of The Total Environment*, 235(1-3), 51-64. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00189-8, 1999
32. Wählin, P., F. Palmgren, R. Van Dingenen, & F. Raes, *Pronounced decrease of ambient particle number emissions from diesel traffic in Denmark after reduction of the sulphur content in diesel fuel*. *Atmospheric Environment*, 35(21), 3549-3552. doi: 10.1016/S1352-2310(01)00066-8, 2001
33. Ristovski, Z. D., E. R. Jayaratne, M. Lim, G. A. Ayoko, & L. Morawska, *Influence of Diesel Fuel Sulfur on Nanoparticle Emissions from City Buses*. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1314-1320. doi: 10.1021/es050094i, 2006
34. Mishraa S., C.Ghanshyama, N.Rama, R.P.Bajpaia, R.K.Bedib, *Detection mechanism of metal oxide gas sensor under UV radiation*, *Sensors and Actuators B: Chemical* Volume 97, Issues 2-3, 1, Pages 387-390, 2004
35. Schei, A. Morten , *Asthma, allergies, and indoor air pollution in Nepal and Guatemala*, University of California, Berkeley, ProQuest Dissertations Publishing, 2004
36. Tutar Ercan MD, F. Ekici MD, S. Atalay MD, *The prevalence of bicuspid aortic valve in newborns by echocardiographic screening*, *American Heart Journal* Volume 150, Issue 3, September 2005
37. Davidson, C.I.; R. F. Phalen, P. A. Solomon, *Airborne Particulate Matter and Human Health: A Review*; *Aero. Sci. Technol*, 2005
38. Morawska, L., & J. Zhang, *Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures*. *Chemosphere*, 49(9), 1045-1058. doi: 10.1016/S0045- 6535(02), 2002
39. Arditoglou, A., C. Samara, *Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: A source identification and apportionment study*. *Chemosphere*. 59: 669-678, 2005
40. Namdeo, M.C. Bell, *Characteristics and health implications of fine and coarse-particulates at roadside, urban background and rural sites in UK*, *Environ. Int.*, 31 (4), 2005
41. Schwartz, J., F. Laden, & A. Zanobetti, *The concentration-response relation between PM2.5 and daily deaths*. *Environmental Health Perspectives*, 110(10), 1025-1029., 2002
42. Arden Pope III, C. & Douglas W. Dockery, *Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect*, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56:6, 709-742, 2006

43. Dockery DW, J. Cunningham, A. I. Damokosh, et al., *Health effects of acid aerosols on North American children: respiratory symptoms*. Environ Health Perspect;104(5):500–505, 2006
44. WHO, *Review of evidence on health aspects of air pollution*, Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf, 2013
45. Gauderman WJ, E. Avol, F. Gilliland, H. Vora, D. Thomas, K. Berhane, R. McConnell, N. Kuenzli, F. Lurmann, E. Rappaport, H. Margolis, D. Bates, J. Peters, *The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age*. N. Engl J Med. Sep 9;351(11):1057-67., 2004
46. Brunekreef, B., S.T. Holgate. *Air Pollution and Health*; Lancet 2002, 360, 1233-1242.
47. Basagaña X, M. Esnaola, I. Rivas, F. Amato, M. Alvarez-Pedrerol, J. Forn, M. López-Vicente, J. Pujol, M. Nieuwenhuijsen, X. Querol, J. Sunyer, *Neurodevelopmental deceleration by urban fine particles from different emission sources: a longitudinal observational study*. Environ Health Perspect 124:1630, 2016
48. Block ML, A. Elder, R. L. Auten, S. D. Bilbo, H. Chen, J. C. Chen, et al., *The outdoor air pollution and brain health workshop. 2012*
49. Grahame TJ, R. Klemm, R. B. Schlesinger, *Public health and components of particulate matter: the changing assessment of black carbon*. J Air Waste Manage. Assoc., 2014
50. Ibald-Mulli, A.; J. Stieber, H. Wichmann, W. Koenig, A. Peters. *Effects of Air Pollution on Blood Pressure: A Population-Based Approach*; Am. J. Pub. Health, 91, 571-577, 2001
51. Pope, C.A., R.E. Kanner, *Acute Effects of PM10 Pollution on Pulmonary Function of Smokers with Mild to Moderate Chronic Obstructive Pulmonary Disease*; Am. Rev. Respir. Dis., 147, 1336-1340, 2006
52. Calderón-Garcidueñas L, R. R. Maronpot, R. Torres Jardon, C. Henríquez-Roldán, R. Schoonhoven, H. Acuña-Ayala, et al. (2003). *DNA damage in nasal and brain tissues of canines exposed to air pollutants is associated with evidence of chronic brain inflammation and neurodegeneration*. Toxicol. Pathol. 31(5):524–538
53. Ibald-Mulli, A., A. Khandoga, W. Koenig, F. Kromback, R. Radykewicz, A. Stampfl, B. Thorand, A. Peters, *Cardiovascular Effects of Fine and Ultrafine Particles*. J. Aerosol Med., 18, 1-22, 2005
