

# ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

ас. инж. Аспарух Иванов Атанасов

Заглавие:

ИЗСЛЕДВАНЕ ПРИЛОЖИМОСТТА И ЕФЕКТИВНОСТТА НА  
СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ В ПРЕЦИЗНОТО ЗЕМЕДЕЛИЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и

научна степен “доктор”

по докторска програма “Приложна механика”

към професионално направление 5.1 Машинно инженерство

Научен ръководител: доц. д-р инж. Радко Петров Михайлов

Научен ръководител: доц. д-р Галина Марчева Михова

Рецензенти:

1. ....

2. ....

Варна, 2023 г.

Дисертационният труд е обсъден на ..... г. в катедра  
“.....” и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра “.....”

Автор: ас. инж. Аспарух Иванов Атанасов

Заглавие: “ ИЗСЛЕДВАНЕ ПРИЛОЖИМОСТТА И ЕФЕКТИВНОСТТА  
НА СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ В ПРЕЦИЗНОТО ЗЕМЕДЕЛИЕ.”

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

ас. инж. Аспарух Иванов Атанасов

Заглавие:

“ИЗСЛЕДВАНЕ ПРИЛОЖИМОСТТА И ЕФЕКТИВНОСТТА НА  
СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ В ПРЕЦИЗНОТО ЗЕМЕДЕЛИЕ.”

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и  
научна степен “ДОКТОР”

Варна, 2023 г.

Дисертационният труд съдържа 151 страници, включително 89 фигури, 35 таблици, 0 схеми, 0 чертежа и 5 приложения, оформени в 5 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 227 заглавия, от които 0 на кирилица и 211 на латиница и 16 интернет източника.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... г.  
от ..... ч. в ..... на открито заседание на жури  
сформирано със заповед на Ректора № ...../..... г.  
Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са  
на разположение на интересующите се в Докторантския център, стая 318  
НУК.

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### **Актуалност на проблема**

Настоящата разработка представлява експериментално изследване на методика за безразрушителен контрол за определяне свойствата на биологични обекти в частност земеделски култури и почва посредством дистанционно спектрално изследване. В изследване се разглеждат различни сензори за измерване на важни за земеделието величини посредством безпилотни летателни средства (БПЛС) за събиране на информация с цел управление и прилагане на полезни практики за променливите полски условия. Разработена е методика за проследяване и наблюдение на вегетационните процеси в Южна Добруджа, посредством дистанционно наблюдение чрез БПЛС на промените по време на вегетация на база на RGB и NIR изображения посредством фотограметрия.

Извършвано е директно наблюдение развитието на сортове пшеница в опитно поле, което дава важна информация за състоянието на посева. Разглеждани са данните от различни сензори за измерване на важни за земеделието величини.

Използваните методи на изследванията се състоят в: анализ на съществуващи решения, създаване и изследване на конкретни решения чрез използване възможностите на дистанционно управляеми малогабаритни безпилотни летателни средства за работа с различни сензори за дистанционно наблюдение, (статистическа обработка на резултатите), компютърно обработване на получената първична дигитална информация, създаване на бази данни на вегетационни индекси.

### **Цел и задачи на дисертационния труд**

Изследването има за цел да се установи приложимостта и ефективността на различни сензорни системи при тяхното използване за нуждите на прецизното земеделие чрез методика за безразрушителен контрол на свойствата на изследваните биологични обекти посредством фотограметрия. Изследва се методиката за осъществяване и

възможността за изследване на свойствата на земеделските култури и полето посредством дистанционно спектрално изследване и възможността за събере на голямо количество информация в цифров вид за засетите с култури земеделски площи.

### **Задачите на изследването са:**

1. Разработване на методология за безразрушителен контрол на свойствата и изследване състоянието на посеви на базата на безпилотен летателен апарат, използвайки камери със RGB и NIR диапазон на заснемане в тестови участъци на Южна Добруджа, България като практическо приложение на дистанционно наблюдение с БПЛА;
2. Разграничаване на етапите на развитие на земеделски култури на базата на отражателни вегетационни индекси, използвайки RGB и NIR камери, като важен елемент за приложимостта и ефективността на дистанционното наблюдение на земеделските култури;
3. Получаване на регионални вегетационни индекси и създаване на база от данни за динамиката на изменението им за сортове пшеница в Южна Добруджа, с което да се докаже приложимостта и ефективността на дистанционното наблюдение на земеделски площи чрез проследяване развитието на посевите в Южна Добруджа при заснемане с БПЛА;
4. Изследване възможностите за диференциране на сортове зимна пшеница и етапите на развитието ѝ чрез спектрални индекси и прогнозиране на продуктивния потенциал на база изменението на тези индекси, като доказателство за приложимостта и ефективността на дистанционното наблюдение;
5. Статистическа обработка на данните от засушаването в горният почвен слой чрез метода на регресионния анализ и дескриптивен анализ на факторите, които определят протичането на процеса регистриране на отражението от слънчевата радиация от посев на пшеница;
6. Разработване и тестване приложимостта на автономна метеорологична станция захранвана от слънчева енергия за изследване на важни за прецизното земеделие величини в южна Добруджа;

Работна хипотеза на изследването е, че съществува корелационна зависимост между спектралните данни на отражението от земеделските култури и фенологичните, биометричните и физиологичните показатели, което е от определящо значение за приложимостта и ефективността на сензорната система за дистанционното наблюдение.

### **Обектът, предметът и мястото на изследване**

Обект на изследване са земеделски посеви в района на Добруджа - Североизточна България.

Предмет на изследването са сензорни системи с приложение в прецизното земеделие използвани в БПЛА. Пряко или косвено са изследвани данни от следните сензорни системи използвани в БПЛА:

1. GPS система;
2. Сензори за изображения;
3. Акселерометрични системи;
4. Инерционни измервателни сензорни системи;
5. Сензорни системи за наклон;
6. Токови сензорни системи;
7. Магнитни сензори (електронни компаси);
8. Ултразвуков далекомер;

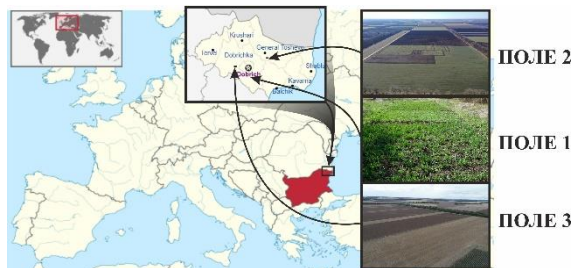
Създаден е сензор за измерване на почвена влага и температура на базата на Arduino посредством капацитивен сензор. Калибрирани спрямо обемното съдържание на влага в почвата чрез гравиметричен метод, (използвайки обем и тегло на суха и влажна почва). Тествана е възможността за реализиране на WiFi безжичен сензор и автономно захранване от слънчева енергия в южна Добруджа.

Поле 1 е опитно поле на Добруджански технологичен колеж. Гр. Добрич с координати (43.553181, 27.830570).

Поле 2 е експериментално поле на Добруджански земеделски институт, с. Петлешково, община Генерал Тошево с координати (43.657832, 28.022780).

Поле 3 на земеделски стопанин, то се намира в землището на гр. Добрич с координати (43.548686, 27.759369)

Местата на провеждане на експеримента се показани на Фиг.1.



Фиг. 1. Място на провеждане на наблюденията.

### Методика на изследването.

Проведени са 193 полета с БПЛА. Броят извършени успешни полети и количеството снимки в настоящото изследване е показан в Таблица 3.3.1. Изследването е проведено през периода 2019 – 2022 г.

Таблица 3.3.1. Количество проведени експерименти.

	2019-2020г.	2020-2021г.	2021-2022г.	Всичко
Дни на наблюдение	19	23	22	64
Заснимания	19	99	67	185
Снимки	15 500	53 000	25 000	93 500

Извършено е предварително планиране на полетите, при което са съставени планове на полетите така, че да се използват оптимално възможностите на БПЛА. Заснемането е проведено на 100 m височина над терена при застъпване в двете посоки от 80% при което се получи разделителна способност от 3.75 cm/pix.

БПЛА, който е използван е DJI Mavic 2 Pro [dji.com, 2021]. Снабден е с 20 MP 1" CMOS и сензор Hasseblad L1D-20 (Фиг. 3.3.2). Разполага с 31 минути максимално полетно време, с максимална скорост до 72 км/ч. Теглото на Mavic 2 Pro е 907 грама.





Фиг. 3.3.2. Снимка на DJI Mavic 2 Pro оборудван с камера MAPIR Survey3W\_RGN, и калибратор за изображението MAPIR.

В допълнение към БПЛА е монтирана втора камера на MAPIR Survey3W Camera [mapir, 2021] - Red+Green+NIR (RGN, NDVI) със сензор Sony Exmor R IMX117 - 12 MegaPixel. Този модел RGN отчита отражението на инфрачервена светлина с дължина на вълната 850 nm, червено отражение при 660 nm дължина на вълната и зелено отражение при 550 nm дължина на вълната. Камерата е с перспективна леща и фотосензор тип: Sony Exmor R IMX117 12 MP (Bayer RGB) и външен GPS/GHSS ublox UBX-G7020-KT. Техническите характеристики на сензорната матрица на камерата са: ширина 4,044 mm, височина 3,033 mm, размер на пиксела 1,011  $\mu\text{m}$ , основна точка X 2,022 mm, основна точка Y 1,5165 mm.

#### **Научна и практическа новост.**

На базата на направените изследвания е получен регионален NDVI индекс, специфичен за Южна Добруджа. Установено е че индексът варира от -1 до 0.5. Проследена е динамиката на NDVI през фенологичното развитие на пшеницата като максимум от 0,5 е достигнат през периода на изкласяване. Идентифицирани са възможности за оценка на типове абиотичен и биотичен стрес – възвратни пролетни мразове и разпространение на жълта ръжда.

Вследствие на направените експерименти е създадена база от данни за тенденциите и динамиката на изменение на NDVI, EVI2, и SAVI индекса за пшеница в регион Южна Добруджа. Базата от данни носи информация за регионалните особености при вегетацията за земеделските култури и ще служи за еталон при бъдещи изследвания.

### **Реализация на резултатите.**

Посредством метод за безразрушителен контрол за изследване на свойствата и състоянието на посеви чрез дистанционно спектрално изследване са установени възможности за ранна диагностика на развитие и разпространение на жълта ръжда по зимна обикновена пшеница. Формирана е база данни за NDVI вегетационен индекс от няколко стопански години. Резултатите от дисертационния труд са подходящи за практиката и могат да бъдат използвани от земеделските производители и селекционери като методическо ръководство и база данни при сравнение на тенденциите на изменение за NDVI вегетационен индекс. В научната литература липсват подобни резултати от изследвания в България.

### **Апробация на резултатите.**

Резултати от дисертационният труд са представени на научни конференции с международно участие в Бари, Италия на конференцията „Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture“, която е индексирана в Scopus. Самостоятелно участие в конференция с международно участие в Одеса, Украйна „Information technologies and automation– 2021“. Участие в докторантска конференция с международно участие в Кишинев, Молдова „Development through Research and Innovation – 2021“. Публикувани са резултати в Годишник на ТУ – Варна и Русенски университет. Представени са резултати в „Дни на механиката“.

### **Публикации по дисертационния труд**

Резултатите от дисертационния труд са представени в 10 научни публикации в научни списания и конференции, на български и английски език, издавани в България, Италия, Украйна и Молдова.

### **Структура и обем на дисертацията.**

Дисертационния труд е в обем от 151 страници, в т. ч.: съдържание, списък на използваните символи и съкращения, увод, пет глави, приноси, библиографска справка от 227 литературни източника и 5 броя приложения.

## **СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **ГЛАВА 1. ОБЗОР НА ВИДОВЕ СЕНЗОРИ, ИЗПОЛЗВАНИ В ПРЕЦИЗНОТО ЗЕМЕДЕЛИЕ**

В първа глава са разгледани следните сензори използвани в прецизното земеделие:

1. Механични сензори за плътност на почвата.
2. Глобална система за позициониране.
3. Сензори за измерване на преместване и скорост.
4. Акустични и пневматични сензори за почвена плътност.
5. Електрически и електромагнитни сензори.
6. Оптични и радиометрични сензори.
7. Сензори за дистанционно спектрално изследване.
8. Сензори за разделяне на цветовете.
9. Мултисензорни устройства - метеорологични станции за нуждите на прецизното земеделие.

Анализирани са някои технически и експлоатационни параметри на сензорите и възможностите за тяхното използване в изследването. След оценка на възможностите и приложимостта им за нуждите на изследването са формулирани целите и задачите на разработката.

Формулирана е работната хипотеза на изследването.

### **Глава 2: Обработка на данните получени чрез дистанционно наблюдение на земеделски култури с БПЛА**

#### **2.1. Обект и предмет на изследването.**

Предмет на изследването са сензорни системи с приложение в прецизното земеделие използвани в БПЛА. И приложимостта на метода.