54. Lim SS, T. Vos, A. D. Flaxman, et al. *A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010*. Lancet 2012;380(9859):2224–2260)
55. Jacobson, M. Z., *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*, 2002
56. Stanhill, G., S. Cohen, *Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences*. Agricultural Forestry. Meteorology 107, 255-278, 2001
57. US EPA, *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Volume I. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 2004
58. Julián Blascoa, Vanesa Durán-Gradosb, Miriam Hampela, Juan Moreno-Gutiérrezb, *Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems*, Environment International Volume 66, 2014
59. H Winnes, J Moldanová, M Anderson, E Fridell, *On-board measurements of particle emissions from marine engines using fuels with different sulphur content*, PI Mech. Eng. MJ. Eng., 230, 45–54, 2016

60. IPCC. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. Contribution of working group I to the third assessment report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
61. Ramanathan, V. C. P. J., et al. (2006), "*Aerosols, climate, and the hydrological cycle*." science 294.5549.
62. Hitchins, Jane, et al. (2002), "*Dispersion of particles from vehicle emissions around high-and low-rise buildings*." Indoor Air 12.1.
63. Kumar, Prashant, et al. (2008), "*Pseudo-simultaneous measurements for the vertical variation of coarse, fine and ultrafine particles in an urban street canyon*." Atmospheric Environment 42.18.
64. Wu, Ye, et al. (2002), "*Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China*." Atmospheric Environment 36.31.
65. Morawska, Lidia, et al. (2008), "*Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure*." Atmospheric Environment 42.35.
66. Zhu, Yifang, et al. "*Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a mobile exposure system on Los Angeles freeways*." Journal of the Air & Waste Management Association 58.3, 2008
67. Holmes, N. (2007). *A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications*. Atmospheric Environment 41, 2183-2201.
68. Vardoulakis, S., B.E.A. Fisher, N. Gonzalez-Flesca, and K. Pericleous (2002). *Model sensitivity and uncertainty analysis using roadside air quality measurements*. Atmospheric Environment, 36, 2121-2134.
69. COST732. (2005-2009). COST Action 732: *Quality assurance and improvement of 1010 micro-scale meteorological models*.
70. Lohmeyer, A., W.J. Mueller and W. Baechlin (2002). *A comparison of street canyon concentration predictions by different modellers: final results now available from the Podbi-exercise*. Atmospheric Environment, 36, 157-158.
71. Ying Zhou and Jonathan I Levy, „*Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis* “
72. Watai, T., T. Machida, N. Ishizaki, G. Inoue, *A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle*. J. Atmos. Ocean. Technol, 2006
73. Ramana, M.V.; Ramanathan, V.; Kim, D.; Roberts, G.C.; Corrigan, C.E. *Albedo, atmospheric solar absorption and heating rate measurements with stacked UAVs*. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2007
74. Ramanathan, V. Maldives AUAV Campaign (MAC): *Observing Aerosol-Cloud-Radiation-Climate Interactions Simultaneously from three Stacked Autonomous Unmanned Aerial Vehicles (AUAVs)*; Report of the Field Campaign Held from March; National Science Foundation: Arlington, VA, USA, 2006
75. Kularatna, Nihal, and B. H. Sudantha. "*An environmental air pollution monitoring system based on the IEEE 1451 standard for low cost requirements*." IEEE Sensors Journal 8.4, 2008

76. Al-Haija, Qasem Abu, Hasan Al-Qadeeb, Abdulmohsen Al-Lwaimi. *"Case Study: Monitoring of AIR quality in King Faisal University using a microcontroller and WSN."* Procedia Computer Science 21, 2013
77. Shrivastava, Ashish, et al. *"GSM based gas leakage detection system."* International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE-ISSN: 2320-9569) 3.2, 2013
78. Barnhart, Cynthia, et al. *"Equitable and efficient coordination in traffic flow management."* Transportation science 46.2, 2012
79. Bachrach, Abraham, Ruijie He, and Nicholas Roy. *"Autonomous flight in unknown indoor environments."* International Journal of Micro Air Vehicles 1.4, 2009
80. Watts, Adam C., Vincent G. Ambrosia, and Everett A. Hinkley. *"Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use."* Remote Sensing 4.6, 2012