#### **2.2. Методи за получаване и обработка на данните**

През периода на експериментални изследвания за три години е извършена 400 часа полева работа и 2000 часа компютърна обработка на резултатите. Всяка снимка е направена с фиксирани параметри на затвора и е с фокусно разстояние 3,0 mm. Скоростта на блендата е 1/500, фокусно

разстояние  $f/2,8$  и ISO 100. Планираната резолюция на пиксел е 2,34 cm според полетния план. При обработките с програма за фотограметрия Pix4D, [Pix4Dmapper] за NIR камерата е получи разделителна способност 3,75 cm на пиксел при полет на височина от 100 м. Генерирания детайлен отчет от Pix4D дава информация относно грешката. При първия и третия полет имаме еднаква грешка от геокоординатите по Z от 0.993 и стойности за X и Y от 0.409. Втория полет има по X - 0.459, Y - 0.447 и Z - 1.031. Кое довежда и до различен резултат при изчисляването на червен и инфрачервен цвят. Получени стойности R1 – 2169, R2 – 2299, R3 – 2148.

### **2.3. Обработка чрез специализиран софтуер Pix4D.**

Снимките, които се зареждат в програмата за обработка е необходимо да са геореферирани, т.е. да имат данни за GPS координатите от където са заснети. Програмата генерира и детайлен отчет за извършената обработка, в който се включват данни за качеството на генерирания резултат и количеството грешки при обработка.

### **2.4. Получаване на вегетационни индекси посредством Matlab**

Снимките на отделните сортове (парцели) са изрязани от общата снимка, така че всяка от тях да съдържа само растения, (без почва около тях) и да има еднакъв брой пиксели. Изображението е разделено на зони с 180 x 240 пиксела. Те формират матрица от стойности, който съответстват на отражението от всеки цвят, според датите на заснемането и според дължините на вълните на цветовете: R, G, B и NIR. От тези данни се генерира числова стойност на количеството отразена светлина във всяка една от спектралните ленти. Възможни са  $2^8$  (256) стойности за всеки цвят, т.е. те варират в диапазон от 0 до 255.

### **2.5. Получаване на вегетационни индекси от числовите стойности по отделните цветови канали.**

Посредством програмния продукт ImageJ е извършен анализ на получените изображения. Стойностите се представят в 8 бита в цветови канал представляващи 256 кода за всеки на първичните R, G и B, което е

16 777 216 [256<sup>3</sup>] възможни състояния за цвят. Продуктът генерира хистограма и цифрови стойности на цвета.

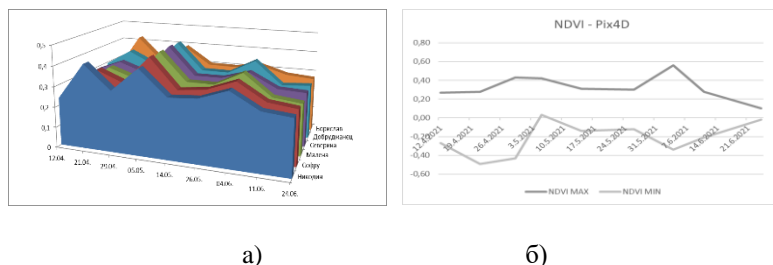
## 2.6. Проверка на ефективността и приложимостта на метода за наблюдение на вегетацията посредством БПЛА.

Сравнение на получения NDVI индекс от поле изчислен посредством Pix4D с данни за същия индекс взети платформата OneSoil. На фигура 2.6.1 е представено изменението на индекса NDVI на посевна площ пшеница през целия период на вегетация.



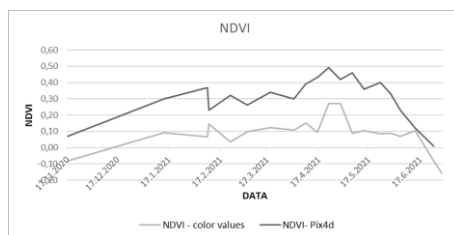
Фиг. 2.6.1. Изменението на NDVI индекса отчетен: а) с БПЛА, б) от OneSoil.

Сравнение на получените резултати от програмния продукт Pix4D и резултата изчислен с Matlab е показан на Фигура 2.6.2. Макар и изчисления индекс да е по сортове то общата тенденция отговаря на сумарния индекс за периода.



Фиг. 2.6.2. Вегетационен индекс NDVI по дати изчислен с: а) Matlab и б) Pix4D

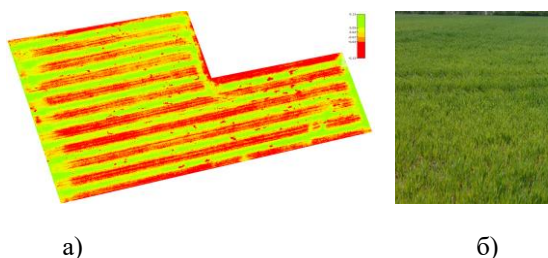
Сравнение на NDVI на поле с пшеница получен от Pix4D и изчислен от стойностите на цветовете получени от ImageJ е показано на Фигура 2.6.3.



Фиг. 2.6.3. Сравнение на NDVI от Pix4D и стойността на цвета с ImageJ.

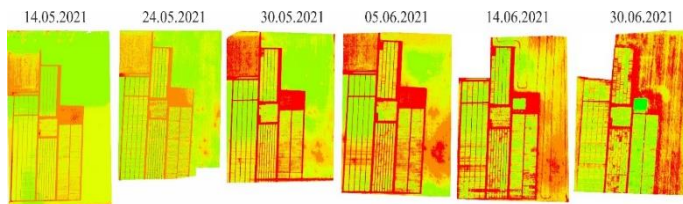
## 2.7. Регистриране на промени във вегетацията в посева вследствие на патогени.

На Фигура 2.7.1. е показана карта на NDVI индекс на поле засято с зимна пшеница и снимка на същото поле с RGB камерата. Редуването на зони с ниска и висока стойност на индекса не се забелязват в RGB снимката. Липсват зони с по слабо развитие на растенията или повреди от патогени. Установено е, че те са резултат от различна гарнираност на посева вследствие повреда в сеялката. Поради липсата на икономически важни болести, проблемът не може да бъде оценен визуално.



Фиг. 2.7.1. Зимна пшеница: а) NDVI индекс на полето, б) снимка с RGB камерата.

Фигура 2.7.2. е снимка на зоната с регистрираното петно с понижаване на NDVI. Визуално при наблюдение от разстояние не може да се оцени поражението от патогена.



Фиг. 2.7.2. развитие на жълта ръжда при поле с пшеница през 2021 г.