81. Yan, Lei, Zhiyang Gou, and Yini Duan. *"A UAV remote sensing system: design and tests."* Geospatial Technology for Earth Observation. Springer, Boston, MA, 2010
82. Altstädter, B.; Platis, A.; Wehner, B.; Scholtz, A.; Lampert, A.; Wildmann, N.; Hermann, M.; Käthner, R.; Bange, J.; Baars, H. Aladina, *An unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer.* Atmos. Meas. Tech. Discussions, 2014
83. Harrison, W.A., D. J. Lary, B. J. Nathan, A.G. Moore, *Using remote control aerial vehicles to study variability of airborne particulates.* Air Soil Water Res. 2015
84. Nathan, B.J., L.M. Golston, A.S. O'Brien, K. Ross, W.A. Harrison, L. Tao, D.J. Lary, D.R. Johnson, A.N. Covington, N.N. Clark, et al. *Near-field characterization of methane emission variability from a compressor station using a model aircraft.* Environ. Sci. Technol, 2015
85. Brady, J.M., M.D. Stokes, J. Bonnardel, T.H. Bertram, *Characterization of a quadrotor unmanned aircraft system for aerosol-particle-concentration measurements.* Environ. Sci. Technol, 2016
86. Barnhart, Cynthia, et al. *"Equitable and efficient coordination in traffic flow management."* Transportation science 46.2, 2012
87. Colomina, Ismael, and Pere Molina. *"Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review."* ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 92, 2014
88. Fahlstrom, Paul, and Thomas Gleason. *Introduction to UAV systems.* John Wiley & Sons, 2012
89. Watts, Adam C., Vincent G. Ambrosia, and Everett A. Hinkley. *"Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use."* Remote Sensing 4.6, 2012
90. Bachrach, Abraham, Ruijie He, and Nicholas Roy. *"Autonomous flight in unknown indoor environments."* International Journal of Micro Air Vehicles 1.4, 2009
91. Chwaleba, Augustyn, et al. *"Analysis of capability of air pollution monitoring from an unmanned aircraft."* Aviation 18.1, 2014
92. Antonio, P., D. Caputo, A. Gandelli, F. Grimaccia, & M. Mussetta (2012, October). *Architecture and methods for UAV-based heterogeneous sensor network applications.* In *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Region*, s 2012

93. Skoglar, Per, et al. "Road target search and tracking with gimbaled vision sensor on an unmanned aerial vehicle." *Remote sensing* 4.7, 2012
94. Drury, Jill L., and Stacey D. Scott. "Awareness in unmanned aerial vehicle operations." *The International C2 Journal* 2.1, 2008
95. Novaković, Zoran, and Nikola Medar. "Analysis of a UAV bungee cord launching device." *Sci. Tech. Rev* 63, 2013
96. Fahlstrom, Paul, and Thomas Gleason. *Introduction to UAV systems*. John Wiley & Sons, 2012
97. Woolley, Christopher Colin Anthony, et al. "Launch system." U.S. Patent No. 8,584,985. 19 Nov. 2013
98. Ozdemir, Ugur, et al. "Design of a commercial hybrid VTOL UAV system." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74.1-2, 2014
99. Reuder, Joachim, Marius O. Jonassen, and Haraldur Ólafsson. "The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research." *Acta Geophysica* 60.5, 2012
100. Techy, Laszlo, David G. Schmale III, and A. Craig. Woolsey. "Coordinated aerobiological sampling of a plant pathogen in the lower atmosphere using two autonomous unmanned aerial vehicles." *Journal of Field Robotics* 27.3, 2010
101. Neumann, Patrick P., et al. "Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-based algorithms." *Advanced Robotics* 27.9, 2013
102. Melnyk, Richard, et al. "A third-party casualty risk model for unmanned aircraft system operations." *Reliability Engineering & System Safety* 124, 2014
103. Raptis, Ioannis A., Kimon P. Valavanis, and George J. Vachtsevanos. "Linear tracking control for small-scale unmanned helicopters." *IEEE Transactions on control systems technology* 20.4, 2011
104. Wu, Paul P., and Reece A. Clothier. "The development of ground impact models for the analysis of the risks associated with unmanned aircraft operations over inhabited areas." *Proceedings of the 11th probabilistic safety assessment and management conference (PSAM11) and the annual European safety and reliability conference (ESREL 2012)*, 2012
105. Cork, Lennon, et al. "The future of UAS: Standards, regulations, and operational experiences [workshop report]." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 22.11, 2007
106. QGIS Documentation, Raster Data, https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html
107. ArcMap, Manage Data, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/how-features-are-represented-in-a-raster.htm>