## **2.8 Оценка на възможността за наблюдение на площи посредством малък БПЛА.**

Вследствие на направените изследвания се констатира следното: в района на Южна Добруджа е възможно да се използва малък БПЛА за наблюдение на земеделските култури. Резултатите получени от БПЛА са аналогични на данните от сателитното наблюдение, но разделителната способност е 10 пъти по-малка. Възможно е облитане до 1,2 кв/км при смяна на 3 батерии или сканираната площ е до 500 декара с една батерия. От направените 193 излитания неуспешните са 13, което е 6,7%.

Средноквадратичните грешки (RMS) в изчислените координати на парцелите варира от 1,2 до 1,5 метра. При заснемане на парцел с размер 500 x 500 метра относителната грешка в координатите на позицията е 0,3%.

### **Обобщени изводи от Глава 2:**

1. Проследена е динамиката на NDVI през фенологичното развитие на пшеницата като максимум от 0,5 е достигнат през периода на изкласяване. Идентифицирани са възможности за оценка на типове абиотичен и биотичен стрес – възвратни пролетни мразове и разпространение на жълта ръжда. Доказана е приложимостта и ефективността на дистанционното наблюдение за тенденции в изменение на кривите на основни вегетационни индекси и най-вече динамиката на NDVI, през фенологичното развитие на пшеницата.

2. Поради малкия размер на селекционните площи методът за обработка на информация чрез MatLab е алтернативно решение за изследване, което е надеждна оценка на земеделските култури. Методика е подходяща практическо приложение в селекционната и изследователската работа на зърнено-житните и други култури, както и при земеделското производство за установяване на определени тенденции за конкретен район със специфични агро-метеорологични характеристики.

3. Методиката посредством програмния продукт ImageJ за извличане на резултати от снимков материал позволява изчисляване на вегетационни индекси за малки площи. Същевременно дава минимална, максимална и стандартна стойност на изследвания индекс. Позволява съпоставяне на информацията за метода на заснемане и определяне на зависимостите между получената информация и параметрите на камерата за наблюдение.

4. Получените резултати на сходни тенденции при заснемане с RGN и RGB камера показва, че е възможно да използваме за наблюдение тенденциите в изменението на развитието на земеделските култури с фабрично оборудваната камера на БПЛА. Съответно по-добри резултати за изследването се получават при използване на RGN камера.

### **ГЛАВА 3. МЕТОДИ ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИТЕ.**

#### **3.1. Теоретични изследвания на основата на емпирични данни.**

Дистанционното наблюдение е модерен и перспективен метод за събиране на информация, която е необходима за правилното и ефективно провеждане на процесите в земеделието. Това е причината за даване на значим приоритет в настоящото изследване на приложението и ефективността на сензорната система, за наблюдение с БПЛА.

#### **3.2. Изследвания на опитното поле на Добруджански технологичен колеж - резултати.**

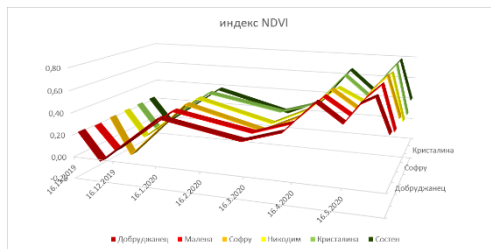
**През 2019-2020 г.** са направени изследвания на опитното поле на Добруджански технологичен колеж, за да се установи тенденцията на



изменение на NIR отражението на видове зърнено-житни култури в периода на тяхната вегетация. В изследването е направено наблюдение върху развитието на шест сорта пшеница за целия период на израстване от покълняването до узряването. Наблюдението е документирано чрез заснемането на опитно поле, в което по специален сеитбен план са засети сортовете. Заснемането е извършено с цифрова камерата, чийто канал за син цвят е заместен с канал в невидимия инфрачервен диапазон на спектъра, излъчван от слънцето с дължина на вълната 850 nm. Установена е динамиката в изменението на четири вегетационни индекса, които се изчисляват с данни за отразената светлина в близкия до червения цвят инфрачервен спектър.

Чрез софтуера за фотограметрия – Pix4Dmapper са получени стойности за отразената слънчева светлина, записани в пикселите на видеосензора на камерата. С тези величини са изчислени вегетационните индекси, като средни числени стойности за всеки сорт от направените наблюдения в периода от 28.11.2019 г. и 10.06.2020 г. Направени са изводи за състоянието на посевите от отделните сортове и за характерните за всеки от тях диапазони на изменение, които характеризират развитието им.

Динамиката на изменение на най-често използвания за оценка вегетационен индекс NVDI – Фигура 3.2.6. показва, че през късните есенни и зимните месеци, включително месец март, индексът е с висока отрицателна стойност, поради по-голямо отразяване на светлината в червения спектър. Натрупването на биомаса се наблюдава през месеците април и май, докато през юни стойността е отрицателна поради бързото узряване на културите, което е свързано със специфичните климатични условия през 2019-2020 г.



Фиг. 3.2.6. Изменение на вегетационният индекс NDVI по дати и парцелки/сортове за периода месец ноември 2019 до юни 2020 г.

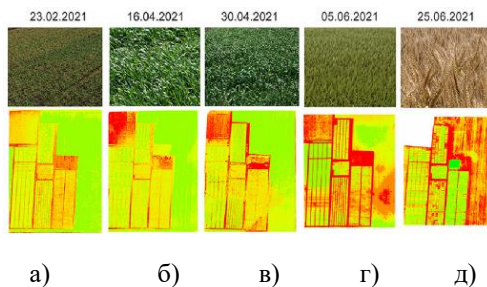
**През 2020-2021 г.** резултати от изследванията на опитно поле на ДТК Добрич. В изследването са представени резултатите от заснемания с дрон на опитно поле засято с два сорта обикновена пшеница, два сорта твърда пшеница и два сорта тритикале реколта 2020-21 г. Събран е снимков материал с RGB и NIR камери при летеж на дрон на малка височина между 15 и 20 метра. Цифровата информация от снимковия материал е извлечена чрез конвенционалната софтуерна платформа MatLab. Изчислени са вегетационните индекси на различните сортове за периода от месец април до месец юни, които показват спецификата в развитието им. Приложен е един лесен и бърз подход за проследяване развитието на житните култури и за идентифицирането на болести и вредители по тях.

### **3.3. Експериментални изследвания в реални условия - на лабораторно опитно поле на Добруджански земеделски институт (ДЗИ) гр. Ген Тошево.**

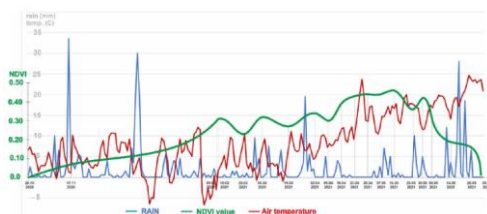
Общият брой дни, в които полети са извършени, са 22, с 43 прелитания над зоната на наблюдение. Общият брой на снимките надхвърля 30 500. Целите на изследването са 1) проследяване динамиката на изменение на отражателните вегетационни индекси през фенологичното развитие на зимна обикновена пшеницата при условията на Добруджа; 2) генериране на данни, които да послужат за сравнение през фазите на развитие и тенденциите при бъдещи наблюдения; 3) проверка на възможностите за използване на UAV за нуждите на прецизното земеделие и приложимостта на NIR камерата за ранно откриване на стрес.

Изследването е проведено в рамките на опитно поле на Добруджански земеделски институт, с. Петлешково, община Генерал Тошево (43.657963, 28.023110). Оценено е фенологичното развитие и формиране на продуктивността на зимна обикновена пшеница през реколтната 2020-2021 г. Потвърдена е възможността за генериране на тенденции в изменение на кривите на основни вегетационни индекси и най-вече NDVI. Проследена е динамиката на NDVI през фенологичното

развитие на пшеницата като максимум от 0,5 (Фиг. 3.3.7) е достигнат през периода на изкласяване.



Фиг. 3.3.6. Снимки по дати с видима RGB светлина на горния ред, а под тях NDVI картина на пшеницата по дати на заснемане с NIR камера.



Фиг. 3.3.7. Изменение на индексът NDVI на фона на климатичните промени през наблюдавания период 2020-2021 г.

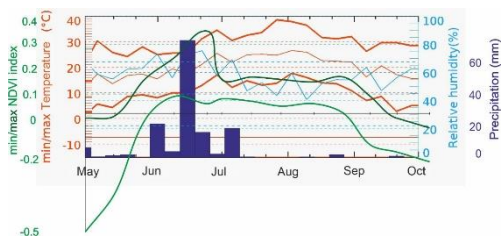
Идентифицирани са възможности за оценка на типове абиотичен и биотичен стрес – възвратни пролетни мразове и разпространение на жълта ръжда, (Фиг. 3.3.6.). Съпоставени са кривите на изменение на генерирани вегетационни индекси през вегетацията на пшеницата. Сходство на трендовете е установено между NDVI, EVI 2, MGVI и SAVI а също и VARI на базата на видимата светлина. Съпоставката между стойностите на NDVI при облитане с БПЛА и данните от сателитно наблюдение показват сходство, (Фиг. 3.3.9.). За целите на прецизното земеделие по-подходящи остават първите, при които има възможност за по-детайлна картина.



Фиг. 3.3.9. Сравнение на NDVI, получено: а) от наблюдение с UAV и б) от сателит,

### 3.4. Проследяване на вегетацията на слънчоглед посредством БПЛА в Южна Добруджа през 2021 г.

При направените 31 облитания са заснети над 15 000 снимки. В изследването е направено сравнение на данните за (NDVI, (Фиг. 3.4.12.), EVI2, SAVI, CVI, MGVRI и MPRI) вегетационни индекса при наблюдение вегетацията на слънчоглед в Южна Добруджа през 2021 г. Получени са изображения с RGB и цифрова NIR камера чрез БПЛА. В плана на полетите са зададени: скорост 8 м/с, височина 100 м и заснемане на припокриващи се на 80% изображения.



Фиг. 3.4.12. Изменение на NDVI на поле със слънчоглед на фона на метеорологичните характеристики.

При изчисляването на индексите са взети под внимание интензитета на слънчевата радиация и параметрите на метеорологичната обстановка в момента за заснемане.

Получена е силна зависимост от количеството валежи и влагозапасеността на почвата и стойността на NDWI. Получените резултати показваха стабилна тенденция на изменение на вегетационните индекси, както и надеждни резултати за наблюдение на земеделски площи с безпилотен летателен апарат.

### **Обобщени изводи от Глава 3:**

1. Приложен е оригинален подход за обработка на събрания снимков материал като информация за развитието през вегетационния период. Направени са снимки, които съдържат информация за времето на заснемане, височината и разположението на сортовете. За извличане на необходимата полезна информация за проследяване на вегетацията на растенията чрез функции в софтуерната платформа MatLab.

2. Получените данни позволяват използването на набор от показатели, за да се даде оценка за развитието на генотипа. Това показва, че разработената методика може да намери приложимост в селекционната и подобрителната работа на зърнено-житните култури, както и в земеделското производство за установяване на определени тенденции за даден район на страната.

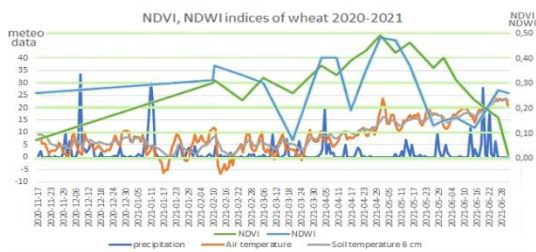
3. Проучването е част от формулираната хипотеза, за приложимостта и възможността за оценка на състоянието на реколтата с БПЛА и валидиране на резултатите в условията на района на Южна Добруджа.

4. Сравнението между стойностите на NDVI при облитане с БПЛА и данните от сателитното наблюдение показва сходство. Първите позволяват създаване на по-детайлна картина.

**Глава 4. Математическо моделиране. Статистическа обработка на данните чрез метода на регресионния анализ.**

#### 4.1. Наблюдение на засушаването в горния почвен слой с БПЛА в района на Добруджа.

Анализиран са зависимостите между различните фактори. Съдържанието на влага в горния почвен слой показва добра корелация с получените данни от NDWI индекс, (Фиг. 4.1.1.). Чрез регресионен анализ е доказана тенденцията на зависимостта на индекса NDWI от метеорологичните данни, а също така и кои от факторите имат значимост в регресионния модел.



Фиг. 4.1.1. Изменение на индексите NDVI и NDWI на поле с пшеница според

#### 4.1.1. Резултати от линеен регресионен анализ на засушаването в горния почвен.

Регресионното уравнение на линеен множествен регресионен анализ има формата:

$$\hat{y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m \quad (4.1.2)$$

където  $\hat{y}$  е теоретичната (оценъчна) стойност на характеристиката на резултата  $x_i$ ,  $i=1 \dots m$ ; са измерените стойности на характерните фактори;  $b_i$ ,  $i=1 \dots m$  са коефициентите в регресионното уравнение;  $a$  е свободният термин.