108. L. Spinelle, M. Alexandre and M. Gerboles, *Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution*, Publications Office of the European Union, 2013
109. Castell et al., 2017; Cross et al., 2018; Spinelle et al., 2015; Walser et al., 2017; Hagan et al., 2018; Mijiling et al., 2017; Zimmerman et al., 2017, Andres Gonzalez¹, Adam Boies², Jacob Swason³, David Kittelson⁴, 2019, *Field Calibration of Low-Cost Air Pollution Sensors*, Department of Civil, Environmental, and Geo-Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

110. Илинский, А. *ГЛС в търсене на нефтени находища*, Всерусийски научно-изследователски геологопроучвателен институт (ВНИГРИ) и Санкт-Петербургски национален изследователски университет по информационни технологии, механика и оптика (ИТМО), 2017
111. Филипов, А. *Използване на безпилотна летателна система за фотограметрични цели*, Геолого-географски факултет, Годишник на Софийски университет „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ Том 102, 2017
112. Цветков, П. *Използване на безпилотна летателна система за картиране на Прахово замърсяване*, Геолого-географски факултет, Годишник на Софийски университет „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“, 2019
113. Atkinson, R. L., T. Barregård, R. Bellander, F. Burnett, Cassee. *Review of evidence of health aspects of air pollution*, WHO Technical report, REVIHAAP Project, 2013
114. Cohen, A., *Mortality impacts of urban air pollution. In: Ezzati Metal., eds. Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*. Geneva, World Health Organization: 1353–1434, 2004
115. Katsouyanni, K., *Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project*. *Epidemiology*, 12:521–531, 2001
116. Tommaso Francesco Villa, Branka Miljevic, Zoran D. Ristovski and Lidia Morawska, *An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Perspectives*, International Laboratory for Air Quality and Health (ILAQH), Queensland University of Technology (QUT)
117. Weber, K. G., Heweling, C., Fischer, M., Lange. *The use of an octocopter UAV for the determination of air pollutants*, Laboratory for Environmental Measurement Techniques Duesseldorf University of Applied Sciences, 2017
118. Chao-Chung, P.; Chao-Yung, H. *Integration of an unmanned vehicle and its application to real-time gas detection and monitoring*. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics—Taiwan (ICCE-TW)*, Taipei, Taiwan, 2015
119. Danilov, A., Y. Smirnov, T. Petrova, M. Pashkevich. *Using drones of preconstruction monitoring conducting in mining enterprise*. *Int. J. Ecol. Dev.*, 2015
120. Han, J.; Xu, Y.; Di, L.; Chen, Y. *Low-cost multi-UAV technologies for contour mapping of nuclear radiation field*. *J. Intell. Robot. Syst.*, 2013
121. Behnke, D., P.B. Bok, C. Wietfeld. *UAV-based connectivity maintenance for borderline detection. In Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, 2013
122. Roupsard, P., M. Amielh, D. Maro, A. Coppalle, H. Branger, *Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces*. *J. Aerosol Sci.* 55, 2013
123. Hinds, W.C., *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, second ed.* 504 pp., 1999
124. Roupsard, P., M. Amielh, D. Maro, A. Coppalle, H. Branger, *Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces*. *J. Aerosol Sci.* 55, 2013

- 125.Hinds, W.C., *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, second ed. 504 pp., 1999
- 126.Reuder, J., M. Jonassen, H. Ólafsson. *The small unmanned meteorological observer sumo: Recent developments and applications of a micro-uas for atmospheric boundary layer research*. Acta Geophys. 2012
- 127.Neumann, P.P., V.H. Bennetts, A.J. Lilienthal, M. Bartholmai, J.H. Schiller, *Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-based algorithms*. Adv. Robot. 2013
- 128.Berman, E.S.F. M.L.J. Fladeland, R. Kolyer, M. Gupta, Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle. Sens. Actuators B Chem. 2012
- 129.Fladeland, M., M. Sumich, B. Lobitz, R. Kolyer, D. Herlth, R. Berthold, D. McKinnon, L. Monforton, J. Brass, G. Bland. *The nasa sierra science demonstration programme and the role of small-medium unmanned aircraft for earth science investigations*. Geocarto Int. 2011
- 130.Houston, A.L.; B. Argrow, J. Elston, J. Lahowetz, E.W. Frew, P.C. Kennedy, *The collaborative colorado-nebraska unmanned aircraft system experiment*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2012