Резултатът от регресионния анализ показва, че моделът е статистически значим, тъй като 69% от дисперсията на  $y$  може да се обясни с дисперсията на управляемите (целевите) фактори. Останалите 31% се дължат на фактори, които не са включени в модела. Стойността

на свободния член  $a$  в уравнение (4.1.2) е равна на 0,635. Съответстващата му  $t$ -стойност на Student от  $t = 4,764$  и ниво на значимост  $P$ -стойност = 0,0005 доказват неговата статистическа значимост. Тъй като  $P = 0,0005 < 0,05$  може да се заключи, че свободният член е статистически значим. Коефициентите преди факторите  $X_1$ ,  $X_3$  и  $X_4$  на регресионното уравнение също са статистически значими, защото са по-малки от 0,05, а коефициентите преди —  $X_2$  и  $X_5$  са статистически незначими. Коефициентът  $X_4$  пред  $b_4 = 0,0294$  има най-висока стойност.

#### **4.2. Анализ на факторите, които определят протичането на процеса регистриране на отражението от слънчевата радиация на посев от пшеница.**

В изследването е приложимостта и ефективността на фото сензор за дистанционно наблюдение на земеделски култури. Направени са анализ и обработка на информацията, която се съдържа в голямо количество снимков материал, който показва вегетацията на пшеница, през пролетта на 2021 г. Изображенията отразяват, как във времето, при различни метеорологични условия, растенията отразяват слънчевото лъчение в честотните диапазони на видимата светлина. Снимките са направени с цифрова камера Hasselblad L1D-20, снабдена с 20 MP 1" CMOS сензор, с която е оборудван дрон модел DJI Mavic 2 Pro. Чрез методите на математическата статистическа обработка е установено, как управляеми и неуправяеми фактори влияят при заснемането на изображения. Получени са регресионните уравнения, които дават връзката между факторите на процеса на заснемане по време на полета на дрона и параметрите, които показват изменението на цифровите стойности за цветовете от видимият спектър на слънчевото лъчение: червен, зелен и син в момента на получаване на цифрово изображение за състоянието на посева.

За описване областта на опитимума се използва полином от втора степен, [Mitkov, 2011]. Избран е полином от вида:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \dot{x}_i + \sum_{i,k=1}^m b_{i,k} \dot{x}_i \dot{x}_k + \sum_{i=1}^m b_{ii} \dot{x}_i^2 \quad (4.2.1.)$$

Проведен е активно-пасивен експеримент за изследване качествата на фотосензор. Чрез полином от втора степен е получен регресионен модел, който дава информация за влиянието на трите фактора: два управляеми F – бленда и E – експозиция и един неуправляем W - слънцегреене върху параметрите на модела, които представляват цифровите стойности на трите цвята: Y1 - червен, Y2 - зелен и Y3 - син.

#### **4.3. Дескриптивен анализ на получени резултати при изследване на полета с царевица през 2021 г.**

Изследването има за цел да се оцени ефективността на 8 растителни индекси при идентифициране на вегетацията на царевица в южна Добруджа през 2021г. Наблюдавани са две полета в Добруджа, България. Изображенията са получени от цифрова NIR камера свързват с дистанционно пилотиран БПЛА. Осем вегетационни индекса на растителността (NDVI, EVI2, SAVI, NDWI, RDVI, CVI, MGVRI, MPRI) са оценен в експеримента от получените изображения по време на изследването. Получените резултати от 7 индекса доведоха до обща тенденция на изменение на индексите. Приложимостта на метода дава добри резултати при наблюдение на земеделските площи посредством безпилотен летателен апарат. Статистички значими положителни корелации на средните дневни температури са установени с NDVI, SAVI, EVI 2, CVI и RDVI.

#### **Обобщени изводи от Глава 4:**

1. Възможно е да се следи влагата в горния почвен слой с помощта на малък БПЛА, при който се получава пълна картина на полето, т.е. доказана е приложимостта на БПЛА за тази дейност. Пряка връзка между повърхностната влажност на почвата и индекса се наблюдава, когато се заснема гола почва или когато растенията покриват по-малко от 50% от площта.

2. Проведен е активно-пасивен експеримент за изследване качествата на фотосензор при изследване на зимна пшеница. Чрез полином от втора степен е получен регресионен модел, който дава информация за влиянието на трите фактора: два управляеми F – бленда и



Е – експозиция и един неуправляем W - слънцегреене върху параметрите на модела, които представляват цифровите стойности на трите цвята: Y1 - червен, Y2 - зелен и Y3 - син.

3. Сравнени са тенденциите на промяна на общо 8 индекса и тяхната приложимост при оценка на растителната маса и прогнозиране на добивите от царевица от две полета. Посредством изображения и малък БПЛА фермерът може да проследява и анализира данните за насажденията без да е зависим от спътникови снимки. Може да се получи вярна картина на слабите и силни зони в полето с царевица без да е необходимо да се преминава през посева.

## **Глава 5. Експериментални изследвания за създаване на прототипен вариант на сензор за почвена влага.**

### **5.1. Сензор за почвена влага.**

Създаден е прототип на сензор за почвена влага, който използва гравиметричен способ за калибриране на капацитивен сензор за влажност на почвен. Капацитивните сензори за влажност на почвата използват диелектричния контраст между вода и почва. Измерване на водното съдържание на почвата е от съществено значение в земеделието.

### **5.2. Паралелен кондензатор**

Капацитетът на електрическият кондензатор се дефинира като количеството заряд, което материалът може да съхранява при даден приложен електрически потенциал. Кондензаторите представляват паралелни плочи, разделени от диелектрик.

### **5.3. Плосък капацитивен сензор за влажност в почвата.**

Капацитетът, отчетен от сензора за влажност на почвата, се различава от паралелния пластинен кондензатор, тъй като плочите на кондензатора не са успоредни, а са разположени в една равнина.

### **5.4. Обемно водно съдържание.**

Обемното водно съдържание  $\theta_v$  е отношението на обема на вода към обема на почвата.

### **5.5. Използвани компоненти и схема на свързване.**

1. Микроконтролер - WEMOS D1 Mini Pro 16M;
2. Капацитивен сензор за влажност на почвата - V 1.2;
3. Батерия - BS186Q 18650 3100 mah 3.7V 40A ;
4. Държач за батерия - Holder Case For 18650;
5. Контролер за зареждане TP4056;
6. RGB LED WS2812 (светодиод);
7. DC Jack (букса).
8. Слънчев панел - 6V 4.5W 520mAh.

### **5.6. Моделиране корпуса на сензора**

Създаден е модел на корпуса на сензора, е отпечатан на 3D принтер. Използвана е програмата 3D MAX за създаване на детайлите на корпуса, който са проектиране така, че да позволяват печат на 3D принтер.

### **5.7. Тестване на сензора**

Когато сензорът е във въздуха, стойността на напрежението трябва е около 3.15V, а ако сензорът е във влажна почва, стойността ще бъде между 1.9V - 3.0V.

### **5.8. Сензор за температура**

За измерване на температурата се добавя модул DHT11. Тези сензори съдържат чип, който извършва аналогово-цифрово преобразуване и излъчва цифров сигнал с температурата и влажността.

### **5.9. Калибриране на капацитивният сензор за влажност на почвата**

Начинът, по който става това, е като се използва един от контейнерите от 250 ml с градуирани маркировки и се установи, че нивото на почвата достига същото ниво всеки път, когато се добавя вода към почвата.

## **5.10. Калибриране на сензора чрез метода на гравиметричното водно**

Процедура за калибриране:

1. Измерва се масата на контейнера за почвена проба;
2. Напълва се контейнера до 200 ml със суха почва;
3. Измерва се масата на сухата почва в контейнера;
4. Намокря се почвата с 10 ml вода (това е 5%);
5. Разбърква се мократа почва, за да е водата равномерно разпределена, след което се напълва отново контейнера до 200 ml;
6. Измерва се масата на мократа почва;
7. Повторят се стъпки 4., 5. и 6., докато почвата се насити и започне да просмуква вода;
8. След като процедурата на овлажняване достигне насищане, се поставя 200 ml почва върху масив от восъчна хартия, за да изсъхне;
9. Когато почвата е суха, се измерва масата на тази суха почва - това е масата на сухата почва, използвана за плътност на почвата.

### **Обобщени изводи от Глава 5:**

1. Сензорът за влага на почвата е надеждно решение за определяне на влажността на почвата. Той осигурява наблюдение на тенденциите в изменението на почвената влажност в земеделски стопанства като по-евтина алтернатива на професионалните метеорологични станции. Експериментите показват, че сензорът е приложим и ефективен в агрометеорологичните особености на южна Добруджа.

2. Създаденият сензор работи само посредством захранването си от слънчева енергия с допринася за опазване на екологията. Потвърдено е че възможността му за зареждане и работа при климатичните особености в изследвания регион.

### **Приноси**

Настоящият дисертационен труд представлява завършен етап от теоретично-експериментално изследване посредством безконтактен неразрушителен метод на развитието при земеделските култури

посредством БПЛА и NIR камера. Приносите от разработената дисертационна работа могат да бъдат формулиране както следва:

### **Научни приноси**

Създадена е база данни за тенденциите и динамиката на изменение на вегетационните индекси: NDVI, EVI2, и SAVI за различните сортове пшеница в регион Южна Добруджа.

Анализирани са факторите, които определят протичането на процеса регистриране на отражението от слънчевата радиация на посев от пшеница. Установено е, че за тези от тях, които определят протичането на процеса с най-съществено влияние са максимумите на цветовете, като брой пиксели, с които те се регистрират от фото сензора.

Доказана е работната хипотеза, че съществува корелационна зависимост между спектралните данни на отражението от земеделските култури и фенологичните, биометричните и физиологичните показатели, което е от определящо значение за приложимостта и ефективността на сензорната система за дистанционното наблюдение.

### **Научно приложни приноси**

Установен е диапазона на изменение в рамките от -1 до 0.5 за региона на Южна Добруджа на вегетационният индекс NDVI за пшеница на базата на данните получени чрез дистанционно наблюдение в продължение на три години с БПЛА.

Направена е статистическа обработка на данните от засушаването в горният почвен слой чрез метода на регресионния анализ и е установена тенденцията за факторите, които имат най-голямо значение при изследване на едновременното им влияние върху индекса на влага NDWI, а това са: на първо място относителната влажност на въздуха, следвана от температурата на въздуха и най-слабо - слънчевата радиация.

### **Приложни приноси**

Приложен е оригинален подход за извличане на необходимата информация, посредством софтуерната платформа MatLab, която е полезна за проследяване вегетацията на растенията, като се използват данните от пикселните матрици, които цифровите технологии създават за всяко изображение. Метода е подходящ за малки площи при селекционна дейност.

Създаден е оригинален прототип на WiFi сензор за влажност на почвата и температура на въздуха, който е с автономно електрическо захранване, представлява аналог на професионалните метеорологични станции. Изследвана е възможността за използването му в аграрно климатичните особености на южна Добруджа.

Установено е сходство между изчислените стойности за NDVI получени от данни при облитане с БПЛА и от данните от сателитното наблюдение. Данните от БПЛА са по-лесно приложими и ефективни за целите на прецизното земеделие, позволявайки по-адекватна като време и по-детайлна като изображение картина.

Установени са фенологични данни чрез регистриране на отражение от специфични спектрални области, (т.е. възможност за изчисляване на вегетационни индекси), които предоставят надеждна предварителна информация за прогнозиране съдържанието на биомасата и на потенциала на изследваните растения.

### **Методични приноси**

Разработена е методология на изследването за приложимостта и ефективността на сензорната система чрез безразрушителен метод за дистанционното наблюдение, която съдържа:

- о планиране и провеждане на полеви кампании за дистанционно наблюдение и изследване влиянието на метеорологичните условия върху възможността за провеждане на облитания с БПЛА;

- о създаване на база данни за тенденциите на изменение на вегетационните индекси.

Получените данни от дистанционното наблюдение с БПЛА дават представа за развитието на даден генотип, с което разработената методика може да намери приложимост, в селекционната и подобрителната работа на зърнено-житните култури, както и в земеделското производство за установяване на определени тенденции в развитието на културите за даден район на страната.

### **Списък на публикуваните работи по темата на дисертацията.**

1. Стоянов, Св., Д. Михайлова, С. Захариева, А. Атанасов, „Изследване възможностите за потискане на хармониците при работа на интегриращ тензопреобразувател за измерване на сили и моменти в прецизното земеделие“, XXIII-та заключителна конференция на СУБ – Варна „Науката в служба на обществото - 2019“, 25.10.2019 г., списание „Известия“ на СУ – Варна 1`2019, том.1, стр. 41-50, ISSN (print): 1314-7390, ISSN (online): 2603-4085;
2. Атанасов, Р. Михайлов, „Обзор на безконтактни сензори с приложение в прецизното земеделие“, Научни трудове на Русенския университет - ISSN 1311-3321, том 59, серия 1.2, стр.12-17 – , 2020;
3. Mihaylov, R., А. Атанасов, А Ivanova, D Mihaylova, „Study of the vegetation of spring crops in the region of South Dobrudhza in 2020“, (e)Annual Journal of Technical University of Varna, Bulgaria (AJTUV), Vol 4, No 2, pp. 122-129, ISSN 2603-316X, DOI: <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol4.iss2.203>, (2020);
4. Атанасов, Р. Михайлов, „Обзор на сензори с механичен принцип на работа използвани в прецизното земеделие“, сп. Механика на машините, ISSN 0861-9727, бр. 1.2021 стр. 30-34 , 2021;
5. Asparuh Atanasov, Vladimir Demirev, Galina Mihova, “Satellite monitoring of agricultural land”, online conference “Development through research and innovation - 2021”, IIrd Edition August 27 , 2021, Chisinau, Republic of Moldova; ASEM, 2021, pp. 16-22. ISBN 978-9975-155-54-0; <https://irek.ase.md:443/xmlui/handle/123456789/1574>;
6. Атанасов А.И. “Overview of reflective vegetation indices when capturing with uavs in the south dobrudja region in 2021” XIV International

scientific practical conference «Information technologies and automation–2021» October, 21-22, 2021, Odessa, 2021. – P. 80–82 : tabl., fig. – Ref.: 7 tit; Ukraina; <https://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/18785>;

7. **Atanasov, A.**, Mihaylov, R., Stoyanov, S., Mihaylova, D., & Benov, P. (2022, May 18). Drone-based Monitoring of Sunflower Crops. Annual journal of technical university of varna, bulgaria, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol6.iss1.258>;

8. **Atanasov, A.**, Mihaylov, R., Stoyanov, S., & Mihaylova, D. (2022, December 31). Combined WiFi sensor for temperature and moisture of soil. Annual journal of technical university of varna, bulgaria, 6(2), 77-82. <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol6.iss2.279>;

9. Стоянов, С., Д. Василев, А. **Атанасов**, А. Петрова, „Съвременни методи и средства за изследване на въртящия момент в прецизното земеделие“, Сборник доклади от годишна Университетска научна конференция, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски“, Велико Търново, 2022 г., ISSN 2367-748;

10. **Atanasov, A.**, Mihaylov, R., Mihova, G. (2023). “Applicability and Efficiency of Remote Monitoring of Agricultural Crops”. In: Pascuzzi, S., Santoro, F. (eds) Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture. FMPMSA 2022., vol 289. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8_18), 2023, 289, pp. 169–178.

## **ABSTRACT**

**Title: "Researching the applicability and effectiveness of sensor systems in precision agriculture."**

**of the Requirement for the Degree Doctor**

**by Assistant Professor Engineer Asparuh Ivanov Atanasov**

The present study presents a methodology for remote non-destructive assessment of agricultural crops using a small RGB and RGN camera UAV. The assessment was made in three consecutive years during the entire vegetation period of agricultural crops and three different fields. 185 UAV shots and 93,500 photos of the observed areas were taken.

Trends in the change of the NDVI index of winter wheat have been tracked. A comparison was made between the obtained index change trends and satellite data. The obtained results show a similar variation curve. Several indices were tested to compare the obtained results.

A database has been created for the trends and dynamics of changes in the vegetation indices: NDVI, EVI2, and SAVI for the various wheat varieties in the Southern Dobrudja region. The variation range within -1 to 0.5 for the Southern Dobrudja region of the vegetation index NDVI for wheat based on the data obtained by remote sensing for three years with UAV was established.

An experiment was carried out to track the moisture in the upper soil layer of the vase of reflectance in the near infrared spectrum by means of the NDWI index.

Data and dependences of the parameters for crop capture were analysed with a linear regression model. A full factorial experiment was carried out to check the dependences on the obtained data and observation parameters.

An original prototype WiFi sensor for soil moisture and air temperature has been created, which is powered by solar energy, is a very important element for the practice of precision agriculture.



## АННОТАЦИЯ

**Название: «Исследование применимости и эффективности сенсорных систем в точном земледелии».**

**Требования к докторской степени**

**Ассистент инженера Аспарух Иванов Атанасов**

В настоящем исследовании представлена методика дистанционной неразрушающей оценки сельскохозяйственных культур с использованием небольшого БПЛА с камерами RGB и RGN. Оценка производилась в течение трех лет подряд в течение всего вегетационного периода сельскохозяйственных культур и трех разных полей. Было сделано 185 снимков с БПЛА и 93 500 фотографий наблюдаемых территорий.

Прослежены тенденции изменения индекса NDVI пшеницы. Проведено сравнение полученных трендов изменения индекса со спутниковыми данными. Полученные результаты показывают аналогичную кривую вариации. Для сравнения полученных результатов были протестированы несколько индексов.

Создана база данных тенденций и динамики изменения вегетационных индексов: NDVI, EVI2 и SAVI для различных сортов пшеницы в районе Южной Добруджи. Установлен диапазон варьирования в пределах от -1 до 0,5 для района Южной Добруджи вегетационного индекса NDVI для пшеницы по данным.

Был проведен эксперимент по отслеживанию влажности верхнего слоя почвы вазы по коэффициенту отражения в ближнем инфракрасном спектре с помощью индекса NDWI.

Данные и зависимости параметров захвата для анализа с помощью модели линейной регрессии. Для проверки зависимостей от полученных данных и параметров наблюдения был проведен полный факторный эксперимент.

Создан оригинальный прототип WiFi датчика влажности почвы и температуры воздуха, который питается от солнечной энергии, является очень важным элементом для практики точного земледелия.

## **Благодарности**

Авторът иска да изрази своята благодарност към научния си ръководител доц. д-р инж. РАДКО МИХАЙЛОВ за съдействието през целия период на разработка, напътствия и подкрепа по време на дисертационната работа. Също така изразява своята признателност и благодарност към доц. д-р ГАЛИНА МИХОВА, като втори научен ръководител, за оказаната помощ, разбиране и насърчаване.

Авторът изказва благодарност на целия екип от „Добруджански технологичен колеж” към ТУ - Варна за сътрудничеството и подкрепата, които са му дали по време на дисертацията.

Авторът изказва благодарност на всички преподаватели от катедра „Механика и машинни елементи” към ТУ - Варна за безценните напътствия, професионален опит и кураж, които са му дали по време на дисертацията.

Авторът благодари на семейството си и всички близки хора, без които настоящата дисертационна работа не би била реализирана.

ас. инж. Аспарух Атанасов